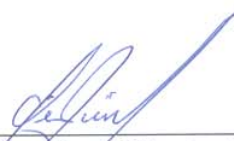


IMPLEMENTAÇÃO DE DOSIMETRIA QUÍMICA DE ALTAS DOSES PARA
IRRADIADORES INDUSTRIAIS

Cirilo Cezar Sant'Anna da Conceição

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:



Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.



Dr. Luiz Tauhata, D.Sc.



Prof. Delson Braz, D.Sc.



Dr. Teógenes Augusto da Silva, D.Sc.



Prof.^a Helen Jamil Khoury, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2006

CONCEIÇÃO, CIRILO CEZAR SANT'ANNA

Implementação de dosimetria química de altas doses para irradiadores industriais

[Rio de Janeiro] 2006

xv, 106 p, 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Nuclear, 2006)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Metrologia das Radiações
2. Dosimetria
3. Irradiadores industriais

I – COPPE/UFRJ II - TÍTULO (Série)

Aos meus filhos Laura e Pedro,
minha esposa Fátima,
meus pais Cirilo e Licélia (in memoriam)

"Navigare necesse; vivere non est necesse" - Pompeu, general romano, 106-48 aC., dita aos marinheiros, amedrontados, que recusavam viajar durante a guerra, cf. Plutarco, in Vida de Pompeu.

Camões, no clássico Os Lusíadas, recorre ao Mar, onde se lançaram seus patrícios heróicos para conquistar o Novo Mundo. "A velha frase 'Navegar é preciso, viver não é preciso', eu a vejo, do mar, com olhos diferentes do que em terra. Navegar, eu entendo, é a arte da precisão, e viver é, antes de mais nada, fundamental. O navegador não vaga a esmo, mas se prende a tudo que é possível, para tornar preciso o seu caminho. A exata posição dos astros no Universo, no preciso segundo de cada minuto, em cada hora, o vento, o sol, sinais de todos os tipos, dados de todos os acidentes, registros de todas as forças e movimentos. E na arte de navegar nada exige maior precisão do que aportar, com segurança e onde se quer."

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À COPPE / UFRJ, Programa de Engenharia Nuclear, pelos ensinamentos e conhecimento técnico-científico adquiridos, essenciais para a realização deste trabalho e a todo corpo técnico científico do LIN.

Ao Dr. Edgard de Jesus, pela orientação e pelo apoio sempre presente desde a matrícula até a defesa deste trabalho.

Ao Dr. Luiz Tauhata, IRD / CNEN, pela amizade e orientação, e por sempre ter acreditado na realização deste trabalho através de incentivos de toda espécie, principalmente que o ser humano sempre pode superar a si mesmo e a todas as barreiras.

Ao Dr. Dirceu M. Vizeu, pela oportunidade de realizar trabalhos na Embrarad, e acima de tudo por ser um incentivador constante na área de utilização de radiações ionizantes para fins industriais.

A Cosme Norival Mello da Silva e Luzianete Amaral de Melo Magalhães Filha (Aninha) do LNMRI pelas irradiações e calibrações.

À minha esposa e meus filhos, pela compreensão e paciência nos diversos e longos períodos de ausência necessários para a realização deste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

IMPLEMENTAÇÃO DE DOSIMETRIA QUÍMICA DE ALTAS DOSES PARA
IRRADIADORES INDUSTRIAIS

Cirilo Cezar Sant'Anna da Conceição

Março /2006

Orientadores: Edgard Francisco Oliveira de Jesus
Luiz Tauhata

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho visa, a partir da implementação de metodologias para medições de dose absorvida através de dosímetros químicos em fase líquida, disponibilizar no país, o padrão de dose absorvida com rastreabilidade ao sistema metrológico internacional aplicado a irradiadores industriais e de pesquisa, seja através da calibração dos sistemas dosimétricos de rotina, programa de qualidade com medições comparativas e utilização direta dos dosímetros padrões.

A utilização destes sistemas dosimétricos de baixo custo em irradiadores de grande porte, atende aos requisitos de certificação e pode reduzir os custos com dosimetria para aproximadamente 20% do custo total, utilizando estes sistemas em medições de rotina e procedimentos de validação, substituindo em grande parte os dosímetros importados de PMMA (Polimetilmetaacrilato), entre outros.

Abstract of Thesis presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Science (D.Sc.)

IMPLEMENTATION OF HIGH-DOSE CHEMICAL DOSIMETRY FOR
INDUSTRIAL FACILITIES

Cirilo Cezar Sant'Anna da Conceição

March / 2006

Advisors: Edgard Francisco Oliveira de Jesus
Luiz Tauhata

Department: Nuclear Engineering

The purpose of this work is the implementation of methodology for high-dose measurements using chemical dosimeters in liquid phase, traceable to the international metrology system, and make available in the country, the standard of high-dose to industrial irradiation facilities and research irradiators, through the quality program with comparative measurements and direct use of the standard dosimeters in routine.

The use of these low cost dosimetry systems in industrial irradiation facilities, assists to the certification requirements and it can reduce the costs with dosimetry for approximately 20% of the total dosimetry costs, using these systems in routine measurements and validation process, largely substituting the imported PMMA dosimeters, among others.

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	6
1.2 Finalidades	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Sistemas dosimétricos	8
2.1.1 Dosímetros em fase líquida.....	8
2.1.2 Dosímetros sólidos	10
2.1.3 Seleção de sistemas dosimétricos	11
2.1.4 Rastreabilidade de uma medição	12
3 FUNDAMENTOS DA DOSIMETRIA	14
3.1 Fontes de radiação típicas para processamento de produtos e pesquisa.....	14
3.1.1 Irradiadores de grande porte.....	15
3.1.2 Irradiador de pesquisa.....	17
3.2 O papel da dosimetria.....	18
3.3 Interações da radiação com a matéria e com os dosímetros.....	19
3.4 Determinação de Dose Absorvida.....	22
3.4.1 Medições de dose absorvida	22
3.4.2 Medições de dose absorvida em feixes de fótons.....	23
3.4.3 Medições de dose absorvida em campos de elétrons.....	25
3.5 Sistemas Dosimétricos.....	26
3.5.1 O Dosímetro “Fricke”.... ..	26
3.5.1.1 Mecanismos de reação do dosímetro.....	26
3.5.1.2 Medições de dose absorvida.....	27
3.5.1.3 Características principais do dosímetro.....	28
3.5.1.4 Preparação da solução dosimétrica.....	28
3.5.2 O Dosímetro de “Dicromato de Prata”	28

	Pág.
3.5.1.1	Medições de dose absorvida..... 29
3.5.1.2	Características principais do dosímetro..... 30
3.5.1.3	Preparação da solução dosimétrica..... 30
3.5.1	O Dosímetro de “Dicromato de Potássio” 30
3.5.1.1	Medições de dose absorvida..... 31
3.5.1.2	Características principais do dosímetro..... 31
3.5.1.3	Preparação da solução dosimétrica..... 32
3.6	Fundamentos da espectrometria UV/VIS..... 32
3.7	Calibração da Dose Absorvida, Rastreabilidade e Comparações.. 35
3.7.1	Calibração em Dose Absorvida..... 35
3.7.2	Rastreabilidade e Comparações..... 37
3.7.3	“Programa Nacional de Controle de Qualidade” em medições de altas doses..... 38
3.7.4	Aplicações em irradiadores industriais e de pesquisa..... 38
3.8	Incertezas na Dosimetria..... 39
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 42
4.1	Estabilidade do espectrofotômetro 42
4.1.1	Preparação das soluções de dicromato de potássio 43
4.1.2	Procedimento de medição 43
4.2	Calibração do dosímetro Fricke 44
4.2.1	Fontes de irradiação e calibração no arranjo experimental ... 44
4.2.2	Irradiação do dosímetro Fricke no arranjo experimental (obtenção do fator de calibração para o dosímetro Fricke)..... 47
4.3	Irradiação no “arranjo experimental” no irradiador Gammacell..... 49
4.3.1	Determinação da dose de trânsito 50
4.3.2	Irradiação do dosímetro Fricke no “arranjo experimental” 51
4.4	Calibração do dosímetro de Dicromato de Prata 53
4.5	Calibração do dosímetro de Dicromato de Potássio 53
4.6	Calibração do dosímetro de Dicromato de Prata em instalação de grande porte 53

	Pág.
4.6.1 Estabilidade do espectrofotômetro	53
4.6.2 Construção de curvas de calibração ABS X Dose	54
4.6.3 Procedimentos de calibração e manutenção do sistema.	54
4.6.4 Comparação com dosímetros de PMMA.....	56
4.7 Calibração do dosímetro Fricke no CDTN	56
4.8 Calibração de pontos de irradiação em fantoma de água no irradiador multipropósito do CDTN.....	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 Estabilidade do espectrofotômetro	58
5.2 Calibração do dosímetro Fricke	61
5.2.1 Calibração nas três (3) posições de irradiação	62
5.2.2 Irradiação do dosímetro Fricke no arranjo experimental calibrado (obtenção do fator de calibração para o dosímetro Fricke)	64
5.3 Calibração de pontos no arranjo experimental no irradiador Gammacell	67
5.3.1 Determinação da dose de trânsito	67
5.3.2 Calibração no arranjo experimental com dosímetro Fricke ...	67
5.4 Calibração do dosímetro de Dicromato de Prata	68
5.5 Calibração do dosímetro de Dicromato de Potássio	71
5.6 Calibração do dosímetro de Dicromato de Prata em instalação de grande porte	74
5.6.1 Avaliação da resposta do espectrofotômetro do operador	74
5.6.2 Curva da calibração do dosímetro de dicromato de potássio com o espectrofotômetro do operador	75
5.6.3 Comparação com dosímetros de PMMA	77
5.7 Calibração do dosímetro Fricke no CDTN.....	78
5.7.1 Avaliação da resposta do espectrofotômetro	78

	Pág.
5.7.2 Irradiação do dosímetro Fricke no “Gammacell” calibrado (fator de calibração para o dosímetro Fricke no CDTN)	79
5.7.3 Calibração de pontos de irradiação em fantoma de água no irradiador multipropósito	81
5.7.3.1 Determinação da dose de trânsito	82
5.7.3.2 Calibração e determinação de incertezas no fantoma	82
 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	 84
 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 86
 APÊNDICE 1 Mensagem do BIPM 2005	 90
APÊNDICE 2 Grandezas Radiológicas	97
APÊNDICE 3 Certificado de calibração da câmara de ionização do LNMRI no BIPM	102
APÊNDICE 4 Terminologia utilizada	105

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Localização de irradiadores em operação no país	3
Figura 2.1	Fluxograma de Rastreabilidade para laboratório padrão de altas doses	13
Figura 3.1	Irradiador industrial do tipo “Tote-box”.....	15
Figura 3.2	Irradiador de pesquisa típico.....	17
Figura 3.3	Distribuição de dose típica em um irradiador de pesquisa..	18
Fig. 3.4	Coefficiente de atenuação total linear para água como função da energia do fóton.....	20
Figura 3.5	Dose absorvida como função da espessura relativa.....	23
Figura 3.6	Espectro de dicromato de potássio em UV/VIS.....	34
Figura 3.7	Dependência da temperatura de irradiação para os principais dosímetros.....	37
Fig. 3.8	–Fluxograma de Rastreabilidade para laboratório nacional padrão de altas doses.....	38
Figura 4.1	Espectrofotômetro Camspec modelo 330	44
Figura 4.2	Vista frontal “arranjo experimental” de irradiação no LNMRI	45
Figura 4.3	Vista lateral “arranjo experimental” de irradiação no LNMRI	45
Figura 4.4	Detalhes do “arranjo experimental” para calibração do dosímetro Fricke.....	46
Figura 4.5	Vista superior do fantoma com 3 posições de irradiação ...	46
Figura 4.6	Dosímetro em ampola de vidro (borossilicato) selada a fogo	48
Figura 4.7	“Arranjo experimental” de irradiação no “Gammacell” (pontos de irradiação)	50
Figura 4.8	Suporte para fixação do “arranjo experimental” de irradiação no “Gammacell”	51
Figura 4.9	Arranjo final do “arranjo experimental” de irradiação no “Gammacell”	52
Figura 4.9	Fantoma de água para calibração de ponto de irradiação...	57
Figura 4.10	Posicionamento de fantoma de água no irradiador do CDTN.....	57
Figura 5.1	Resultados da inclinação de curvas ajustadas de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 313 nm com medições no Espectrofotômetro Camspec modelo 330	60

		Pág.
Figura 5.2	Resultados da inclinação de curvas ajustadas de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 350 nm com medições no Espectrofotômetro Camspec modelo 330	60
Figura 5.3	Fator de calibração para o dosímetro Fricke	64
Figura 5.4	Curva de resposta do dosímetro Fricke em 304 nm por espectrofotometria	65
Figura 5.5	Curva de resposta do dosímetro de Dicromato de Prata no Ponto I do Gammacell	69
Figura 5.6	Fator de calibração para dosímetro de Dicromato de Prata	70
Figura 5.7	Curva de resposta do dosímetro de Dicromato de Potássio	72
Figura 5.8	Fator de calibração para o dosímetro de dicromato de Potássio	73
Figura 5.9	Fator de calibração para o dosímetro de dicromato de Prata no operador	75
Figura 5.10	Curva de resposta para o dosímetro de dicromato de Prata no operador	76
Figura 5.11	Fator de calibração para o dosímetro de Fricke no CDTN ..	80

ÍNDICE DE TABELAS

		Pág.
Tabela 1.1	Faixas de dose para várias aplicações com radiações ionizantes	2
Tabela 2.1	Características de alguns dosímetros em fase líquida	10
Tabela 2.2	Características de alguns dosímetros sólidos	11
Tabela 2.3	Qualidade metrológica de alguns dosímetros	12
Tabela 3.1	Comparativo de irradiadores industriais típicos	16
Tabela 3.2	Grandezas relacionadas com o campo de radiação (apêndice 2)	97
Tabela 3.3	Grandezas relacionadas com a interação da radiação com a matéria (apêndice 2)	98
Tabela 3.4	Grandezas dosimétricas (apêndice 2)	100
Tabela 4.1	Soluções padrão de dicromato de potássio em H_3PO_4 10^{-3} Molar para calibração de espectrofotômetros	43
Tabela 5.1	Resultados medições de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 313 nm	58
Tabela 5.2	Resultados medições de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 350 nm	59
Tabela 5.3	Condições de irradiação na calibração com a câmara de grafite do LNMRI	62
Tabela 5.4	Medições na posição direita no fantoma de “mix-D” no arranjo experimental do LNMRI	62
Tabela 5.5	Medições na posição centro no fantoma de “mix-D” no arranjo experimental do LNMRI.....	63
Tabela 5.6	Medições na posição esquerda fantoma de “mix-D” no arranjo experimental do LNMRI.....	63
Tabela 5.7	Resultados das medições com dosímetro Fricke	65
Tabela 5.8	Incerteza estimada para a calibração do dosímetro Fricke .	66
Tabela 5.9	Resultados da calibração no Gammacell	68
Tabela 5.10	Resultados determinação do fator de calibração para o dosímetro de Dicromato de Prata	69
Tabela 5.11	Incerteza estimada para a calibração do dosímetro de Dicromato de Prata	71
Tabela 5.12	Resultados das medições com o dosímetro de Dicromato de Potássio	72

		Pág.
Tabela 5.13	Incerteza estimada para a calibração do dosímetro de Dicromato de Potássio	74
Tabela 5.14	Resultado medição de soluções padrão de K ₂ Cr ₂ O ₇ em 350 nm no espectrofotômetro da instalação (Embrarad)	75
Tabela 5.15	Incerteza estimada para o dosímetro de Dicromato de Prata calibrado na planta de irradiação	77
Tabela 5.16	Comparação dosímetro de dicromato de prata e PMMA	78
Tabela 5.17	Resultados das medições de soluções padrão de K ₂ Cr ₂ O ₇ em 313 nm e 350 nm no espectrofotômetro do CDTN	79
Tabela 5.18	Resultados da calibração do dosímetro Fricke no CDTN.....	79
Tabela 5.19	Incerteza estimada para a calibração do dosímetro Fricke no CDTN	81
Tabela 5.20	Calibração e avaliação de incertezas do PONTO 01 do fantoma no irradiador do CDTN	82
Tabela 5.21	Calibração e avaliação de incertezas do PONTO 02 do fantoma no irradiador do CDTN	83

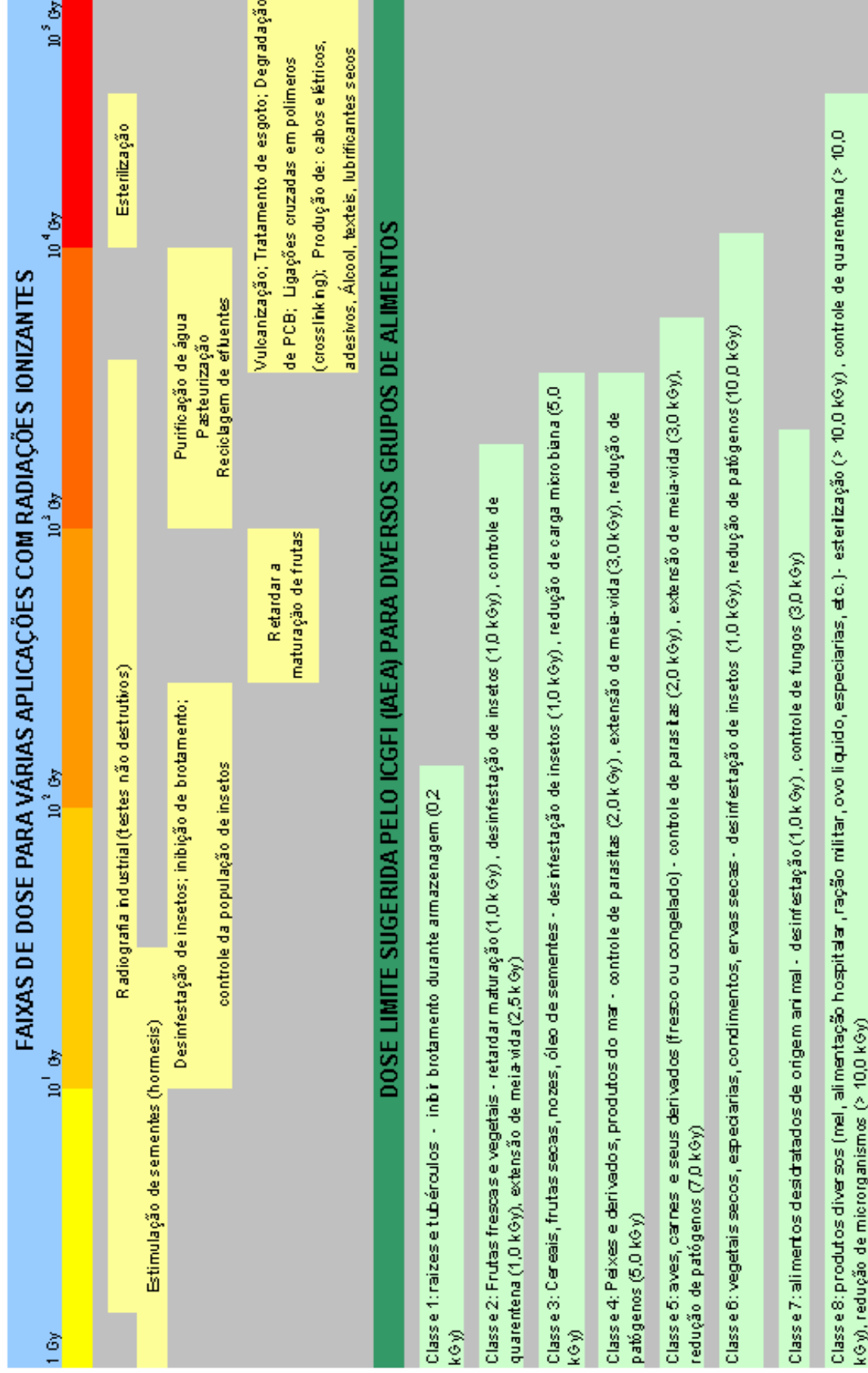
CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

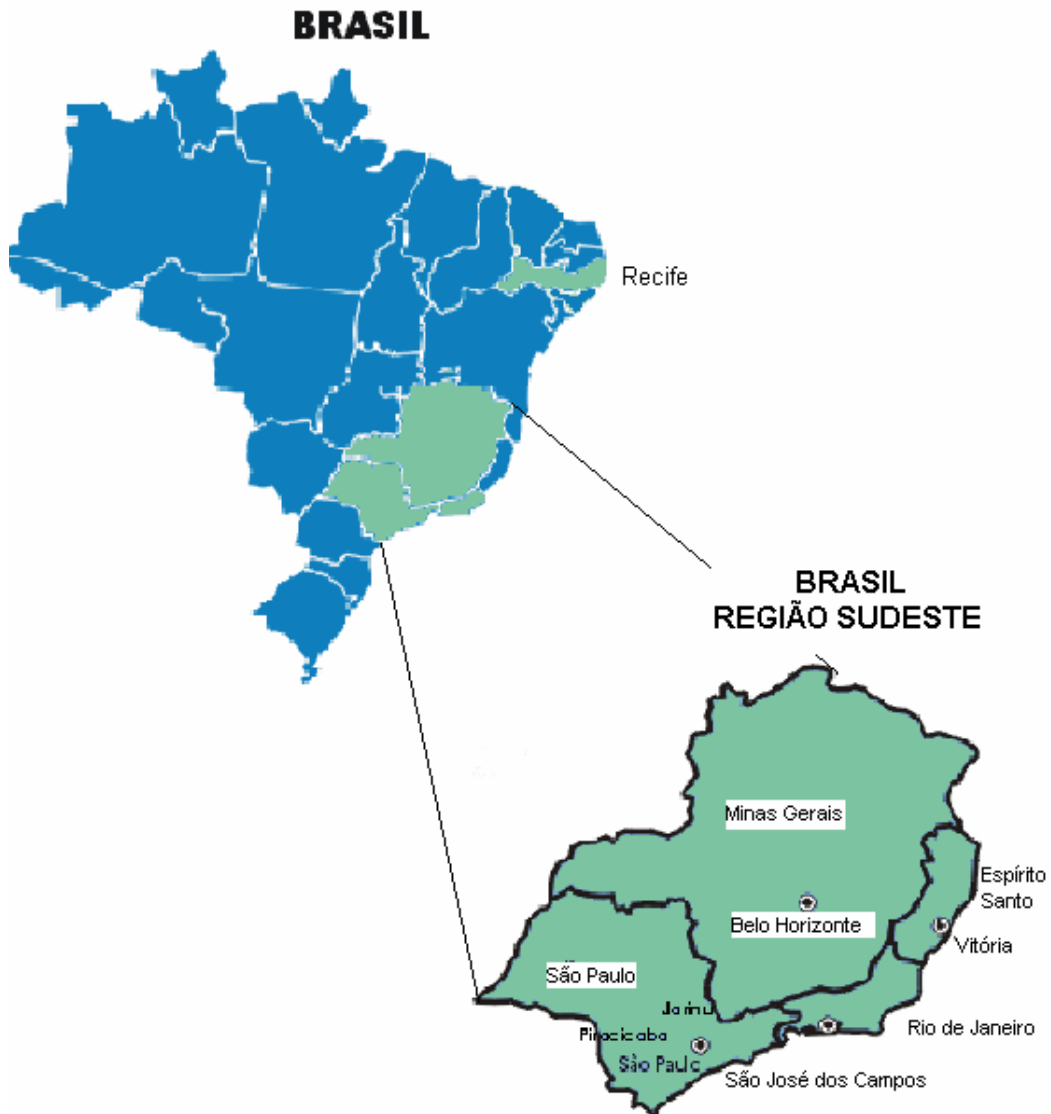
A indústria de processamento de produtos por radiações ionizantes é relativamente recente, com cerca de 50 anos, pois ela cresceu após o aparecimento dos reatores nucleares, e conseqüentemente da produção de radioisótopos. Os irradiadores de grande porte são utilizados para processamento de uma variedade de produtos e com objetivos específicos. Dentre as muitas utilizações desta técnica nuclear, pode-se citar algumas: esterilização de materiais médico-hospitalar, esterilização de fármacos, tratamento em cosméticos, eliminação de patógenos em especiarias, aumento da meia-vida de alimentos perecíveis, retardo na maturação de frutas, desinfestação de grãos e frutas cítricas, inibição de brotamento em cebola e batata, purificação de água, tratamento de esgoto, tratamento de lixo industrial, degradação de polímeros, vulcanização, modificação de materiais semicondutores, etc., cujas faixas de dose são apresentadas na tabela 1.

Em muitos países, o uso desta tecnologia teve início a partir da iniciativa de governos através de centros de pesquisa e desenvolvimento, o que acabou por incentivar a atividade. No Brasil, houve um início tímido na implantação desta tecnologia nos anos 70 e 80 através de unidades de pequeno porte como o CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Piracicaba – SP) e CNEN-RJ, mas não houve continuidade por parte do governo em investimentos maiores. A partir dos anos 80 a atividade passou a ser focada em termos comerciais com a implantação da empresa Embrarad (Empresa Brasileira de Radiações – localizada em São Paulo), e depois com a IBRAS-CBO (Indústrias Cirúrgicas e Ópticas S.A. - localizada em Campinas), a unidade de esterilização da Johnson & Johnson (localizada em São José dos Campos), e mais recentemente através da Techion (localizada em Manaus), da Surebean (localizada no Rio de

Tabela 1.1 - Faixas de dose para várias aplicações com radiações ionizantes



Janeiro) e da unidade da CBE (localizada em Jarinu-SP), como podem ser observadas no mapa de localização da figura 1.1.



Localização	Entidade	Tipo de irradiador
Piracicaba - SP	CENA – Centro de Energia Nuclear na Agricultura	Pesquisa
São Paulo	EMBRARAD - Empresa Brasileira de Radiações Ltda.	Industrial
Jarinú - SP	CBE - Companhia Brasileira de Esterilização	Industrial
São J. Campos - SP	Johnson & Johnson produtos profissionais Ltda	Industrial
São Paulo	IPEN – Instituto de Pesquisas da USP – CNEN-SP	Semi-industrial - Pesquisa
Belo Horizonte	UFMG - CDTN - CNEN	Semi-industrial - Pesquisa
Rio de Janeiro	UFRJ – LIN (Laboratório de Instrumentação Nuclear)	Pesquisa
Recife	UFPE – Universidade Federal de Pernambuco	Pesquisa

Figura 1.1 – Localização de irradiadores em operação no país

Em todos estes anos, muitas tentativas de se implementar um laboratório de altas doses foram frustradas, e até os dias atuais não há no país rastreabilidade para a grandeza Dose Absorvida (altas doses). A pequena demanda e a legislação atual não permitiram ao LNMRI (Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações ionizantes), órgão governamental responsável, no sentido de monitorar a grandeza “Dose Absorvida” como controle de qualidade do processamento de produtos por radiações ionizantes, disponibilizar este tipo de serviço aos irradiadores de grande porte. A grande preocupação do governo foi trabalhar no registro das instalações (licenciamento) e nos programas de proteção radiológica.

Desta forma, o monitoramento da dose absorvida em produtos no processamento por radiação ionizante, sempre foi realizado com a utilização de sistemas importados (red perspex, alanina, sulfato cérico, etc), com rastreabilidade (certificado de calibração) aos respectivos laboratórios estrangeiros. Uma planta de irradiação utiliza em média 1.000 a 1.200 dosímetros de rotina mensalmente para controle de qualidade no processamento de produtos, sem contar com os testes de validação. Convém destacar que durante alguns anos a IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica - IAEA) através do programa IDAS (Internacional Dose Assurance Service - iniciado por Nam, J.W. e Regula, D.F.), disponibilizou um serviço de comparação de medições de dose absorvida diretamente aos irradiadores de grande porte, serviço hoje condicionado ao pedido formal à IAEA através de seus Estados Membros.

Nos diversos países que mantêm laboratórios nacionais de referência para a metrologia das radiações ionizantes, como os laboratórios National Institute of Standard and Technology (NIST - USA) e National Physical Laboratory (NPL - UK), são utilizados programas de rastreabilidade dos dosímetros de rotina utilizados em instalações de grande porte (irradiadores industriais).

A montagem de um laboratório padrão para altas doses (Dose absorvida na faixa de processamento de materiais diversos, situa-se entre 0,1 e 50 kGy), pode envolver a implementação de metodologias e uso de diversos dosímetros com qualidade metrológica para cada faixa de dose. Certamente cada LNM (Laboratório Nacional de Metrologia) deve compor o seu grupo de dosímetros observando as qualidades metrológicas e os respectivos custos de montagem do laboratório em função da metodologia de análise e do custo de produção do dosímetro, baseados nos seus orçamentos e políticas para a área em questão.

Em todos os procedimentos e manuais que envolvem processamento por irradiação, as atividades têm como objetivo principal os “processos de Validação” e “Controle de Processo”. O principal objetivo destes procedimentos formalizados é estabelecer documentação que evidencie que os processos de irradiação alcançaram os objetivos pretendidos. A elemento chave desta atividade, é inegavelmente um sistema dosimétrico confiável e bem caracterizado, rastreado ao Laboratório Nacional e Internacional de Dosimetria. Somente a dosimetria pode ajudar a estabelecer parâmetros que evidenciem o sucesso destes processamentos por irradiação. Além disto, os processamentos por irradiação industrial tais como esterilização de material médico descartável, irradiação de alimentos e de fitoterápicos, são todos muitos bem regulamentados em relação aos limites de doses exigidos. Desta forma, diz-se que a dosimetria é indispensável e necessária nestes processos.

A mensagem encaminhada pelo Dr. André Wallard (Apêndice 1), diretor do BIPM (“Bureau” Internacional de Pesos e Medidas) aos Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) em maio de 2005, apresenta uma visão bem clara da evolução e da necessidade da manutenção dos Laboratórios Nacionais de Metrologia e da importância da rede metrológica internacional coordenada pelo BIPM, para a manutenção das grandezas aplicáveis a todas as áreas da sociedade.

Apesar de já haver um esforço internacional, com a implantação do Arranjo de Reconhecimento Mútuo (MRA – “Mutual Recognition Arrangement”) do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) em 1999, que já representa um avanço na internacionalização da metrologia, os respectivos membros devem reforçar a necessidade de se manter as respectivas grandezas em seus Estados membros através de seus Laboratórios Nacionais de Metrologia.

1.1 – OBJETIVOS

Este trabalho vem de encontro às necessidades do país em implementar e manter um laboratório padrão para as medições de dose absorvida “altas doses” e desta forma garantir aos prestadores de serviço de irradiação industrial a qualidade e rastreabilidade nos dosímetros utilizados e exigidos pelos usuários detentores de certificados das normas “ISO”, bem como garantir a qualidade da pesquisa numa área de grande importância para a sociedade.

1.2 – FINALIDADES

1. Selecionar, calibrar e demonstrar a qualidade metrológica para grupo de dosímetros para medições de altas doses;
2. Sugerir implementação de um setor no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) para medições de altas doses para manter e disseminar a grandeza “Dose absorvida” (Altas Doses) no país e garantir sua rastreabilidade metrológica;
3. Disponibilizar o serviço de calibração de dosímetros de rotina para utilização em irradiadores de grande porte;

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A escolha de sistemas dosimétricos para fins metrológicos, é baseada em características que compreendem: nível de precisão, custo de implementação dos equipamentos necessários, custo operacional, custo de produção do dosímetro, dependência do dosímetro a fatores ambientais, entre outros. O laboratório NIST (National Institute of Standard and Technology – USA), por exemplo, já utilizou os dosímetro Fricke e Dicromato de potássio como dosímetros de referência para dosimetria de altas doses, mas hoje em dia, segundo o Dr. Bert Coursey (ex-diretor do IRD-“Ionizing Radiation Division” - NIST - USA) a escolha pelo dosímetro de alanina foi no sentido de poder utilizar somente um sistema para medições de dose absorvida em radioterapia e dosimetria de altas doses, o que simplifica e reduz os custos com pessoal no seu laboratório. O laboratório inglês NPL (National Physical Laboratory - UK), utiliza o sistema de Dicromato de potássio e dosímetro de Alanina para medições de altas doses, mas mantém um programa de intercomparação para medições de dose absorvida em água para radioterapia com um fantoma “viajante” (este fantoma é enviado para os usuários que irradiam seus dosímetros e os dosímetros do laboratório nacional, neste caso do NPL) e dosímetros Fricke e Alanina. Pensou-se até num sistema como este do NPL para ser aplicado no Brasil (LNMRI-IRD-CNEN) há alguns anos atrás, mas devido à baixa atividade das fontes de radioterapia na época (década de 90), ele foi abandonado.

De fato, há vários sistemas que podem ser utilizados para medições de altas doses, e destes, pode-se dizer que a metodologia com alanina é a mais utilizada nos principais laboratórios no mundo. A opção pelo dosímetro de alanina é principalmente devido à sua grande faixa de resposta de dose absorvida (de 1 Gy a 100 kGy), e também pela redução de incertezas de operador devido a sua quase total automação, coisa que

nos dosímetros de fase líquida pode ser uma fonte significativa de incerteza.

2.1 - Sistemas Dosimétricos

2.1.1 – Dosímetros em fase líquida

A maioria dos sistemas dosimétricos em fase líquida para aplicação em altas doses é de soluções de reagentes inorgânicos mantidos em pH baixo através de ácidos minerais, como é o caso do dosímetro Fricke com ácido sulfúrico e do dosímetro de dicromato de potássio com ácido perclórico. Os dosímetros químicos em meio aquoso são baseados nas reações de solutos com espécies formadas na radiólise da água, sendo que a dose absorvida é derivada da mudança de concentração do soluto ou de algum produto da reação, mudanças estas proporcionais à dose absorvida. Os dosímetros em fase orgânica, normalmente são mantidos em meio neutro ou levemente ácido ou levemente básico através da utilização de ácidos ou bases fracos. Os mecanismos das reações destes sistemas seja mineral ou orgânico são facilmente encontrados na literatura. Trabalhos como o de Draganic [The Radiation Chemistry of Water, 1971], entre outros são referências na cinética e as reações induzidas por radiações em soluções aquosas e sistemas orgânicos.

Quando uma partícula ionizante, isto é, elétrons de alta energia passam através de um meio líquido, seja ele água, solvente orgânico ou soluções contendo estes solventes, ocorrerão ionizações e excitações em nível atômico e molecular ao longo da trajetória da partícula e também eventos radiais devido aos elétrons secundários. Estes processos são altamente heterogêneos ao longo da trilha de cada partícula, envolvendo uma série de produtos quimicamente ativos, tais como elétrons hidratados e solvatados, íons, radicais livres e íons radicais, e se tornam meios relativamente mais homogêneos quando se irradia com taxas de doses

elevadas tanto para fótons como para elétrons, devido ao grande número de interações. Em uma ampola dosimétrica típica de aproximadamente 4-5 ml de solução, mesmo com esta não homogeneidade, as espécies transitórias intermediárias reativas e seus produtos finais, normalmente íons, são produzidos em altas concentrações, sendo fácil e rapidamente mensuráveis. Para o dosímetro Fricke, por exemplo, na sua faixa de dose de trabalho de 40 a 400 Gy, as mudanças químicas significam algo da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} molar, ou seja, o número de reações para um volume médio de 4.0 ml de solução em uma ampola (típico dosímetro em ampola de vidro), é da ordem de 10^{15} a 10^{16} reações. Cada espécie radiolítica se comporta de acordo com as características do meio, e desta forma pode haver reações que variam de 10^{-13} s em alguns sistemas inorgânicos, até segundos ou horas para alguns sistemas que envolvem reações bioquímicas. Qualquer sistema em que tenham sido identificadas mudanças que possam permitir medições, podem potencialmente atuar como dosímetros. No entanto, deve-se considerar que estas mudanças devam ser reproduzidas com precisão e exatidão, pois esta proporcionalidade entre as mudanças produzidas e a quantidade de radiação absorvida é que define o potencial de cada sistema químico, de acordo com a equação 2.1.



R = radiação induzida

I = representa os radicais induzidos por radiação

P = representa as espécies modificadas

Cada sistema apresenta características próprias, e as mudanças provocadas por radiação, conhecida como rendimento químico promovido pela radiação, $G(P)$, deve ser reprodutível e preciso, suficiente para ser utilizado como dosímetro padrão, observando que o limite de incerteza para dosimetria padrão de altas doses não deve exceder os 5% com $k=2$.

Em geral, os dosímetros líquidos são mantidos em pequenas ampolas de vidro de 2 a 5 ml e colocados no campo de irradiação. Posteriormente, como a maioria dos dosímetros utiliza a espectrofotometria UV/VIS como método analítico, ou são também analisadas por titulação, por oscilometria, entre outros métodos. As soluções irradiadas são transferidas para cubetas de 1 ou 3 cm de caminho ótico, e são analisadas conforme mostra a tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características de alguns dosímetros em fase líquida

Dosímetro	Método de análise	Faixa de dose absorvida recomendada (kGy)	Taxa de dose absorvida recomendada (Gy.s ⁻¹)	Dependência da temp. de irradiação (°C ⁻¹)	Nível de precisão nominal
Fricke (Sulfato Ferroso)	Espectrofotometria UV	4.10 ⁻² - 4.10 ⁻¹	< 10 ⁶	+ 0,16 %	2 - 3 %
Sulfato Ferroso Oxigenado	Espectrofotometria UV	4.10 ⁻² - 2	< 10 ⁷	+ 0,16 %	2 - 3 %
Super Fricke (Sulfato de Ferro e Cobre)	Espectrofotometria UV	5.10 ⁻¹ - 5	< 10 ⁶	+ 0,20 %	2 - 3 %
Sulfato Cerico-Ceroso	Espectrofotometria UV ou Eletroquímico	1 - 10 ³	Depende [Ce ⁺³]		3 - 5 %
Dicromato de Potássio	Espectrofotometria UV	5 - 5.10 ¹	0,70 - 500	- 0,20 %	3 - 5 %
Dicromato de Prata	Espectrofotometria UV	1 - 10 ¹		- 0,20 %	3 - 5 %
Ácido Oxálico	Titulação Potenciométrica	5 - 10 ³	1.0 - 10 ⁸	- 0,07 %	≈ 5%
Clorobenzeno	Oscilometria	1 - 10 ²	Vários		≈ 5%

Ref.: [Maclaughlin et al – 1989], [Technical Report Series, TR409 – 2002]

2.1.2 – Dosímetros sólidos

A maioria dos sistemas dosimétricos sólidos não apresenta características metroológicas que os qualificam para serem utilizados como dosímetros de referência, sendo o nível de precisão uma das características mais importantes, como pode ser observado na tabela 2.2. Estes dosímetros são em sua maioria polímeros orgânicos, redes cristalinas inorgânicas ou materiais amorfos ou semi-cristalinos. Mas devido ao fato de serem produzidos em grande escala, são muito utilizados em medições de rotina por instalações de grande porte. O Polimetilmetacrilato (PMMA) é o dosímetro sólido mais utilizado para

este propósito pelo fato de utilizarem a espectrofotometria UV/VIS como método de análise, o que reduz significativamente o investimento em equipamentos.

Tabela 2.2 – Características de alguns dosímetros sólidos

Dosímetro	Método de análise	Faixa de dose absorvida recomendada (kGy)	Taxa de dose absorvida recomendada (Gy.s ⁻¹)	Dependência da Temp. de Irradiação (°C ⁻¹)	Nível de Precisão Nominal
Amino ácidos	EPR	10 ⁻³ - 10 ²	< 10 ⁸	+0.20 - 0.30%	3 - 5%
Amino ácidos	Lioluminescência	1 - 10 ³	< 10 ³	+ 0.35 %	≈ 5%
Fluoreto de Lítio (LiF)	TLD	10 ⁻⁷ - 1.0	< 10		≈ 5%
Fluoreto de Lítio (LiF)	Espectrofotometria	1 - 10 ³	< 10 ¹⁰		≈ 5%
Polimetilmetacrilato (PMMA)	Espectrofotometria UV	1 - 10 ²	< 10 ⁶		≈ 5%
Polimetilmetacrilato (PMMA)	Espectrofotometria VIS	1 - 5.10 ¹	< 10 ⁵		≈ 5%

Ref.: [Maclaughlin et al – 1989], [Technical Report Series, TR409 – 2002]

2.1.3 – Seleção de sistemas dosimétricos

A escolha do sistema está obviamente ligada a disponibilidade financeira para o investimento no sistema que se quer implantar. No caso do laboratório do Brasil em questão, a indisponibilidade de recursos leva a opção pelos sistemas Fricke, Dicromato de potássio e Dicromato de prata, todos avaliados por espectrofotometria ultravioleta e visível (UV/VIS), que são sistemas de baixíssimo custo, além da qualidade metrológica destes sistemas, que podem ser verificados na tabela 2.3. Sistemas baseados na espectrofotometria ultravioleta e visível (UV/VIS), apresentam grande vantagem em relação aos outros sistemas, na maioria das características exigidas para fins metrológicos.

Tabela 2.3 – Qualidade metrológica de alguns dosímetros

CLASSE DO DOSÍMETRO	NECESSIDADE DE CALIBRAÇÃO?	INCERTEZA (K=1)	EXEMPLOS DE DOSÍMETROS
PRIMÁRIO	Não	1%	CALORÍMETRO, CÂMARA DE IONIZAÇÃO
REFERÊNCIA	Sim	2-3 %	CALORÍMETRO, ALANINA, DICROMATO, SULFATO CÉRICO, FRICKE
TRANSFERÊNCIA	Sim	3-5 %	ALANINA, DICROMATO, SULFATO CÉRICO, FRICKE
ROTINA	Sim	5%	PMMA, FILME RADIOCRÔMICO, CLOROBENZENO, FILME DE CELULOSE

Ref.: [Technical Report Series, TR409 – 2002]

2.1.4 – Rastreabilidade de uma medição

Deve existir no país um sistema de calibração para se garantir as medições relacionadas ao “Padrão Nacional” sem que seja quebrada a cadeia metrológica. Esta cadeia é conhecida como cadeia de rastreabilidade. A rastreabilidade pode ser definida como a propriedade para se demonstrar por meio de comparações que as medições estão de acordo com os limites aceitáveis de incertezas quando comparadas com o padrão nacional ou internacional reconhecidos. É essencial que todas as medições sejam rastreadas ao padrão nacional, ou seja, todos os aspectos do sistema de dosimetria devem ser rastreados. Desta forma, o sistema dosimétrico deve ser calibrado contra um padrão fornecido pelo laboratório padrão nacional. Esta condição de trabalho deve ser realizada com regularidade. O fluxograma na figura 2.1 demonstra como pode ser estruturado um laboratório padrão para altas doses segundo McLaughlin et al, [1989].

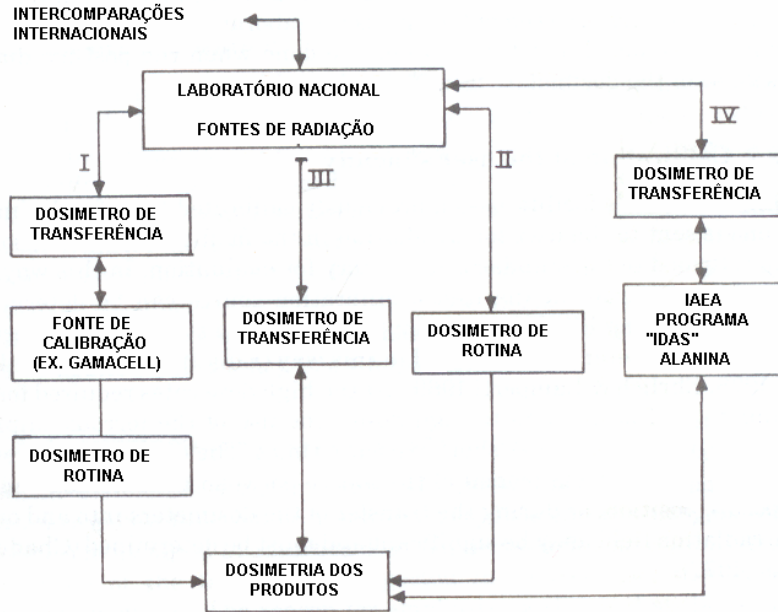


Fig. 2.1 – Fluxograma de rastreabilidade para laboratório padrão de altas doses

No caminho I, os dosímetros de transferência são calibrados no Laboratório Nacional e são liberados para as plantas de processamento para intercalibração com os dosímetros de rotina. No caminho II, os dosímetros de transferência são utilizados para medições de dose absorvida diretamente na planta de processamento, e posteriormente avaliados pelo Laboratório Nacional. No caminho III, os lotes de dosímetros de rotina são calibrados no Laboratório nacional e utilizados na planta de processamento. No caminho IV, quando é permitido pela autoridade nacional, os dosímetros de rotina são intercomparados com o dosímetro de alanina do programa IDAS (International Dose Assurance Service) da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DA DOSIMETRIA

3.1 - Fontes de radiação típicas para processamento de produtos e pesquisa.

Há uma grande variedade de irradiadores com fontes radioativas para processamento de produtos, sendo que as três mais utilizadas são:

- a) Irradiadores com fontes de radiação gama de ^{60}Co e ^{137}Cs ;
- b) Aceleradores de elétrons com energia até 10 MeV;
- c) Equipamentos industriais de raios-X que geram elétrons até 5 MeV.

A escolha de cada tipo de fonte deve ser selecionada de acordo com o tipo de produto que se quer processar. Na irradiação de alguns produtos o importante é atingir a dose mínima e em outros o objetivo é garantir também a homogeneidade da dose. Nos irradiadores industriais, o objetivo principal é o processamento de produtos em larga escala, e neste caso a seleção do tipo de fonte é fundamental para a garantia de bons resultados financeiros.

Nos irradiadores com fontes de radiação gama, a escolha de ^{60}Co e ^{137}Cs entre milhares de outros radionuclídeos tem razões econômicas, técnicas e de segurança. Por questões econômicas por serem produzidos em grande escala, por questões técnicas por terem meia-vida elevada ($T_{1/2}$ do ^{60}Co = 5,27 anos e $T_{1/2}$ do ^{137}Cs = 30,5 anos) e emitirem raios gama de alta energia (^{60}Co emite fótons de 1,17 e 1,33 MeV e ^{137}Cs emite fótons de 0,662 MeV), e por questão de segurança por decaírem para isótopos estáveis.

Os aceleradores de elétrons são mais utilizados para processamento de produtos que exigem doses elevadas, entre 10 e 200 kGy, na polimerização de polímeros, cross-linking para isolamento de cabos

elétricos e para produtos alimentícios com pequena espessura como hambúrgueres e similares.

Os equipamentos industriais de raios X que geram elétrons até 5 MeV, competem com os irradiadores com fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs .

3.1.1 - Irradiadores de grande porte

Há pelo menos uma dezena de empresas que produzem irradiadores, mas a Nordion canadense é a líder neste mercado e a empresa que detém a melhor tecnologia na produção destes equipamentos, além de dominar todo o processo, desde a produção da fonte de ^{60}Co até os equipamentos de transporte de produtos e equipamentos de segurança. Tipicamente os irradiadores industriais com blindagem em piscina de água são como o da figura 2.1, onde a diferença básica está no tipo de sistema que transporta os produtos para processamento.

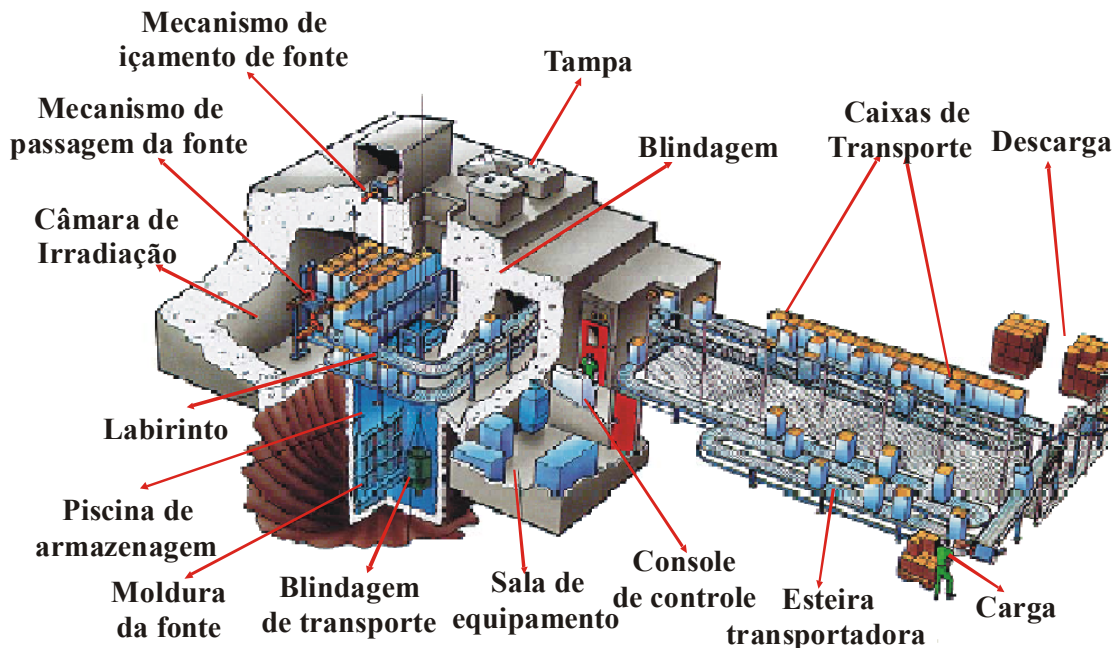


Figura 3.1 –Irradiador industrial do tipo “Tote-box”

Na tabela 3.1, pode-se observar um comparativo dos principais irradiadores industriais produzidos pela MDS Nordion, onde a diferença

dos sistemas de transporte dos produtos pode significar o dobro do custo dos equipamentos básicos, sem levar em consideração a atividade da fonte.

No irradiador do tipo “Tote-Box” a distribuição da dose é mais homogênea devido a menor espessura das caixas contendo os produtos. Este tipo de irradiador é o mais utilizado no mundo devido a sua flexibilidade no processamento de uma grande variedade de produtos. No irradiador do tipo ‘Carrier”, que utiliza carga paletizada, ou seja, o padrão de armazenagem de carga para transporte internacional, de aproximadamente 1,0 m³, o volume de processamento de produtos é maior, mas dever-se levar em consideração uma pior relação entre a dose absorvida mínima e máxima nas caixas de processamento de produtos. Em ambos os casos, a dosimetria é exigida para que se alcance os valores de dose absorvida para se atingir os objetivos do processamento.

Tabela 3.1 – Comparativo de irradiadores industriais típicos

INVESTIMENTO ESTIMADO PARA IRRADIADORES INDUSTRIAIS (US\$)			
MODELO DO IRRADIADOR	Auto Tote-Box 1,5 MCi	Carrier Médio 3,0 MCi	Carrier Grande 8,0 MCi
Projeto (desenhos arq.)	21.000	25.000	25.000
Blindagem (construção)	500.000	700.000	800.000
IRRADIADOR			
Equipamento básico padrão	615.000	987.000	1.309.000
Equipamentos opcionais	7.000	7.000	7.000
Custo de mão de obra local	23.000	30.000	36.000
Equipamento de transporte	10.000	16.000	26.000
Equipamentos de transporte de produtos	36.000	72.000	108.000
Fonte de ⁶⁰ Co	1.520.000	2.392.000	6.379.000
Aluguel container para ⁶⁰ Co	21.000	32.000	84.000
Transporte da fonte de ⁶⁰ Co	7.000	11.000	30.000
Aluguel de grua	2.000	3.000	3.000
Licenças de operação	6.000	6.000	6.000
Contingenciamento (2%)	55.000	86.000	176.000
Total	2.823.000	4.367.000	8.989.000

3.1.2 - Irradiador de pesquisa

Os irradiadores de pesquisa mais comuns são os do tipo “Gammacell” onde os produtos são levados através de uma cavidade num eixo, para um posicionamento dentro de uma blindagem. Estes equipamentos são utilizados para: calibração de dosímetros; estudos dos efeitos da radiação sobre sistemas biológicos, estudos de validação de material médico descartável; pesquisa de irradiação de alimentos; irradiação de componentes eletrônicos; pesquisa de materiais diversos; indução de mutação; controle de insetos; etc. O modelo Excel 220 da Nordion na figura 3.2 é dos mais utilizados e dispõe de acessórios para controlar a temperatura de irradiação, muito importante no desenvolvimento e calibração de dosímetros, face à grande dependência deste fator pela maioria dos sistemas dosimétricos. São de pequenas dimensões e podem ser colocados em ambientes sem a necessidade de uma blindagem adicional, mantendo apenas o controle radiológico de acordo com as normas da CNEN.



Figura 3.2 – Irradiador de pesquisa típico

A distribuição de dose na câmara de irradiação como mostra a figura 3.3 é uma das características interessantes deste tipo de irradiador, pois pode-se trabalhar com a razão entre a dose absorvida mínima e máxima muito próximo da unidade.

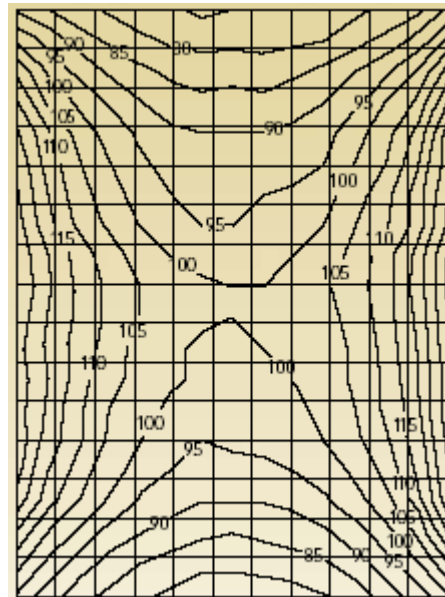


Figura 3.3 – Distribuição de dose típica em um irradiador de pesquisa

3.2 - O papel da dosimetria

Na maioria dos processos em que se usa a radiação ionizante para fins de processamento industrial, a uniformidade e a exatidão da dose absorvida nos produtos é essencial para introduzir propriedades desejadas no material. A dosimetria tem um papel importante na transferência do processo desde a fase experimental até o estágio de produção, pois a medição precisa da dose absorvida com sistemas dosimétricos confiáveis, visa garantir o sucesso no processamento dos produtos. A dosimetria é importante também em controle de qualidade de rotina, onde as informações das doses de radiação podem substituir muitos testes finais de aceitabilidade mecânica, elétrica e térmica, como no caso dos

polímeros, uma vez comprovados a eficiência do processamento. Na área de alimentos e materiais médicos descartáveis, o importante é garantir a dose mínima para o efeito desejado, sendo a dosimetria realmente importante, porque é através dela que se realizam os estudos de validação para muitos produtos (redução D_{10} , que é o parâmetro freqüentemente utilizado na esterilização de produtos médicos descartáveis em que representa a dose necessária para eliminar 90% dos microorganismos presentes inicialmente), indispensáveis para estas aplicações. As prestadoras destes serviços devem estar documentadas para que o processo seja realizado de acordo com as especificações que satisfaçam as solicitações dos clientes.

3.3 - Interações da radiação com a matéria e com os dosímetros

Quando raios X de alta energia, raios gama ou elétrons incidem sobre um determinado meio, ocorrem múltiplas interações que dão origem a partículas secundárias. Estas interações consistem quase que totalmente de ionizações produzidas pelos elétrons secundários e fótons de baixa energia. Na seqüência das interações secundárias, tem-se o chamado efeito cascata, resultado das reações subseqüentes. Na maioria das aplicações com altas doses, a água é utilizada como meio de referência, pois os produtos de interesse são em sua maioria de densidade próxima da água. Na fig. 3.4, pode-se observar o valor do coeficiente de atenuação total linear para água como função da energia do fóton, [Attix, 1966], onde se observam os valores para os três tipos de interação com o meio, sendo eles: o efeito Compton, o efeito Fotelétrico e a Formação de pares.

A principal interação é o chamado efeito Compton, que é o resultado do espalhamento inelástico de fótons incidentes pelos elétrons atômicos. Os fótons são espalhados e os elétrons secundários são ejetados dos átomos. Tanto os fótons como os elétrons secundários, saem em diferentes trajetórias tendo o fóton incidente como referência, mantendo como

característica o fato de ambos saírem com energia menor que a energia do fóton incidente. Se o fóton espalhado ainda possuir energia suficiente, ele pode produzir mais espalhamento Compton. Esta interação é predominante entre 0.05 e 10 MeV em meios de baixo número atômico, como é o caso da água.

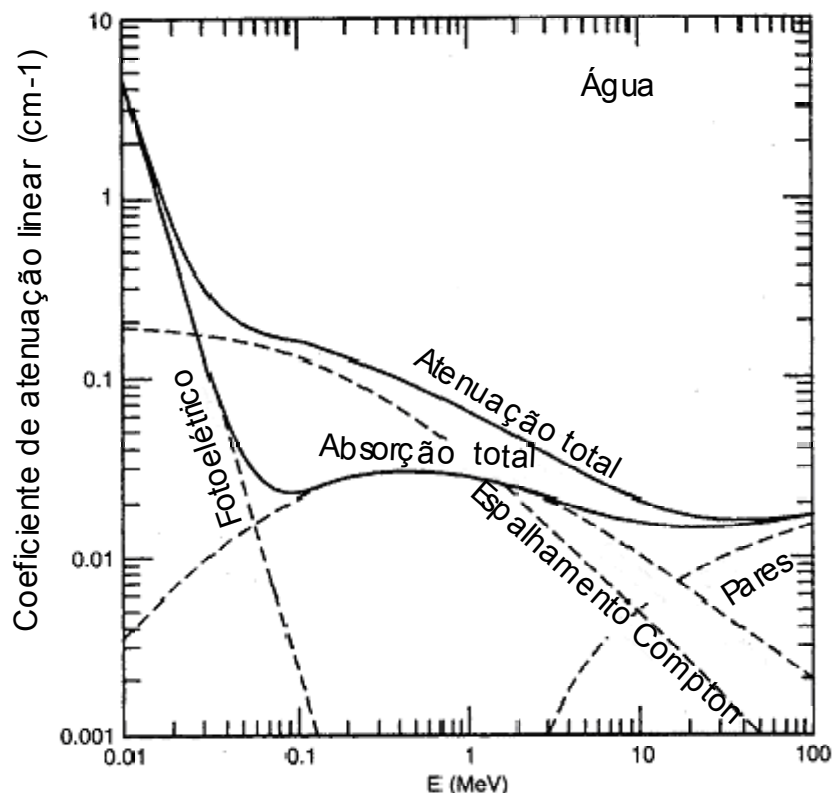


Fig. 3.4 - Coeficiente de atenuação total linear para água como função da energia do fóton

O efeito fotoelétrico caracteriza-se por fótons de baixa energia próximos da energia de ligação dos elétrons orbitais, quando sofrem absorção fotoelétrica, que resulta na emissão de fotoelétrons, ejetados da eletrosfera. A energia cinética do fotoelétron ejetado é igual à diferença entre a energia do fóton incidente e a energia de ligação do elétron. Acompanhando a ejeção do fotoelétron, é emitido um raio X característico em um efeito chamado de fluorescência. Em competição com este efeito,

está o efeito Auger (elétron Auger), que é a emissão de outro elétron orbital durante o rearranjo eletrônico do átomo. Somente em materiais de alto número atômico o efeito fotoelétrico é significativo.

Para fótons de alta energia, maior que a soma da energia de repouso da massa de elétrons e pósitrons (1,022 MeV), a produção de pares pode ocorrer. Esta quantidade mínima de energia do fóton (1,022 MeV), é convertida em massa na forma de um elétron e um pósitron, e a energia remanescente é transformada em energia cinética das duas partículas. Após a formação, os pósitrons se recombinam com elétrons, resultando em radiação de aniquilação e emissão simultânea de dois fótons de 0,511 MeV.

Se a radiação utilizada no processamento for feixe de elétrons, suas interações com o material dão origem a partículas secundárias que são principalmente elétrons de energia mais baixa. Estes elétrons secundários produzem outros elétrons ao longo de suas trajetórias até que a energia seja finalmente dissipada pela excitação molecular e processos térmicos de baixa energia. Com elétrons de alta energia, podem ser geradas radiações de freiamento (Bremsstrahlung), que consistem de fótons emitidos devido à perda de energia de elétrons rápidos ao serem desacelerados ou desviados de suas trajetórias em suas passagens através do campo eletromagnético dos átomos absorvedores. A soma da quantidade de energia perdida devido a este processo de radiação e devido a processos de colisão inelástica resultando em elétrons secundários, é definida como sendo o poder de freiamento do elétron (electron stopping power) do material irradiado para um determinado feixe de elétrons com determinada energia. Na maioria dos casos com feixes de elétrons de até 10 MeV, a energia depositada é resultado da produção de elétrons secundários e da absorção de energia devido a processos secundários.

3.4 - Determinação de Dose Absorvida

Na maioria das aplicações de altas doses de radiação, o material de interesse é a água. Quando o meio é diferente da água, correções devem ser efetuadas para se determinar a dose devido às suas propriedades específicas de absorção da radiação. As calibrações são realizadas em condições aproximadas de equilíbrio eletrônico para irradiações com feixes de raios gama (^{60}Co e ^{137}Cs), raios X e elétrons.

O equilíbrio eletrônico (equilíbrio com partículas carregadas) é descrito como sendo a condição em que a energia cinética dos elétrons (partículas carregadas), excluindo a energia de repouso, que entram num volume infinitesimal de um determinado material, é igual à energia cinética dos elétrons que saem deste mesmo material para o mesmo volume. A medição da dose absorvida, no entanto, requer um conhecimento e muita atenção no uso das grandezas pertinentes, que podem ser observadas nas tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 no apêndice 2, referentes à caracterização do campo de radiação, da interação da radiação com a matéria e da dosimetria respectivamente [Ramos, M.M.O; Tauhata, L., 2002], [Mc Laughlin et al., 1989], sendo a dose absorvida e o rendimento químico induzido por radiação as grandezas mais utilizadas em dosimetria de altas doses.

3.4.1 – Medições de dose absorvida

As medições de dose em um material específico num determinado ponto do material devem ser realizadas com dosímetros calibrados, sejam eles dosímetros de rotina, dosímetros de transferência ou até mesmo um dosímetro de referência. Na figura 3.2, pode-se observar a região de “Build-up” que corresponde ao alcance médio dos elétrons secundários das primeiras interações com o material [Technical Report series, TR409-IAEA, 2002]. A partir desta região, há a atenuação exponencial da radiação com a matéria, região esta utilizada para fazer medições de dose

absorvida para fins de calibração de dosímetros e nos processos de rotina em controle de processamento por irradiação com radiações de ^{60}Co e ^{137}Cs .

A simples colocação de um dosímetro em um meio num campo de radiação, constitui uma mudança no meio, portanto, uma descontinuidade ou uma “cavidade” no material que altera as propriedades de absorção da radiação devido às diferenças na densidade e no número atômico entre o dosímetro e o material irradiado, evidenciando que a radiação absorvida pelo dosímetro é diferente da que seria absorvida pelo meio não perturbado [Attix, F.H.; Roesch, W.C., 1966], [Burlin, 1966].

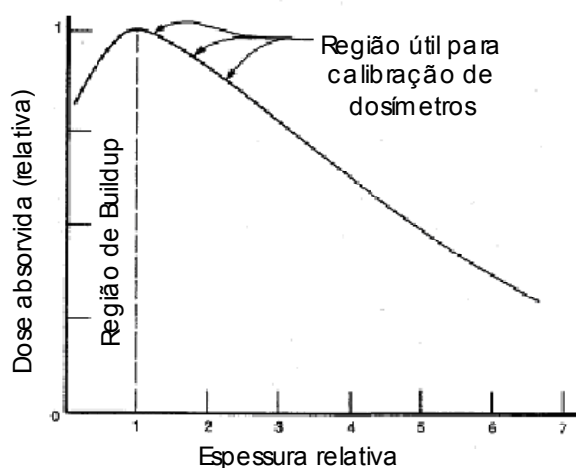


Figura 3.5 - Dose absorvida como função da espessura relativa

3.4.2 – Medições de dose absorvida em feixes de fótons

Nas medições de dose absorvida em feixes de fótons em um meio sob condições de equilíbrio eletrônico, a dose absorvida é o produto da fluência de energia do feixe de radiação no ponto e o coeficiente de absorção de energia em massa do material. Nas condições normais de irradiação seja em laboratório, em um gammacell ou em uma planta de irradiação industrial, o dosímetro constitui uma cavidade, que pode se apresentar em duas situações de acordo com o tamanho da cavidade.

Quando a cavidade é “grande” comparada com o alcance médio dos elétrons secundários, a dose absorvida na cavidade (ou no dosímetro) é devido aos elétrons secundários gerados dentro da cavidade. Neste caso, os elétrons gerados fora da cavidade são desprezíveis. A dose média absorvida, D_M , é dada pelo produto da dose na cavidade pela razão entre os coeficientes de absorção de energia em massa da cavidade e do meio [ICRU 14, 1969].

$$D_M = D_c \cdot \frac{\left(\frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_M}{\left(\frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_c} = D_c \cdot \frac{\int_0^{E_{max}} \psi(E) \left(\frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_M .dE}{\int_0^{E_{max}} \psi(E) \left(\frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_c .dE} \quad (3.1)$$

Na outra situação, a cavidade é pequena comparada com o alcance médio dos elétrons secundários, e a dose média absorvida na cavidade é devido aos elétrons secundários gerados fora da cavidade. A energia depositada pelos elétrons secundários gerados no interior da cavidade é desprezível, desde que a interação do campo com a cavidade também seja desprezível. A dose média absorvida, D_M , no meio, pode ser calculada de acordo com a equação 3.2 [ICRU 14, 1969].

$$D_M = D_c \cdot \left(\frac{S_{col}}{\rho} \right)_c^M = D_c \cdot \frac{\int_0^{E_{max}} \Phi(E) \left(\frac{S_{col}(E)}{\rho} \right)_M .dE}{\int_0^{E_{max}} \Phi(E) \left(\frac{S_{col}(E)}{\rho} \right)_c .dE} \quad (3.2)$$

Quando o dosímetro e o material envolvente são de composição similar, a equação 3.2 pode ser simplificada.

$$D_M = D_c \cdot S_c^M = D_c \cdot \frac{\left(\frac{S_{col}(\bar{E})}{\rho} \right)_M .dE}{\left(\frac{S_{col}(\bar{E})}{\rho} \right)_c .dE} \quad (3.3)$$

Quando a dimensão da cavidade é do mesmo tamanho do alcance dos elétrons secundários de maior energia, o efeito da interface entre o meio e a cavidade pode não ser totalmente desprezível, bastando para isso que a energia do fóton e a fluência dos elétrons secundários contribuam para a dose absorvida na cavidade do material, ou seja, no caso o dosímetro. A teoria geral da cavidade desenvolvida por Burlin assume que a atenuação do fóton é a mesma no material e na cavidade.

$$D_M = \frac{1}{f} \cdot D_C = \left[d \cdot \left(\frac{S}{\rho} \right)_M^C + (1-d) \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_M^C \right]^{-1} \cdot D_C \quad (3.4)$$

Onde:

d = fração da energia depositada na cavidade pelos elétrons liberados pelo meio envolvente

f = fluência de elétrons secundários no meio envolvente da cavidade

Esta teoria se aplica ao dosímetro que é envolvido por outro meio material. No caso dos dosímetros líquidos, a solução é contida em ampola de vidro, sendo que o efeito da parede pode ser desprezível se ela for uma parede fina muito menor que o alcance médio dos elétrons secundários. Caso a parede de vidro seja muito espessa, as doses na parede e no dosímetro (meio líquido) devem ser determinadas separadamente.

3.4.3 – Medições de dose absorvida em campos de elétrons

Quando o dosímetro é maior que o alcance dos elétrons, a teoria da cavidade não se aplica, pois eles são totalmente absorvidos. Quando o dosímetro é pequeno e estabelece uma condição de cavidade, e a fluência de elétrons no meio com e sem o dosímetro permanece a mesma, a dose no meio pode ser determinada através da equação 3.3.

Segundo McLaughlin [1989], mesmo que muitos pesquisadores tenham se esforçado para modificar a teoria para condições específicas, o melhor mesmo para minimizar os problemas de dosimetria para elétrons no

processamento de produtos é utilizar na direção do feixe, dosímetros com espessura que não atenuação totalmente a energia dos elétrons.

3.5 - Sistemas Dosimétricos

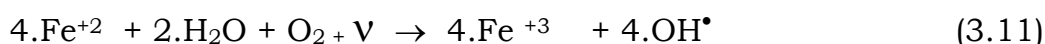
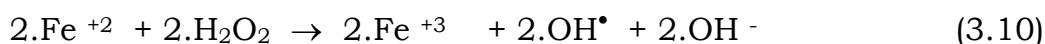
3.5.1 - O Dosímetro “Fricke”

O dosímetro “Fricke” é um sistema confiável de medição de dose absorvida, baseado na oxidação de íons de ferro (Fe^{+2}) para (Fe^{+3}), geralmente utilizado como dosímetro de referência para calibração de outros sistemas, tais como, dosímetros de transferência e dosímetros de rotina para controle de processos em instalações de grande porte. Pode ser utilizado também para medições absolutas de dose absorvida, não necessitando neste caso de rastreabilidade ao laboratório padrão nacional, uma vez que este sistema já tem muito bem estabelecido parâmetros de rendimento químico por radiação, dependência de temperatura durante a irradiação, efeitos pós-irradiação, e o seu comportamento têm sido estudados por décadas, comprovando a sua qualidade. As propriedades do dosímetro são muito próximas da água e do tecido biológico mole em termos de propriedades de absorção para fótons e elétrons, densidade e número atômico efetivo.

3.5.1.1 - Mecanismos de reação do dosímetro

Partindo-se da radiólise da água, os principais produtos segundo Ellis, S.C. [1980], são:





(reação total para o dosímetro Fricke)

Onde:

ν = radiação ionizante

3.5.1.2 - Medições de dose absorvida

A equação para medições absoluta de dose absorvida com o dosímetro Fricke é:

$$D = \frac{\Delta abs}{(\rho.G.\epsilon.d)[1+0,007.(T-25)][1+0,015.(T'-25)]} \quad (3.12)$$

Onde:

D = Dose absorvida

Δabs = Mudanças na absorbância a 304 nm entre as soluções dos dosímetros irradiados e o não irradiado

ρ = Densidade da solução dosimétrica ($1,024.10^3 \text{ kg.m}^3$)

G = Rendimento químico do íon Fe^{+3} ($1,62.10^{-6} \text{ mol.J}^{-1}$)

ϵ = Coeficiente de absorção molar a 304 nm em um espectrofotômetro específico (o valor nominal é de $216,4 \text{ m}^2.\text{mol}^{-1}$)

d = Caminho óptico da célula de medida espectrofotométrica (0,01 m)

$[1+0,007.(T-25)]$ = Correção para temperatura da solução de medição

$[1+0,0015.(T'-25)]$ = Correção para temperatura de irradiação do dosímetro

Utilizando-se os dados conhecidos acima, a equação para o dosímetro Fricke se transforma em:

$$D = 27856. \frac{\Delta abs}{[1+0,007.(T-25)][1+0,015.(T'-25)]} \quad (3.13)$$

3.5.1.3 - Características principais do dosímetro

Avaliação (medições): o dosímetro é medido pelo método de espectrofotometria com a utilização de cubetas de quartzo com caminho óptico de 10 mm, preferencialmente equipado com compartimento de controle de temperatura ou laboratório climatizado. As medições das soluções irradiadas são realizadas no comprimento de 304 nm.

Frascos de irradiação (ampolas): ampolas de vidro borossilicato ou equivalente devem ser utilizadas nas irradiações. As ampolas mais comuns são as de 2 e 5 ml com diâmetro de 11 a 15 mm. Deve-se observar que a espessura da parede da ampola deve ser de pequena para minimizar os efeitos de absorção por material de densidade muito superior a solução dosimétrica, que é próxima da água.

3.5.1.4 - Preparação da solução dosimétrica

A solução do dosímetro Fricke consiste de 10^{-3} mol.dm⁻³ de (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O) e 10^{-3} mol.dm⁻³ de (NaCl) em (H₂SO₄) $4 \cdot 10^{-1}$ mol.dm⁻³. Dissolve-se 0,392 g de sulfato ferroso amoniacal (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O) e 0,058 g de cloreto de sódio (NaCl) em 1,0 litro de ácido sulfúrico (H₂SO₄) $4 \cdot 10^{-1}$ mol.dm⁻³ (22,5 ml de solução concentrada a 96% para 1 litro de solução). A densidade da solução dosimétrica é $1,024 \cdot 10^3$ kg.m⁻³.

3.5.2 – O Dosímetro de “Dicromato de Prata”

As soluções baseadas na redução radiolítica do Cr⁺⁶ na forma de [Cr²O₇]⁻² para Cr⁺³ em soluções aquosa acidificadas têm sido estudadas por muitos anos. Há uma grande similaridade com o mecanismo do dosímetro de sulfato cérico, onde o resultado é uma redução entre as espécies

produzidas pela radiólise do solvente [Sharp et al., 1982]. O desenvolvimento do dosímetro de “Dicromato de Prata” se deu após trabalhos realizados com o dosímetro de “Dicromato de Potássio”, este com resposta em uma faixa de dose mais elevada, mas segundo Thomassen, J. [1985], a adição de íons de prata produz resultados positivos na linearidade e precisão da resposta do dosímetro sob irradiação. Esta modificação na solução dosimétrica permite trabalhar numa faixa de dose entre os medidos pelos dosímetros Fricke e Dicromato de Potássio. A solução foi a utilização do reagente dicromato de prata em meio ácido, com medições em um máximo de absorção de 350 nm por espectrofotometria. Sugerido inicialmente para ser utilizado como alternativa para medidas de rotina, o dosímetro de “Dicromato de Prata” tem apresentado características que o qualificam para ser utilizado como dosímetro de transferência [TR409 IAEA, 2002], pois as qualidades metrológicas apresentadas por este dosímetro, são superiores inclusive ao dosímetro de “Dicromato de Potássio”.

3.5.2.1 - Medições de dose absorvida

A equação para medições de dose com o dosímetro de “Dicromato de Prata” é:

$$D = \frac{\Delta abs}{(\rho \cdot G \cdot \epsilon \cdot d) [1 + 0,001 \cdot (T - 25)] [1 + 0,002 \cdot (T' - 25)]} \quad (3.14)$$

Onde:

D = Dose absorvida em Gy

Δabs = Mudanças na absorbância a 350 nm entre as soluções dos dosímetros irradiados e o não irradiado

ρ = Densidade da solução dosimétrica ($1,004 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^3$)

G = Rendimento químico do íon $[\text{Cr}_2\text{O}_7]^{-2}$ ($0,405 \cdot 10^{-6} \text{ mol.J}^{-1}$)

ϵ = Coeficiente de absorção molar a 350 nm em um espectrofotômetro específico (o valor nominal é de $3,122 \text{ m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$)

d = Caminho óptico da célula de medida espectrofotométrica (0,01 m)

$[1 + 0,001 \cdot (T - 25)]$ = Correção para temperatura da solução de medição

$[1 + 0,002 \cdot (T' - 25)]$ = Correção para temperatura de irradiação do dosímetro

3.5.2.2 - Características principais do dosímetro

Avaliação (medições): o dosímetro é medido pelo método de espectrofotometria com a utilização de cubetas de quartzo com caminho óptico de 10 mm, preferencialmente equipado com compartimento de controle de temperatura ou laboratório climatizado. As medições das soluções irradiadas são realizadas no comprimento de 350 nm, para uma faixa de dose de 1 – 12 kGy.

Frascos de irradiação (ampolas): ampolas de vidro borossilicato ou equivalente devem ser utilizadas nas irradiações. As ampolas mais comuns são as de 2 e 5 ml com diâmetro de 11 a 15 mm. Deve-se observar que a espessura da parede da ampola deve ser de pequena espessura para minimizar os efeitos de absorção por material de densidade muito superior a solução dosimétrica, que é próxima da água.

3.5.2.3 - Preparação da solução dosimétrica

A solução do dosímetro de “Dicromato de Prata” consiste de $4 \cdot 10^{-4}$ mol.dm⁻³ de Ag₂(Cr₂O₇), (P.M. 431,72 g) em (HClO₄) 10⁻¹ mol.dm⁻³. Dissolve-se 0,1727 g. de dicromato de prata em 1.0 litro de ácido perclórico (HClO₄) 10⁻¹ mol.dm⁻³ (6,0 ml de solução concentrada para 1 litro de solução). A densidade da solução é muito próximo da densidade da água.

3.5.3 – O Dosímetro de “Dicromato de Potássio”

O dosímetro de “Dicromato de Potássio” difere muito pouco do dosímetro de dicromato de prata, mas ambos são baseadas na redução radiolítica do Cr⁺⁶ na forma de [Cr²O₇]⁻² para Cr⁺³ em soluções aquosas acidificadas. As diferenças entre estes dois dosímetros está no comprimento de onda para

medições por espectrofotometria e na faixa de dose útil do dosímetro. Enquanto no dosímetro de dicromato de prata a faixa de medida é de 1 – 12 kGy, com o dicromato de potássio a faixa é de 5 – 50 kGy.

3.5.3.1 - Medições de dose absorvida

A equação para medições de dose com o dosímetro de “Dicromato de Potássio” é:

$$D = \frac{\Delta abs}{(\rho.G.\epsilon.d)[1+0,001.(T-25)].[1+0,002.(T'-25)]} \quad (3.15)$$

Onde:

D = Dose absorvida em Gy

Δabs = Mudanças na absorbância a 440 nm entre as soluções dos dosímetros irradiados e o não irradiado

ρ = Densidade da solução dosimétrica ($1,004 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^3$)

G = Rendimento químico do íon $[\text{Cr}_2\text{O}_7]^{-2}$ ($0,0395 \cdot 10^{-6} \text{ mol.J}^{-1}$)

ϵ = Coeficiente de absorção molar a 440 nm em um espectrofotômetro específico (o valor nominal é de $44 \text{ m}^2.\text{mol}^{-1}$)

d = Caminho óptico da célula de medida espectrofotométrica (0,01 m)

$[1+0,001.(T-25)]$ = Correção para temperatura da solução de medição

$[1+0,002.(T'-25)]$ = Correção para temperatura de irradiação do dosímetro

3.5.3.2 - Características principais do dosímetro

Avaliação (medições): o dosímetro é medido pelo método de espectrofotometria com a utilização de cubetas de quartzo com caminho óptico de 10 mm, preferencialmente equipado com compartimento de controle de temperatura ou laboratório climatizado. As medições das soluções irradiadas são realizadas no comprimento de 440 nm.

Frascos de irradiação (ampolas): ampolas de vidro borossilicato ou equivalente devem ser utilizadas nas irradiações. As ampolas

mais comuns são as de 2 e 5 ml com diâmetro de 11 a 15 mm. Deve-se observar que a espessura da parede da ampola deve ser de pequena espessura para minimizar os efeitos de absorção por material de densidade muito superior a solução dosimétrica, que é próxima da água.

3.5.3.3 - Preparação da solução dosimétrica

A solução do dosímetro de “Dicromato de Potássio” consiste de $2 \cdot 10^{-3}$ mol.dm⁻³ de K₂(Cr₂O₇), (P.M. 294,18 g) e $5 \cdot 10^{-4}$ mol.dm⁻³ de Ag₂(Cr₂O₇), (P.M. 431,72 g) em (HClO₄) 10^{-1} mol.dm⁻³. Dissolve-se 0,5884 g de dicromato de potássio e 0,2159 g de dicromato de prata em 1,0 litro de ácido perclórico (HClO₄) 10^{-1} mol.dm⁻³ (6,0 ml de solução concentrada para 1 litro de solução). A densidade da solução é muito próximo da densidade da água.

3.6 - Fundamentos da espectrometria UV/VIS

A metodologia utilizada para avaliar os dosímetros selecionados para este trabalho, baseia-se na absorção da radiação eletromagnética por espécies químicas em meios homogêneos. A região espectral de interesse para os dosímetros selecionados compreende a faixa de 200 a 500 nm, nas regiões do espectro de radiação eletromagnética denominadas de “Ultravioleta (UV)” e “Visível (VIS)”. A absorção da radiação eletromagnética em um determinado comprimento de onda define a natureza da espécie química e a magnitude da absorção, define a sua concentração.

O processo de absorção de fótons por parte de um sistema qualquer que exige a presença do campo de radiação é sempre denominada absorção induzida. A intensidade da banda de absorção é proporcional ao coeficiente de absorção de Einstein para cada absorção induzida. A transição eletrônica ocorre por absorção de fótons e em condições normais de temperatura (ambiente ou próxima dela) as espécies químicas estão no

estado vibracional de menor energia do estado eletrônico fundamental. Deste modo, a absorção do fóton de radiação irá excitar as espécies químicas para um estado eletrônico de energia maior, e para os diversos níveis vibracionais e rotacionais deste estado eletrônico. Este espectro de absorção será, portanto, composto por um conjunto de bandas associadas às diversas transições vibracionais e rotacionais possíveis dos dois estados eletrônicos envolvidos na transição e dependerá das regras de seleção espectroscópicas válidas para cada caso.

Como o espaçamento entre os estados rotacionais é muito pequeno, normalmente estas transições não aparecem na forma de bandas resolvidas. Por outro lado, as transições vibracionais já envolvem espaçamentos um pouco maiores entre os níveis de energia. Desta forma, se os espaçamentos são maiores do que a resolução dos espectros, as transições vibracionais podem ser observadas como picos finos nos espectros eletrônicos de absorção ou de emissão.

Uma análise deste espectro pode ser feita considerando-se os máximos das bandas vibracionais, as chamadas progressões vibracionais. Para isto toma-se o valor do comprimento de onda da banda de absorção, em unidades de nanômetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) e se faz a transformação para números de onda para cm^{-1} . A diferença entre os números de ondas de cada uma das bandas é proporcional às diferenças de energias entre dois estados vibracionais correspondentes.

A intensidade de absorção é definida a partir de grandeza chamada transmitância, que compreende a razão entre as intensidades da radiação antes e depois de passar pelo meio absorvente:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3.16)$$

onde:

T = Transmitância

I = radiação eletromagnética transmitida após passar pelo meio absorvente (dosímetro)

I_0 = radiação eletromagnética incidente

Pode-se então, estabelecer uma relação entre a transmitância e a concentração da espécie química de interesse do dosímetro através da Lei de Beer-Lambert:

$$I_0 = I \cdot e^{l \cdot c \cdot \varepsilon} \quad (3.17)$$

onde:

l = comprimento do caminho óptico, ou seja, distância percorrida pela radiação no dosímetro (m)

c = Concentração (mol.l^{-1})

ε = é o coeficiente e absorção molar ($\text{m}^2 \text{mol}^{-1}$)

Um espectro de absorção típico para a espécie “íons dicromato” em meio ácido, pode ser observada na figura 3.6, utilizado para controle de qualidade do espectrofotômetro [Ellis, S. C. et al, 1980] e para medições dos dosímetros de dicromato de prata e de potássio. A partir disto tem-se que a intensidade de uma banda de absorção irá sempre aumentar com a concentração da amostra, mas não necessariamente de modo linear e desta forma constituir um desvio da lei de Beer [Barrow, G. M, 1962].

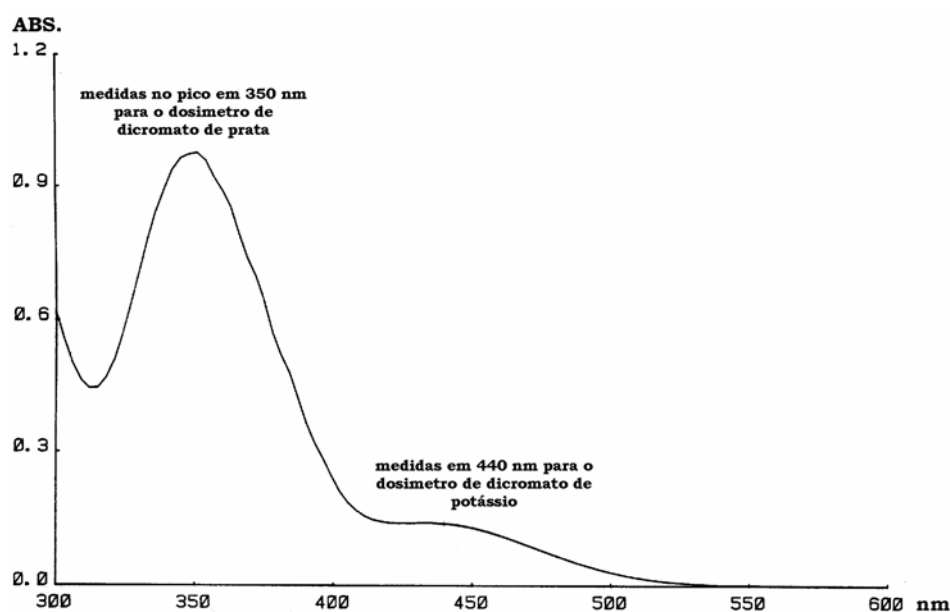


Figura 3.6 – Espectro de dicromato de potássio em UV/VIS

3.7 - Calibração da Dose Absorvida, Rastreabilidade e Comparações

3.7.1 - Calibração em Dose Absorvida

A calibração dos sistemas dosimétricos deve ser efetuada em um campo de radiação conhecido em um “arranjo experimental” bem definido, onde seja garantida a condição de equilíbrio eletrônico e calibrado contra o padrão nacional, rastreado ao sistema metrológico internacional. A calibração é segundo Humpreys, J.C., et al. [1998], o processo pelo qual a resposta de um dosímetro é caracterizada através da comparação com um padrão apropriado que está rastreado à cadeia metrológica. No caso do dosímetro químico de altas doses, é a curva de resposta entre a dose absorvida e os efeitos induzidos pela radiação no dosímetro, utilizando o instrumento de medição. A taxa de dose absorvida em um dado material pode ser calibrada com calorímetro, câmara de ionização ou dosímetro químico de referência em uma geometria definida em condições de equilíbrio eletrônico aproximado. Neste caso a resposta do dosímetro pode ser calibrada com exatidão em termos de mudanças no sinal do dosímetro como função da dose absorvida. O procedimento de calibração de um sistema dosimétrico consiste de:

- a) Irradiação dos dosímetros com doses conhecidas no campo calibrado com sistema de referência (na faixa de dose útil do mesmo);
- b) Análise dos dosímetros irradiados utilizando um instrumento de medição específico;
- c) Construção da curva de resposta do dosímetro (leitura do instrumento calibrado versus Dose);
- d) Análise das incertezas associadas à medição.

Essas calibrações devem ser rastreadas ao Laboratório Nacional, o que significa que as medições passam a ser certificadas. As calibrações devem

ser realizadas para cada lote de dosímetros. Um teste estatístico como o “t - teste” deve ser utilizado para se determinar se há alguma diferença significativa entre os lotes. A calibração do sistema deve ser “verificada” aproximadamente uma vez por ano para confirmar a sua condição de validade. Este teste deve ser realizado como um exercício de calibração. A calibração deve verificar todo o sistema dosimétrico e não somente o dosímetro. O instrumento de medição é uma parte integrante da dosimetria, assim a calibração de um sistema dosimétrico deve ser resguardada como sendo específica para o instrumento utilizado. Mudanças no procedimento de medição, reparações no equipamento ou alguma coisa que tenha sido alterada, devem ser avaliados. Para muitos dosímetros a resposta é influenciada pelas condições ambientais, tais como: a) Temperatura de irradiação; b) Umidade; c) Taxa de dose; d) Efeitos de “fading” (perda ou ganho de resposta entre a irradiação e a leitura do dosímetro).

Como a calibração é estritamente válida para as condições da mesma, é necessário ter condições similares durante as medições de dose no sentido de reduzir as incertezas devido a estes fatores ambientais. Há dois métodos básicos para a calibração dosímetros: Calibração na planta de irradiação e Calibração no laboratório. Os sistemas dosimétricos para medições de altas doses são sensíveis a mudanças de acordo com as condições ambientais. Muitos erros são cometidos nas medições de altas doses devido às mudanças das condições de irradiação entre o laboratório e uma planta de irradiação comercial. A escolha do sistema dosimétrico deve levar isto em consideração. De todos os fatores ambientais, o que mais preocupa é a questão da temperatura de irradiação, pois outros fatores como incidência de luz, quantidade de oxigênio no meio, umidade, entre outros, podem ser controlados através de embalagens especiais. A fig. 3.7 mostra a dependência da temperatura de irradiação para vários sistemas dosimétricos [Mc Laughlin, W.L., 1989].

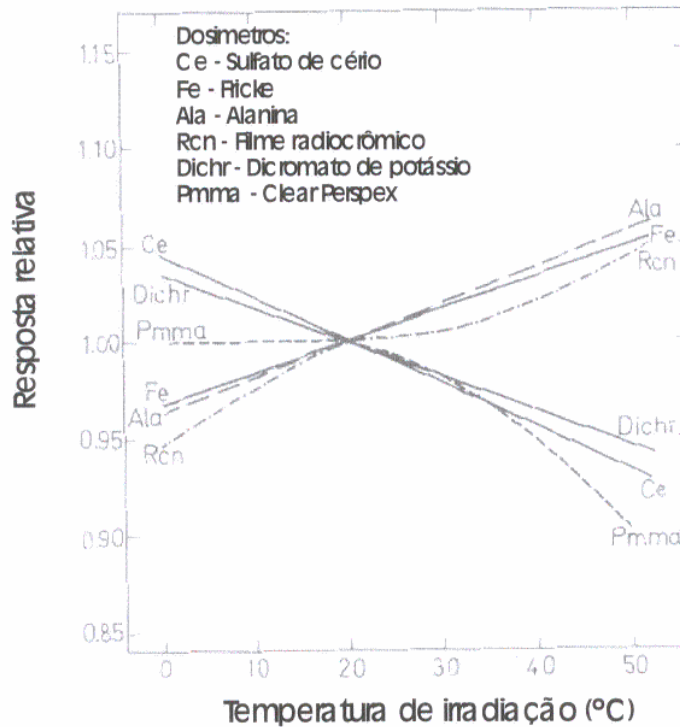


Figura 3.7 - Dependência da temperatura de irradiação para os principais dosímetros

3.7.2 - Rastreabilidade e Comparações

Como já foi mencionado no item 2.1.4 no capítulo 2, deve existir no país um sistema de calibração para se garantir as medições relacionadas ao “Padrão Nacional” sem que seja quebrada a cadeia metrológica. Baseado na rastreabilidade sugerida por McLaughlin et al, [1989] e na realidade brasileira em relação às medições de altas doses, sugere-se que a atividade no país seja implementada de acordo com a figura 3.7.

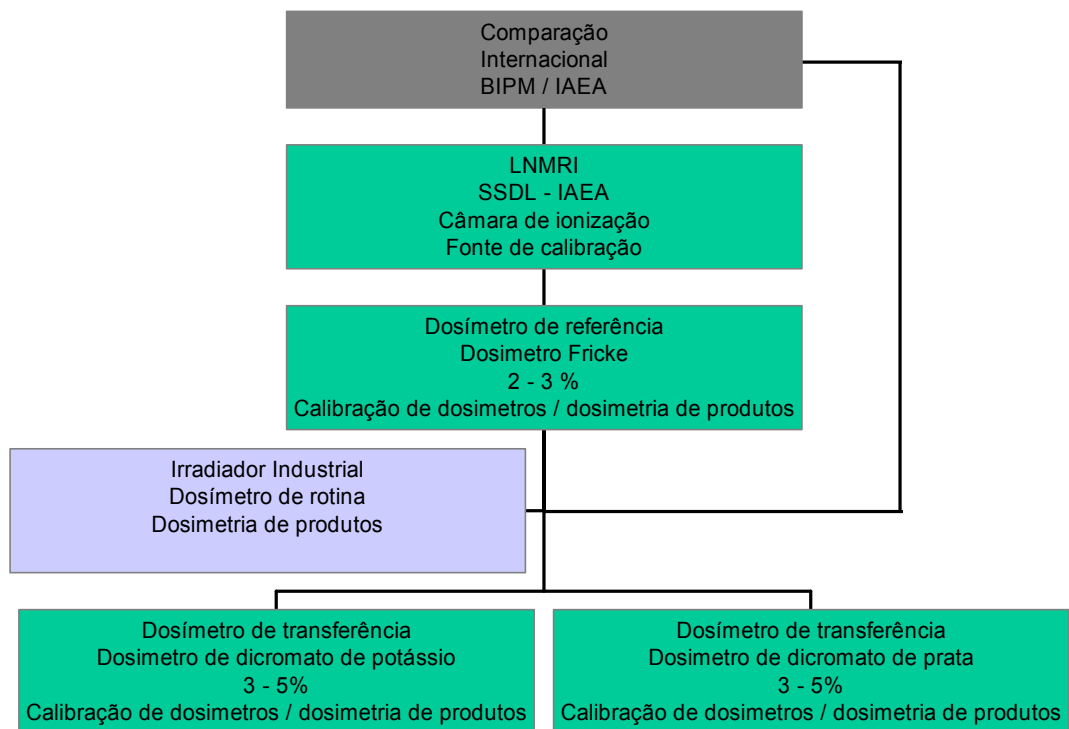


Fig. 3.8 – Fluxograma de Rastreabilidade para laboratório nacional padrão de altas doses

3.7.3 – “Programa Nacional de Controle de Qualidade” em medições de altas doses

Nos moldes do programa IDAS da IAEA, um programa de qualidade para medições de altas doses viria representar um grande avanço na atual situação dos sistemas dosimétricos no país. Com o objetivo de identificar e manter a qualidade nas medições de altas doses em instalações de grande porte, os dosímetros podem ser enviados através de sistema postal, resultando em um programa de baixo custo.

3.7.4 - Aplicações em irradiadores industriais e de pesquisa

Além de disponibilizar no país sistemas dosimétricos de baixo custo e rastreados ao sistema metrológico internacional, o laboratório nacional de metrologia em altas doses deve manter um canal de comunicação com os

usuários de dosímetros no sentido de trocar experiências para a aplicação mais correta das medições.

3.8 - Incertezas na Dosimetria

O valor de uma medição pode ser dito que é apenas uma aproximação ou uma estimativa do valor mensurado, ou seja, neste caso o valor da dose absorvida. A medição somente se torna um valor verdadeiro quando acompanhada das incertezas associadas. Uma forma interessante de olhar os conceitos de incerteza, de acordo com MacLaughlin [1989]:

- a) Uma pessoa com um dosímetro acha que conhece o valor de dose com exatidão;
- b) Uma pessoa com dois dosímetros acha que tem uma estimativa aproximada da dose e começa a se sentir maravilhada;
- c) Uma pessoa com três dosímetros entende que não sabe o valor de dose, mas pode fazer um melhor julgamento que os dois anteriores, e desta forma estimar as incertezas.

A incerteza é um fato inevitável da vida. Primeiro, as fontes de incertezas têm que ser identificadas e seus efeitos minimizados tanto quanto possíveis. As fontes de incertezas que não podem ser evitadas devem ser avaliadas. Isto é relativamente fácil de fazer se for considerada cada etapa da calibração e do uso do sistema dosimétrico. Há duas categorias de incertezas baseadas nos seus métodos de avaliação: incertezas do tipo “A” e incertezas do tipo “B”. As incertezas do tipo “A” são as que estão relacionadas com a análise estatística de uma série de observações, enquanto as incertezas do tipo “B” são baseadas em informações sobre os instrumentos de medição, certificados de calibração, pureza química, etc. As incertezas do tipo “A” também são chamadas de randômicas e as incertezas do tipo “B”, além de outras, incluem as sistemáticas. A incerteza

combinada total associada (u_c) com um determinado grupo de medições (u_n), é baseada na lei de propagação das incertezas, mas que pode ser reduzida à raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas de cada componente individual.

$$u_c = \left(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

A incerteza expandida ($u = k u_c$), onde:

k = Fator de abrangência

$k = 1$ para $\approx 68\%$

$k = 2$ para $\approx 95\%$

Em dosimetria, dois fundamentos estatísticos são considerados os mais importantes sob o ponto de vista da prática em medições dosimétricas, que são a exatidão e a precisão nas medições.

A exatidão (e) está associada a rastreabilidade aos padrões nacionais. O laboratório padrão nacional que mantém padrões como calorímetro, câmara de ionização ou dosímetro químico absoluto, utilizam para efeito de calibração de dosímetros de referência, transferência e dosímetros de rotina, a incerteza padrão combinada com 95% de confiabilidade ($2 \cdot u_t$), [NIST Special Publication 250-45, 1998]. As calibrações são realizadas em um campo de irradiação conhecido, com taxa de dose medida com o padrão nacional. Incertezas relativas ao posicionamento do dosímetro e tempo de exposição serão adicionadas quando se determina a resposta do dosímetro em função da dose.

A precisão (p) em dosimetria está associada com a repetibilidade ou variação randômica da resposta do dosímetro. Quando um número de medições de um mesmo lote de dosímetros é irradiado exatamente da mesma maneira, a precisão do sistema dosimétrico é o desvio padrão da média, ou seja, o desvio padrão da medição dividido pela raiz quadrada do número de medições realizadas. A incerteza de uma medição dosimétrica

esta associada com a curva de resposta Sinal X Dose ou curva de calibração do mesmo, ou seja, é a raiz quadrada da soma dos quadrados da exatidão e da precisão (soma quadrática).

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A escolha dos sistemas dosimétricos foi baseada na qualidade metrológica dos dosímetros e em sistemas de baixo custo, como já foi abordado no capítulo anterior no item 3.6. Os sistemas selecionados para este trabalho foram todos analisados por espectrofotometria.

4.1 - Estabilidade do espectrofotômetro

Desde os anos 70', [Ellis, S. C. et al - 1980], existe uma grande preocupação em que os sistemas dosimétricos padrão nacionais, medidos através da espectrofotometria, sejam avaliados de uma maneira mais precisa, resultando em estudos regulares de comparação de resultados. A maioria dos laboratórios nacionais (NIST, NPL, PTB, etc) da época utilizava o dosímetro Fricke como referência para medições de dose absorvida, e ainda hoje, os laboratórios que possuem menos recursos o utilizam pela sua qualidade dosimétrica e por ser um sistema de baixo custo.

Foi decidido também que, previamente às comparações de resultados com os dosímetros Fricke, fosse realizada a comparação dos espectrofotômetros dos respectivos laboratórios nacionais que participassem dos estudos de comparação dosimétrica. O trabalho de Burke, R.W. [1977], foi decisivo para a escolha de soluções de dicromato de potássio em meio ácido para este estudo. O espectro de absorção da solução de dicromato de potássio em ácido perclórico apresenta 2 picos em 2 comprimentos de onda relativamente separados, respectivamente 313 e 350 nm, que são adequados para verificar as absorbâncias. As soluções de controle foram escolhidas para dar absorbâncias de 0.100 a 0.500 no comprimento de onda de 313 nm e de 0.200 a 1.000 de absorbância em 350 nm para um caminho ótico de 10 mm. As correções de temperatura para as medições apresentam coeficientes de - 0,02 % por °C em 313 nm e - 0,05% por °C

em 350 nm. Apesar da solução apresentar um pequeno desvio da lei de Lambert-Beer devido a mudanças no equilíbrio nos íons cromato-dicromato, ainda assim é adequada para o objetivo de se observar a resposta do espectrofotômetro.

4.1.1 – Preparação das soluções de dicromato de potássio

As soluções de dicromato são preparadas em água bi-destilada e acidificada com ácido perclórico na concentração de 10^{-3} molar, com base na diluição por peso. A tabela 3.1 apresenta os dados de referência para esta solução de acordo com o trabalho de Burke [1977].

Tabela 4.1 – Soluções padrão de dicromato de potássio em H_3PO_4 10^{-3} M para calibração de espectrofotômetros.

Solução	mg $K_2Cr_2O_7$ / kg de solvente	Absorbância (313 nm)	Absorbância (350 nm)
0	0 (solvente)	0	0
1	20,574	0,0988	0,2196
2	47,483	0,2286	0,5073
3	72,932	0,3515	0,7802
4	101,53	0,4900	1,0876

4.1.2 – Procedimento de medição

- Ligar o espectrofotômetro Camspec modelo M330 (Figura 4.1) e ajustar para varredura do espectro entre 300 e 380 nm;
- Deixar o equipamento estabilizar por 30 minutos;
- Colocar no compartimento de medição, na cubeta de 1 cm, o branco de água bi-destilada acidificada com ácido perclórico 10^{-3} M) e zerar o equipamento (absorbância 0,00);

- Fazer as medições com as soluções padrão de dicromato de potássio em ácido perclórico 10^{-3} M;
- Medir a temperatura da solução;
- Construir a curva de resposta do equipamento, absorvância versus comprimento de onda (nm);
- Comparar os resultados com a tabela 4.1 e analisar a linearidade de cada curva de resposta.



Fig. 4.1 – Espectrofotômetro Camspec modelo 330

4.2 - Calibração do dosímetro Fricke

4.2.1 – Fontes de irradiação e calibração no “arranjo experimental”

Foram utilizadas duas fontes de ^{60}Co do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), com taxas de dose na água de $3,31 \cdot 10^{-2}$ Gy.min $^{-1}$ (em 21/01/2002) e $2,90 \cdot 10^{-1}$ Gy.min $^{-1}$ (em 10/02/2005)

respectivamente, para a calibração dos dosímetros Fricke. A utilização do dosímetro Fricke é fundamental para que se possa trabalhar com dosimetria de altas doses, uma vez que a calibração do Fricke é que estabelece a rastreabilidade do sistema e visa permitir a calibração de outros dosímetros. Foram montados “arranjos experimentais” similares para as irradiações nas duas fontes, como o que pode ser observado nas figs. 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, para a fonte mais intensa. Como o dosímetro Fricke não tem baixa dependência com taxas de dose menores que $10^6 \text{ Gy}\cdot\text{min}^{-1}$ [Mc Laughlin, W.L. et al – 1989], foi possível utilizar estas fontes para a calibração do sistema.



Fig. 4.2 -Vista frontal do “arranjo experimental” de irradiação no LNMRI



Fig. 4.3 -Vista lateral do “arranjo experimental” de irradiação no LNMRI

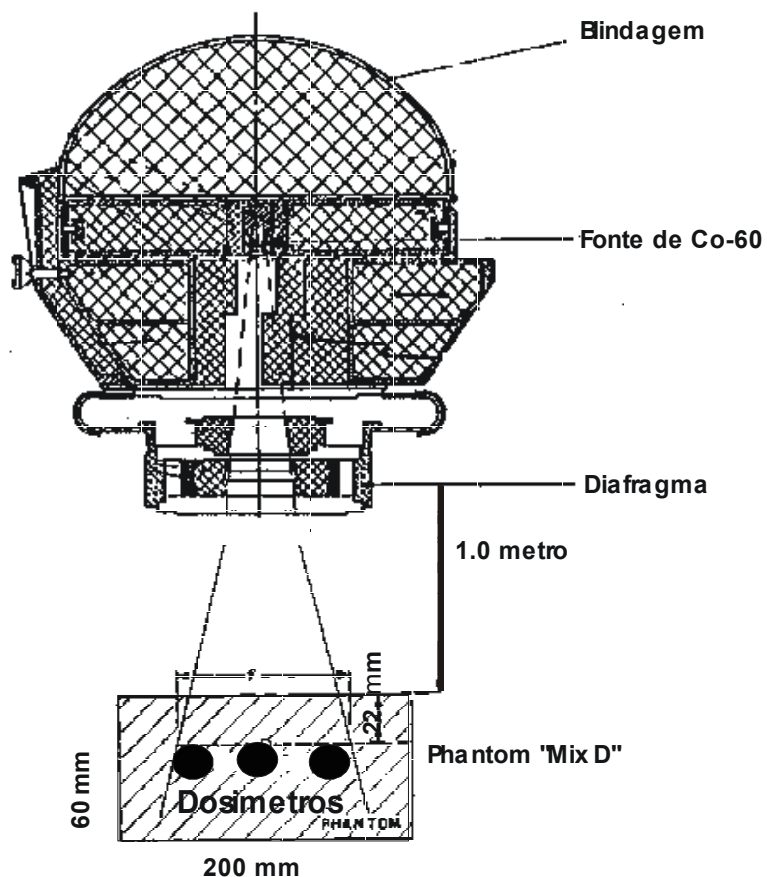


Fig. 4.4 – Detalhes do “arranjo experimental” para calibração do dosímetro Fricke



Fig. 4.5 -Vista superior do fantoma com 3 posições de irradiação

O suporte para irradiação possui três posições, onde foram efetuadas medições com uma câmara de grafite do tipo dedal, fabricada pela Nuclear Enterprises, modelo 2561, número de série 264, calibrada no BIPM em 17/05/2002 em ^{60}Co em água (apêndice 2), com certificado de calibração

número 24 e eletrômetro de referência fabricada pela Nuclear Enterprises, modelo 2560, número de série 212, calibrado em 09/03/2004 sob o número NME-008/2004 com $u = 0,1\%$ com $k=2$ (95% de confiabilidade). As medições foram realizadas em cada um dos três (3) pontos de irradiação no fantoma de “Mix-D” com seis repetições para cada posição, utilizando-se do fator de calibração da câmara para água. Questões relacionadas com o posicionamento da câmara e do fantoma apesar de conhecidos, não poderiam ser avaliados independentemente, e foram considerados na incerteza total de calibração.

4.2.2 – Irradiação do dosímetro Fricke no “arranjo experimental” (obtenção do fator de calibração para o dosímetro Fricke)

As irradiações do dosímetro Fricke foram realizadas no “arranjo experimental” com a câmara padrão do LNMRI, descrita previamente, e consistiu de uma série de medições, nas respectivas posições com doses variando de 50 a 350 Gy. No total foram realizadas 27 medidas nos dois irradiadores. Como o dosímetro Fricke possui resposta linear da relação “Dose X Absorbância”, as calibrações podem ser realizadas ponto a ponto ou com a construção de curva de resposta, onde o inverso da inclinação da curva é utilizado como fator de calibração. As condições de equilíbrio eletrônico são alcançadas não somente com a parede de vidro do dosímetro, mas pelo fato das ampolas estarem dentro do fantoma e constituírem uma cavidade pequena de acordo com a teoria de Burlin [1966], e tratada como se os materiais se comportassem como a água para efeito de calibração. As ampolas (dimensões: diâmetro externo de 14 mm e altura de 40 mm) do dosímetro Fricke utilizadas e apresentada na figura 4.6 são de vidro (borossilicato) e seladas a fogo.

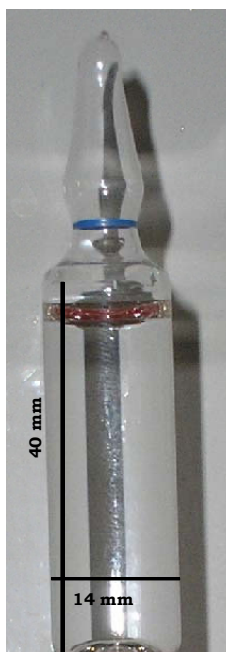


Figura 4.6 – Dosímetro em ampola de vidro (borossilicato) selada a fogo

A partir da equação 2.6, reorganiza-se a equação para a obtenção do fator de calibração (F_c):

$$F_c = \frac{D_i}{abs_i} \quad (4.1)$$

Onde:

D_i = Dose absorvida de uma medição

F_c = Fator de calibração para o dosímetro Fricke (Gy.abs)

abs_i = Resposta do espectrofotômetro em absorvância

A incerteza no fator da calibração, como mencionado no item 2.5.3 no capítulo 2 (Incertezas na Dosimetria), é a raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas da exatidão e da precisão (soma quadrática), ou seja, do valor de dose calibrado e da leitura da resposta do espectrofotômetro.

4.3 - Irradiação no “arranjo experimental” no irradiador Gammacell

Para a calibração de dosímetros que respondem na faixa de dose superior, de 1 a 50 kGy, considerado como altas doses, há a necessidade de se ter uma fonte com maior atividade, exigindo menores tempos de irradiação. É comum a utilização de irradiadores do tipo “Gammacell” como apresentado na figura 2.6, nos laboratórios de calibração ou laboratórios nacionais de metrologia, devida principalmente a questões de proteção radiológica e custo, muito embora possam ser utilizados outros tipos de fonte, bastando para isso que se estabeleça uma condição de irradiação que possa ser reproduzida.

Outro aspecto importante dos irradiadores do tipo “Gammacell”, é o fato de poder dispor de altas taxas de doses, da ordem de $1.5 \cdot 10^2 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$, mais próximas das encontradas nas instalações industriais. O irradiador do tipo Gammacell modelo 220 Excel da UFRJ-LIN (Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – Laboratório de Instrumentação Nuclear) com atividade de aproximadamente $4.6 \cdot 10^{14} \text{ Bq}$. (em 2000), foi utilizado para as calibrações dos dosímetros de transferência.

Para efeito de calibração no “Gammacell”, foi construído um suporte em PMMA (Polimetilmetacrilato) com cinco posições de irradiação de modo semelhante ao realizado no LNMRI para a calibração do dosímetro Fricke, como mostra a figura 4.8. A espessura da parede é da ordem de 5 mm, suficiente para, juntamente com a parede de vidro do dosímetro, atingir a condição de equilíbrio eletrônico para fins de calibração. Para ^{60}Co , o equilíbrio eletrônico equivale ao alcance médio dos elétrons secundários mais energéticos produzidos por fótons de 1,33 MeV, que no caso de um meio equivalente à água, é da ordem de $0,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ de material.



Figura 4.7 – “Arranjo experimental” para irradiação no “Gammacell”

4.3.1 – Determinação da dose de trânsito

Como a taxa de dose neste irradiador é alta, o acionamento do sistema gera um “transit time” (dose de trânsito) no posicionamento, que deve ser avaliada e descontada do valor da dose medida, caso ela seja significativa. A medição da dose de trânsito é realizada com sucessivas subidas e descidas do eixo do irradiador (N_i) para se atingir a faixa de dose mensurável do dosímetro, que no caso do irradiador da UFRJ-LIN foi estimada em um número igual a 20 repetições, utilizando-se o dosímetro Fricke para avaliação.

$$D_{trans} = F_{Fricke} \left(\frac{\Delta abs}{[1 + 0,007.(T - 25)][1 + 0,015.(T' - 25)]} \right) \cdot \frac{1}{N_i} \quad (4.2)$$

Onde:

D_{trans} = Dose de transito (Gy)

F_{Fricke} = Fator de calibração para o dosímetro Fricke

Δabs = Diferença de leitura (absorbância) no espectrofotômetro em 304 nm entre as soluções do dosímetro Fricke irradiadas e não irradiada.

T = temperatura da solução no momento da leitura no espectrofotômetro (°C)

T' = temperatura da solução no momento da irradiação (°C)

N_i = Número de repetições

4.3.2 – Irradiação no “arranjo experimental” com dosímetro Fricke

Foram utilizados dosímetros Fricke, já rastreados e calibrados ao LNMRI, para a irradiação nos cinco pontos no “arranjo experimental” como mostra a figura 4.8. Eles foram colocados no interior da câmara do irradiador “Gammacell” e, através de uma guia na base do cilindro como referência de posicionamento, puderam ser reproduzidas as medições por diversas vezes sem alteração de posicionamento como mostram as figuras 4.9 e 4.10. A calibração deve ser realizada com um número de repetições mínima para se ter resultados estatísticos confiáveis ($N \geq 5$). Além disto, medições com lotes de dosímetros diferentes em datas diferentes também são importantes para avaliar a qualidade do sistema. As medições realizadas em datas diferentes, devem ser corrigidas para uma mesma data de referência com as doses corrigidas de acordo com a equação de decaimento radioativo e meia-vida do ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,2714$ anos – NCRP 1985).

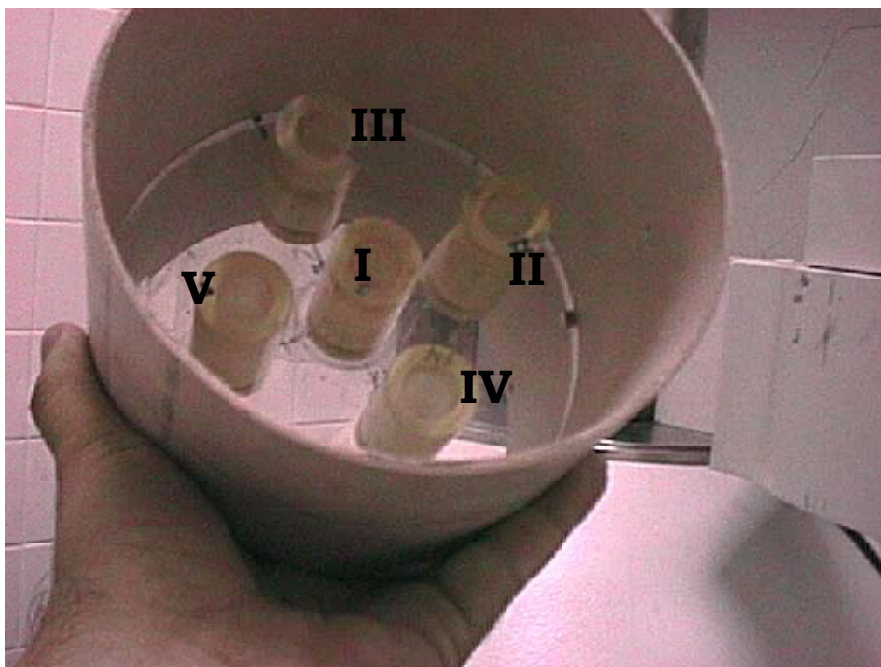


Figura 4.8 – Suporte para fixação do “arranjo experimental” no “Gammacell”



Figura 4.9 – Arranjo final do “arranjo experimental” de irradiação no “Gammacell”

A taxa de dose medida em cada ponto então será:

$$\dot{D}i = F_{Fricke} \left(\frac{\Delta abs}{[1 + 0,007.(T - 25)][1 + 0,015.(T' - 25)]} \right) \cdot \frac{1}{t_{ir.}} \quad (4.3)$$

Onde:

$\dot{D}i$ = Taxa de Dose no ponto (Gy.min⁻¹)

F_{Fricke} = Fator de calibração para o dosímetro Fricke

Δabs = Diferença de leitura (absorbância) no espectrofotômetro em 304 nm entre as soluções do dosímetro Fricke irradiadas e não irradiada.

T = temperatura da solução no momento da leitura no espectrofotômetro (°C)

T' = temperatura da solução no momento da irradiação (°C)

$t_{ir.}$ = Tempo de irradiação em minutos

4.4 - Calibração do dosímetro de Dicromato de Prata

Com a taxa de dose conhecida e rastreada ao LNMRI nos pontos de irradiação no “Gammacell” descrita no item 4.3 com os dosímetros de referência “Fricke”, pode-se então calibrar os dosímetros de dicromato de prata (faixa de dose operacional de 1 – 12 kGy), através da construção da curva de resposta Abs. X Dose. Deve-se selecionar as doses para que fiquem distribuídas dentro da faixa de dose nominal do dosímetro.

4.5 - Calibração do dosímetro de Dicromato de Potássio

Da mesma forma que se determina o fator de calibração para o dosímetros de dicromato de prata, a construção da construção da curva de resposta Abs. X Dose para este dosímetro deve ser com doses de 5 a 50 kGy.

4.6 - Calibração do dosímetro de Dicromato de Prata em instalação de grande porte

A calibração do sistema de medição consiste em realizar um conjunto de medições para se ter a garantia da qualidade da medição de dose com os equipamentos envolvidos na avaliação da dose. Neste sentido, são avaliadas a qualidade do espectrofotômetro e a qualidade dos reagentes químicos envolvidos na confecção dos dosímetros.

4.6.1 – Estabilidade do espectrofotômetro

Com a utilização de soluções padrão de dicromato de potássio em ácido perclórico 0,1 Molar de acordo com o item 4.1, avaliou-se a qualidade da resposta do espectrofotômetro Micronal modelo B442.

Freqüência: mensal 1 curva completa e semanal apenas 1 ponto da curva.

4.6.2 – Construção de curvas de calibração Abs. X Dose

Com os valores obtidos com os dosímetros irradiados com doses conhecidas em um gammacell no set-up calibrado como o mencionado no 4., são montadas as curvas de resposta Absorbância X Dose, para calibração do sistema de medida da instalação de grande porte ou de pesquisa. Com dosímetros irradiados com doses conhecidas em um Gammacell no “arranjo experimental” calibrado como o mencionado no 4.3 (ex. dosímetros Fricke - Padrão de referência), são utilizados para a montagem da curva de resposta Absorbância X Dose, para calibração do sistema de medição da instalação de grande porte ou de pesquisa. São utilizados pelo menos 4 pontos equidistantes da faixa de dose de resposta do dosímetro para a construção da curva de calibração. A partir desta curva, obtém-se o fator de calibração para o sistema dosimétrico. Como o dosímetro de dicromato de prata possui resposta linear para a função “Dose X Absorbância”, obtém-se o fator de calibração através do inverso da inclinação da curva de calibração, ajustada pelo método dos mínimos quadrados. Com o sistema dosimétrico calibrado a dose pode ser medida por:

$$D_i = F_{cal(Ag_2Cr_2O_7)} \frac{\Delta_{abs}}{[1 + 0,001(T - 25)] \cdot [1 + 0,002 \cdot (T - 25)]} \quad (4.4)$$

Onde:

D_i = Dose absorvida de uma medição com o dosímetro de dicromato de prata (Gy)

$F_{cal. (Ag_2Cr_2O_7)}$ = Fator de calibração para o dosímetro de dicromato de prata na planta de irradiação

Δ_{abs_i} = Resposta da medição no espectrofotômetro em absorbância

$[1 + 0,001 \cdot (T - 25)]$ = Correção para temperatura da solução de medida

$[1 + 0,002 \cdot (T - 25)]$ = Correção para temperatura de irradiação do dosímetro

4.6.3 - Procedimentos de calibração e manutenção do sistema

Calibração do espectrofotômetro

- Ligar o espectrofotômetro e ajustar o comprimento de onda para 350 nm;
- Deixar o equipamento estabilizar por 30 minutos;
- Colocar no compartimento de medição a cubeta de 1 cm com água destilada e zerar o equipamento (absorbância 0,00);
- Com a utilização de soluções padrão de dicromato de potássio em ácido perclórico 0,1 Molar, avalia-se a qualidade da resposta do equipamento (ref. Tabela 4.1);

Freqüência: mensal 1 curva completa e semanal apenas 1 ponto da curva.

Curva de Calibração Dose X Absorbância

- Ligar o espectrofotômetro e ajustar o comprimento de onda para 350 nm;
- Deixar o equipamento estabilizar por 30 minutos;
- Colocar no compartimento de medição a cubeta de 1 cm com água destilada e zerar o equipamento (absorbância 0,00);
- Colocar a cubeta com a solução dosimétrica não irradiada na posição de medição e proceder a leitura. Anotar o valor para o cálculo da dose com as leituras das soluções irradiadas;
- Colocar a cubeta com a solução dosimétrica irradiada na posição de medição e proceder a leitura. Anotar o valor para o cálculo da dose com a utilização das leituras das soluções irradiadas;
- Montar a curva de calibração Dose X Absorbância.

Medidas de dose com o dosímetro de Dicromato de Prata

- Ligar o espectrofotômetro e ajustar o comprimento de onda para 350 nm;
- Deixar o equipamento estabilizar por 30 minutos;
- Colocar no compartimento de medição a cubeta de 1 cm com água destilada e zerar o equipamento (absorbância 0,00);

- Colocar a cubeta com a solução dosimétrica não irradiada na posição de medição e proceder a leitura. Anotar o valor para o cálculo da dose com as leituras das soluções irradiadas;
- Colocar a cubeta com a solução dosimétrica irradiada na posição de medição e proceder a leitura. Anotar o valor para o cálculo da dose;
- Com o valor da absorbância ($\Delta_{\text{abs}} = \text{abs da Solução não irradiada} - \text{abs da Solução irradiada}$), proceder através de regressão linear ao cálculo de dose a partir da curva de calibração construída com os dosímetros de referência.

4.6.4 – Comparação com dosímetros de PMMA

Algumas irradiações foram realizadas nas instalações da Embrarad com os dosímetros de dicromato de prata e dosímetros PMMA juntos no “canal experimental”, que é uma caixa móvel no irradiador de grande porte para realização de experimentos. Quatro lotes de dosímetros foram irradiados, sendo dosímetros de PMMA e de dicromato de prata.

4.7 – Calibração do dosímetro Fricke no CDTN

Para a calibração do dosímetro Fricke no CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear), foram realizadas no “Gammacell” calibrado, descrita previamente no item 4.3, e consistiu de uma série de medições, nas respectivas posições com doses variando de 50 a 350 Gy. No total foram realizadas 20 medições no Gammacell da UFRJ-LIN, sendo cinco diferentes doses para cada um dos quatro pontos do arranjo experimental (originalmente são cinco pontos de irradiação, mas um deles apresentou ruptura da base de PMMA).

4.8 - Calibração de pontos de irradiação em fantoma de água no irradiador multipropósito do CDTN

Os trabalhos foram realizados na planta de irradiação com as seguintes características: **Planta Tipo:** multipropósitos, com geometria de exposição panorâmica, equipada com fonte de ^{60}Co armazenada a seco; **Fabricante:** MDS Nordion; **Atividade:** 2.220 TBq (60.000 Ci); **Sistema de carregamento de produtos:** manual. Foi utilizado um fantoma de água, de acordo com as figuras 4.10 e 4.11, com três (3) posições de irradiação.

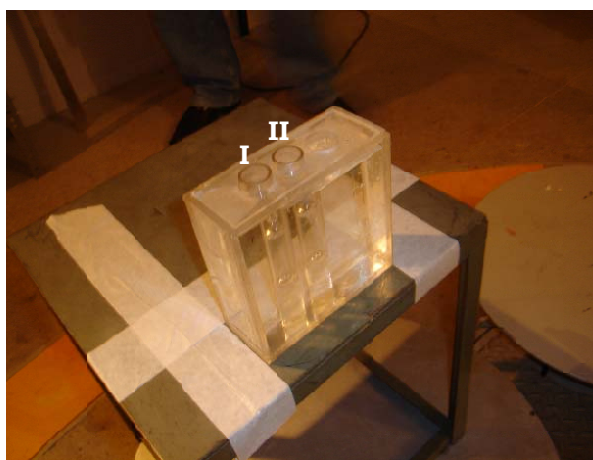


Fig. 4.10 – Fantoma de água para calibração de ponto de irradiação

Foi estabelecida uma distância de 50 cm entre a face do fantoma e a capa de proteção da fonte, de acordo com a figura 4.11, com a base fixa.



Fig. 4.11 – Posicionamento do fantoma de água no irradiador do CDTN

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Estabilidade do espectrofotômetro

Seguindo o procedimento descrito no item 4.1, as medições de soluções padrão de dicromato de potássio têm como principal objetivo, verificar a resposta do espectrofotômetro, neste caso, a linearidade da resposta. Os dosímetros utilizados neste trabalho apresentam resposta linear em suas faixas de dose ideais para medições. Portanto a verificação da condição das medições é o primeiro passo para se iniciar um trabalho com dose absorvida. Nas tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados resultados da estabilidade das medições com as soluções padrão de dicromato de potássio, e resultados apresentados por Ellis et al. [1980]. As medições com soluções padrão de dicromato de potássio são realizadas para se verificar a qualidade do espectrofotômetro, não se determina nenhum fator de calibração. Evidente que quanto mais próximos de resultados obtidos por outros laboratórios, mais confiáveis se tornam as medições realizadas com os dosímetros neste trabalho.

Tabela 5.1 – Resultados medições de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 313 nm

Curva Nº	Data	inclinação curva de resposta em 313 nm	Correlação (r^2)	Interseção
1	Jun 00	$0,00487 \pm 0,00006$	0,99995	-0,0211
2	Set 01	$0,00480 \pm 0,00006$	0,99987	0,0031
3	Fev 02	$0,00483 \pm 0,00006$	0,99838	-0,0081
4	Mai 02	$0,00487 \pm 0,00006$	0,99992	0,0009
5	Jun 02	$0,00496 \pm 0,00007$	0,99958	0,0024
6	Set 03	$0,00492 \pm 0,00007$	0,99994	-0,0002
7	Mar 04	$0,00498 \pm 0,00007$	0,99924	0,0020
8	Fev 05	$0,00494 \pm 0,00007$	0,99875	-0,0083
* Refer.: Ellis et al.		0,00483	1,00000	
Média		0,00490		
Desvio		0,000065		

Tabela 5.2 – Resultados medições de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 350 nm

Curva Nº	Data	inclinação curva de resposta em 350 nm	Correlação (r^2)	Interseção
1	Jun 00	0,01067 ± 0,000106	0,99994	-0,0211
2	Set 01	0,01054 ± 0,000105	0,99976	0,0031
3	Fev 02	0,01057 ± 0,000105	0,99922	-0,0081
4	Mai 02	0,01050 ± 0,000105	0,99975	0,0009
5	Jun 02	0,01065 ± 0,000106	0,99964	0,0024
6	Set 03	0,01046 ± 0,000104	0,99917	-0,0002
7	Mar 04	0,01045 ± 0,000104	0,99965	0,0020
8	Fev 05	0,01035 ± 0,000103	0,99932	-0,0083
* Refer.: Ellis et al.		0,01072	1,00000	-0,0007
Média		0,01052		
Desvio		0,000105		

Nota-se que as curvas estão com excelente linearidade e se considerarmos que a curva com ajuste linear é do tipo da equação 5.1, os resultados dos ajustes indicam que praticamente as retas ajustadas passam muito próximo da origem (0,0:0,0), sendo praticamente desprezível o fator interseção [Tauhata, L.; Almeida, E.S. - 1981].

$$y = a + bx \quad (5.1)$$

Onde:

a = interseção da curva ajustada

b = inclinação da curva ajustada

x = concentração da solução

y = absorvância da solução

Nas figuras 5.1 e 5.2 são apresentados os resultados das curvas ajustadas obtidos no espectrofotômetro Camspec 330 para medições em 313 nm e para 350 nm, comparados com os valores obtidos por Ellis et al. [1980].

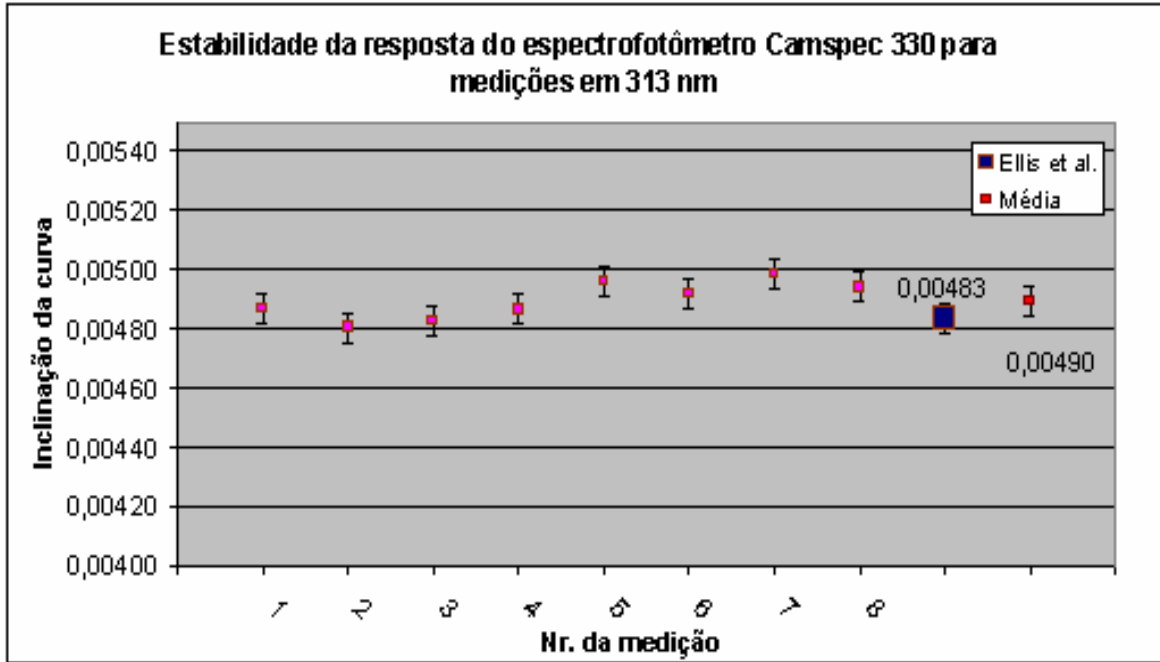


Fig. 5.1 – resultados da inclinação de curvas ajustadas de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 313 nm com medições no Espectrofotômetro Camspec modelo 330

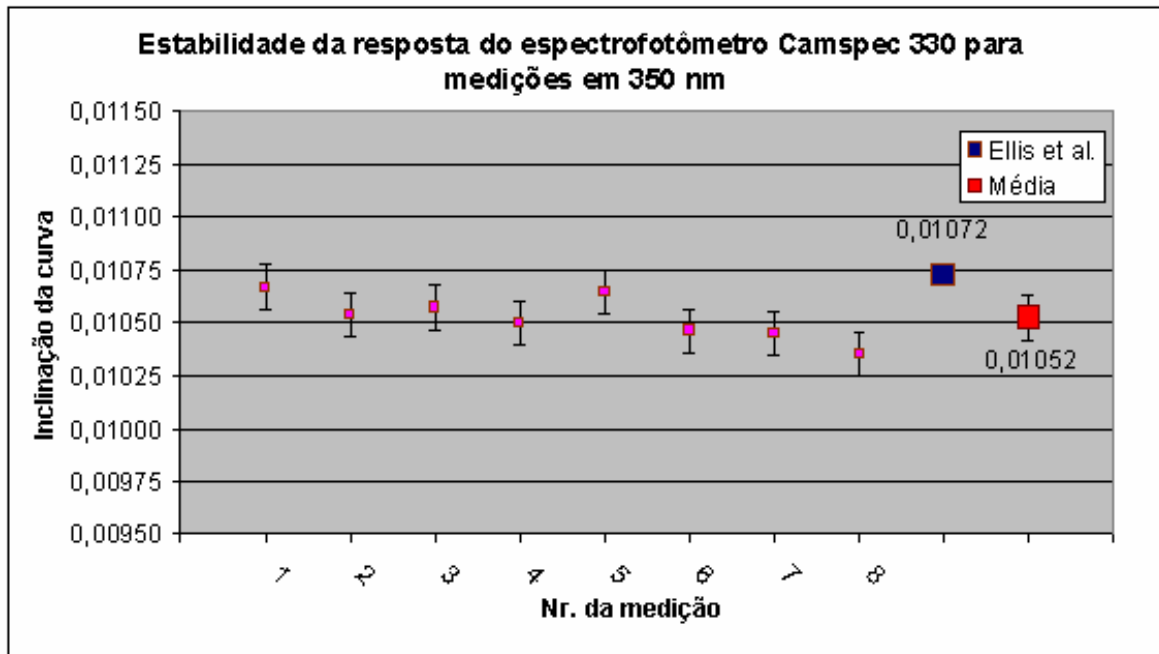


Fig. 5.2 – resultados da inclinação de curvas ajustadas de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 350 nm com medições no Espectrofotômetro Camspec modelo 330

Os resultados obtidos demonstram excelente concordância com os trabalhos de Ellis, et al [1980], principalmente considerando que o acompanhamento da resposta do equipamento compreende um período de aproximadamente quatro anos (de 2000 a 2005). Os desvios em relação ao trabalho de Ellis, et al [1980], são considerados normais, e o equipamento adequado para o desenvolvimento e aplicação em dosimetria de altas doses, uma vez que os coeficientes de correlação das curvas nos comprimentos de 313 nm e 350 nm, são muito próximas da unidade.

5.2 - Calibração do dosímetro Fricke

Na calibração do dosímetro Fricke, estabelecido como dosímetro de referência para este trabalho, foi utilizado um suporte com três (3) posições, onde foram efetuadas medições com a câmara de grafite do tipo dedal, fabricada pela Nuclear Enterprises, modelo 2561, número de série 264, calibrada no BIPM em 17/05/2002 em ^{60}Co em água (apêndice 2). O posicionamento da câmara, sem a capa de “build-up”, acabou por gerar um espaço entre o corpo do fantoma e a superfície da câmara, pois o suporte tem os pontos (orifícios, conforme figura 4.5) com diâmetro de 14 mm e a câmara com diâmetro de 8,8 mm. Este espaço ocupado por uma camada de ar, constitui uma descontinuidade entre o fantoma e a câmara, já tratado na secção 2.3.2 do capítulo 2, para efeito de cálculo da dose, ou para correções no cálculo da dose absorvida. No caso das nossas medições, não fizemos nenhuma correção devido ao fato da câmara estar dentro do fantoma equivalente a água e a camada de ar entre o fantoma e o dosímetro ser de apenas 2,6 mm.

5.2.1 – Calibração nas três (3) posições de irradiação

De acordo com o procedimento descrito no item 4.2.1, foram calibrados os pontos para irradiação do dosímetro Fricke, com a câmara padrão calibrada no BIPM. Os dados de irradiação estão na tabela 5.3:

Tabela 5.3 – Condições de irradiação na calibração com a câmara de grafite do LNMRI

Descrição	
Data	09/03/2004
Meia-vida (^{60}Co)	1925,5 dias
Distância fonte-câmara:	1,0 m
Tamanho de campo:	0,10x0,10 m ²
Umidade relativa do ar:	50 %

Os dados das respectivas medições, nas posições direita, centro e esquerda em relação ao cabeçote de blindagem da fonte de ^{60}Co são apresentados nas tabelas 5.4, 5.5 e 5.6.

Tabela 5.4 – Medições na posição direita no fantoma de “mix-D” no arranjo experimental do LNMRI

Posição direita						
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (C)	P (kPa)	Taxa de leitura(ue/min)	Taxa de dose na água (mGy.min ⁻¹)	
64,305	30,23	20,9197	101,153	28,3424	290,5180 ± 3.2565	
64,098	30,25	20,8954	101,151	28,4509	291,6307 ± 3.2689	
64,110	30,26	20,8839	101,152	28,4536	291,6582 ± 3.2692	
64,278	30,34	20,8810	101,152	28,4540	291,6621 ± 3.2693	
64,047	30,23	20,8793	101,152	28,4529	291,6511 ± 3.2692	
64,010	30,23	20,8978	101,152	28,4711	291,8380 ± 3.2713	
Média					291,4930 ± 3.2674	
ND,w (mGy/ue)					10,2503	
Incerteza padrão					0,5605	
Incerteza padrão expandida para k=2 (95,45%)					1,121	

Tabela 5.5 – Medições na posição centro no fantoma de “mix-D” no arranjo experimental do LNMRI

Posição centro						
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (C)	P (kPa)	Taxa de leitura(ue/min)	Taxa de dose na água (mGy.min ⁻¹)	
66,416	30,22	20,8120	101,207	27,4078	280,9381 ± 3.1264	
66,443	30,23	20,7846	101,206	27,4034	280,8935 ± 3.1259	
66,616	30,32	20,7643	101,204	27,4123	280,9843 ± 3.1269	
66,664	30,35	20,7506	101,202	27,4189	281,0522 ± 3.1277	
66,539	30,28	20,7436	101,200	27,4069	280,9296 ± 3.1263	
66,428	30,24	20,7406	101,198	27,4167	281,0300 ± 3.1274	
Média					280,9713 ± 3.1268	
ND,w (mGy/ue)					10,2503	
Incerteza padrão					0,5564	
Incerteza padrão expandida para k=2 (95,45%)					1,113	

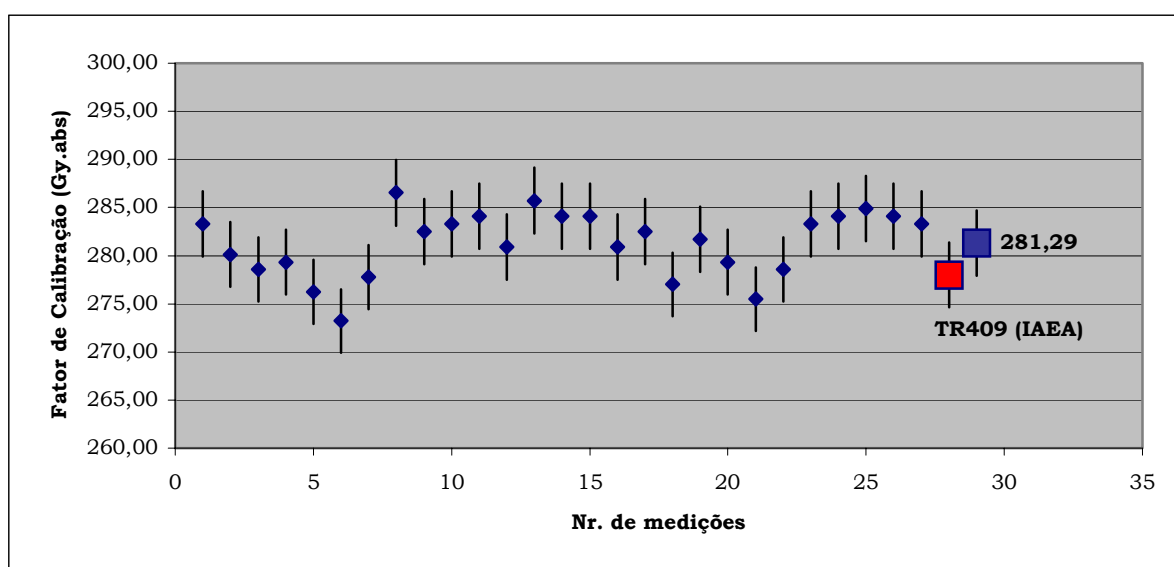
Tabela 5.6 – Medições na posição esquerda no fantoma de “mix-D” no arranjo experimental do LNMRI

Posição esquerda						
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (C)	P (kPa)	Taxa de leitura(ue/min)	Taxa de dose na água (mGy.min ⁻¹)	
65,402	30,20	20,8303	101,186	27,8218	285,1819 ± 3.1805	
65,873	30,43	20,8066	101,181	27,8324	285,2903 ± 3.1817	
65,477	30,28	20,7522	101,169	27,8608	285,5819 ± 3.1849	
65,327	30,21	20,7541	101,166	27,8612	285,5862 ± 3.1850	
65,317	30,22	20,7569	101,164	27,8755	285,7329 ± 3.1866	
65,354	30,25	20,7681	101,159	27,8899	285,8796 ± 3.1883	
Média					285,5421 ± 3.1845	
ND,w (mGy/ue)					10,2503	
Incerteza padrão					0,5576	
Incerteza padrão expandida para k=2 (95,45%)					1,115	

Os resultados obtidos com a câmara padrão secundário do LNMRI, demonstram que a opção de se realizar as medições com as respectivas taxas de dose em cada ponto foi a mais acertada, ao invés de se utilizar um valor médio. A dose média resultaria em incertezas superiores a 1,5 % no resultado final da obtenção do fator de calibração para o dosímetro Fricke e nos demais dosímetros.

5.2.2 – Irradiação do dosímetro Fricke no “arranjo experimental” calibrado (obtenção do fator de calibração para o dosímetro Fricke)

As irradiações do dosímetro Fricke foram realizadas no “arranjo experimental” calibrado com a câmara padrão do LNMRI, descrita previamente no item 4.2.2, e consistiu de uma série de medições, nas respectivas posições com doses variando de 50 a 350 Gy. No total foram realizadas 27 medições nas duas fontes. Como o dosímetro Fricke possui resposta linear da relação “Dose X Absorbância”, as calibrações podem ser realizadas ponto a ponto ou com a construção de curva de resposta, de acordo com a equação 4.1. Como a resposta do dosímetro é linear, para se determinar o valor de calibração as duas metodologias são válidas. Na figura 5.3 pode-se observar a determinação do valor do fator de calibração “ $F_{cFricke}$ ” através da média das inclinações ponto a ponto, ou através da utilização dos 27 pontos para com a construção da curva de resposta da figura 5.5. A equação 5.2, já com o fator de calibração, é utilizada então para as medições de dose com o dosímetro Fricke rastreado ao LNMRI.



* O fator de calibração está apresentado em “Gy.abs”, para não confundir com a grandeza dose absorvida, uma vez que a unidade de absorbância é adimensional.

Fig. 5.3 – Fator de calibração para o dosímetro Fricke

Tabela 5.7 – Resultados das medições com dosímetros Fricke

Medição nr.	Dose (Gy)	Abs. 304 nm	F _{cFricke} (Gy.abs)	Medição nr.	Dose (Gy)	Abs. 304 nm	F _{cFricke} (Gy.abs)
01	100,0	0,344	283,29	16	200,0	0,720	280,90
02	100,0	0,347	280,11	17	200,0	0,698	282,49
03	100,0	0,347	278,55	18	200,0	0,708	277,01
04	101,2	0,363	279,33	19	272,5	0,975	281,69
05	101,2	0,361	276,24	20	275,4	0,993	279,33
06	102,8	0,373	273,22	21	277,0	0,983	275,48
07	102,8	0,367	277,78	22	279,8	0,995	278,55
08	104,9	0,373	286,53	23	282,7	0,997	283,29
09	104,9	0,372	282,49	24	285,6	1,013	284,09
10	117,7	0,428	283,29	25	337,2	1,233	284,90
11	119,6	0,426	284,09	26	342,7	1,224	284,09
12	122,1	0,438	280,90	27	349,7	1,240	283,29
13	150,0	0,529	285,71				
14	150,0	0,534	284,09				
15	150,0	0,541	284,09				
				Valor médio			
				F_{cFricke} = 281,29 ± 3,52 Gy.abs			

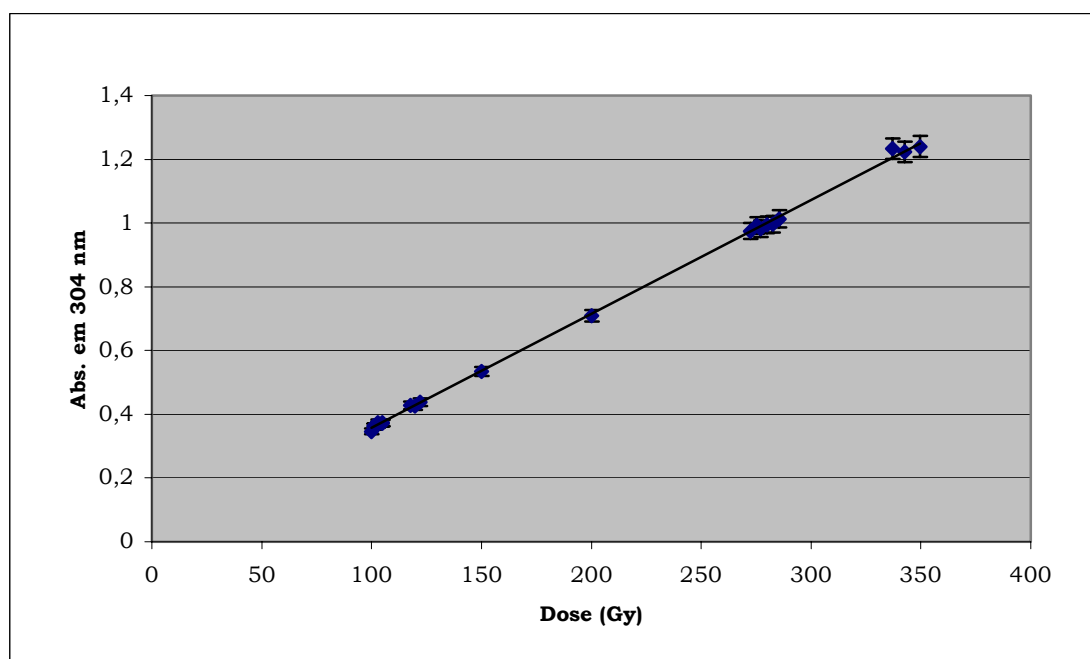


Fig. 5.4 – Curva de resposta do dosímetro Fricke em 304 nm por espectrofotometria

O fator de calibração determinado é estatisticamente igual ao valor encontrado no TR409 – IAEA [2002], onde o valor da dose com o dosímetro Fricke calibrado é $D \text{ (Gy)} = 278. \Delta\text{Abs.}$

Com o valor do fator de calibração determinado para o dosímetro Fricke, as medições da dose absorvida podem ser determinadas de acordo com a equação 5.2.

$$D_{Fricke} = \frac{F_{cFricke} \Delta abs}{[1 + 0,007.(T - 25)][1 + 0,0015.(T' - 25)]} \quad (5.2)$$

Onde:

D_{Fricke} = Dose absorvida (Gy)

$F_{cFricke}$ = **Fator de calibração Fricke é 281,29 Gy.ΔAbs** (a absorbância é adimensional, e foi incluída no fator de calibração para não confundir com a unidade da grandeza “Dose Absorvida”)

Δabs = Redução na absorbância em 304 nm

T = Temperatura de medição

T' = Temperatura de irradiação

Tabela 5.8 – Incerteza estimada para a calibração do dosímetro Fricke

Incertezas na calibração do dosímetro Fricke		
Fonte de incerteza	Tipo A (%)	Tipo B (%)
Fator de calibração da câmara NE 2561		0,56
Posicionamento da câmara		0,20
Taxa de dose absorvida em água		0,20
Decaimento da fonte		0,01
Posicionamento dos dosímetros		0,20
Correção da temperatura de irradiação		0,15
Correção da temperatura de medição		0,35
Repetibilidade das medições do dosímetro	0,996	
Incerteza combinada separada	0,996	0,76
Incerteza combinada padrão	1,253	
Incerteza relativa expandida (95,45%)	2,506 %	

* A incerteza combinada é igual a raiz quadrada da soma quadrática de todas as incertezas do tipo A e B com a câmara padrão e de repetibilidade do fator de calibração do dosímetro.

5.3 - Irradiação no “arranjo experimental” no irradiador Gammacell

Como descrito no item 4.3, para a calibração de dosímetros que respondem na faixa de dose superior, de 1 a 50 kGy, considerado como altas doses, há a necessidade de se ter uma fonte com maior atividade, exigindo menores tempos de irradiação. Para ^{60}Co , o equilíbrio eletrônico equivale ao alcance médio dos elétrons secundários mais energéticos produzidos por fótons de 1,33 MeV, que no caso de um meio equivalente à água, é da ordem de $0,5 \text{ g.cm}^{-2}$ de material.

5.3.1 - Determinação da dose de trânsito

A medição da dose de trânsito foi realizada com sucessivas subidas e descidas do eixo do irradiador (N_i) para se atingir a faixa de dose mensurável do dosímetro, que no caso do irradiador da UFRJ-LIN foi estimada em um número igual a 20 repetições, utilizando-se o dosímetro Fricke para avaliação, de acordo com a equação 4.2. A dose de trânsito medida para o gammacell foi de: **$D_{\text{trans.}} = 5,31 \pm 0,14 \text{ (Gy)}$** em 31/5/2005, para uma operação de descida e subida da câmara de irradiação (eixo do irradiador).

5.3.2 – Calibração no “arranjo experimental” com dosímetro Fricke

Foram utilizados dosímetros Fricke, já rastreados e calibrados ao LNMRI, para a calibração dos cinco (5) pontos no “set-up” como mostra a figura 4.8, e que foram colocados no interior da câmara do irradiador “Gammacell”, e através de uma guia na base do cilindro como referência de posicionamento, puderam ser reproduzidas as medições por diversas vezes sem alteração de posicionamento como mostram as figuras 4.8 e 4.9. Foram realizadas 4 calibrações em 2002, 2004 e

2005, com 5 medições para cada ponto em cada data, resultando em uma média que foi corrigida pelo decaimento da fonte para a data de referência de 29/08/2005, como mostra a tabela 5.7.

Tabela 5.9 – Resultados da calibração no Gammacell

Posição no set-up	Taxa de dose média (Gy.min ⁻¹)	Desvio Padrão (Gy.min ⁻¹)	Incerteza combinada (1,58 %) (Gy.min ⁻¹)	Incerteza expandida a 95,45% (Gy.min ⁻¹)
Ponto I	59,97	0,53	0,95	1,90
Ponto II	66,41	0,47	1,05	2,10
Ponto III	66,78	0,29	1,06	2,12
Ponto IV	65,87	0,97	1,04	2,08
Ponto V	65,94	0,80	1,05	2,10

Com os pontos calibrados no “Gammacell”, tem-se possibilidades de desenvolver e calibrar novos sistemas de medições, principalmente de dosímetros para altas doses.

5.4 - Calibração do dosímetro de Dicromato de Prata

Com a calibração de cinco (5) pontos no irradiador “Gammacell” descrita no item 4.3 com os dosímetros de referência “Fricke”, pôde-se calibrar os dosímetros de dicromato de prata (faixa de dose operacional de 1 – 12 kGy), através da construção da curva de resposta Abs. X Dose. Foram irradiados 125 dosímetros entre 1.0 e 8.3 kGy para construção das curvas de resposta e calibração. Na figura 5.5, pode-se observar uma das curvas de resposta “Dose X Absorbância” do Ponto I do “set-up” de irradiação do Gammacell.

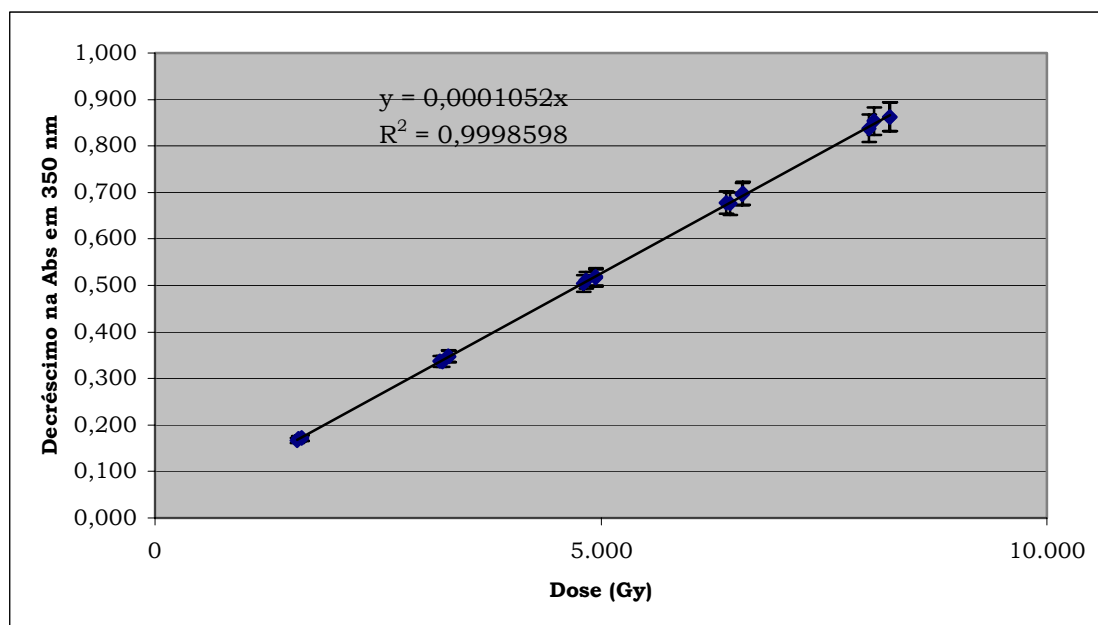


Figura 5.5 – Curva de resposta do dosímetro de dicromato de prata no Ponto I do Gammacell

As 125 medições realizadas, corresponderam a construção de 5 curvas com 5 pontos em cada curva, resultando em 25 curvas e conseqüentemente 25 medições do fator de calibração, cujo valores são apresentados na tabela 5.10 e figura 5.6.

Tabela 5.10 – Resultados da determinação do fator de calibração para o dosímetro de dicromato de prata

Posição no set-up	Fator de calibração ($F_{cal. (Ag_2Cr_2O_7)}$)	Incerteza combinada (1,71 %)	Incerteza expandida a 95,45%
Ponto I	9474,95	162,02	324,04
Ponto II	9516,61	162,73	325,47
Ponto III	9575,80	163,75	327,49
Ponto IV	9622,59	164,55	329,09
Ponto V	9584,02	163,89	327,77
Média	9554,80	163,39	326,77

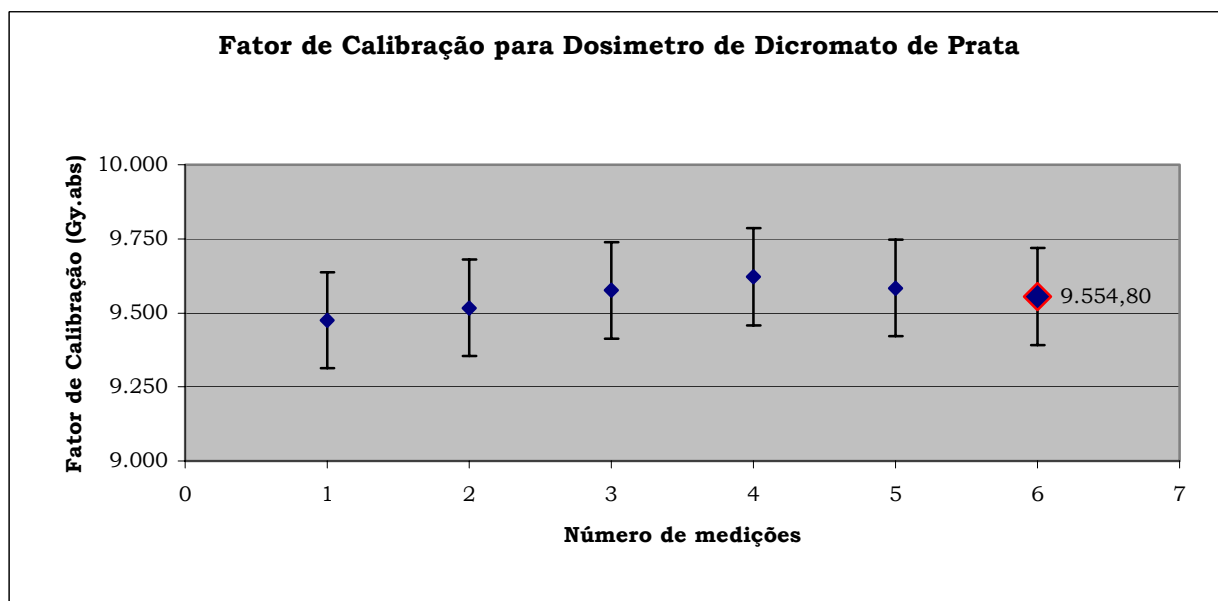


Figura 5.6 – Fator de calibração para dosímetro de dicromato de prata

Com o sistema dosimétrico calibrado, a dose pode ser medição por:

$$D_i = F_{cal(Ag_2Cr_2O_7)} \frac{\Delta abs_i}{[1 + 0,001.(T - 25)]. [1 + 0,002.(T^2 - 25)]} \quad (5.3)$$

Onde:

D_i = Dose absorvida de uma medição com o dosímetro de dicromato de prata (Gy)

$F_{cal.(Ag_2Cr_2O_7)}$ = Fator de calibração para o dosímetro de dicromato de prata na planta de irradiação

Δabs_i = Resposta da medição no espectrofotômetro em absorbância

$T = [1 + 0,001.(T - 25)]$ = Correção para temperatura da solução de medição

$T^2 = [1 + 0,002.(T^2 - 25)]$ = Correção para temperatura de irradiação

Tabela 5.11 – Incerteza estimada para o dosímetro de Dicromato de Prata

Incertezas na calibração do dosímetro de Dicromato de Prata		
Fonte de incerteza	Tipo A (%)	Tipo B (%)
Fator de calibração do dosímetro Fricke		1,25
Calibração do Gammacell		0,94
Decaimento da fonte		0,01
Correção da temperatura de irradiação		0,20
Correção da temperatura de medição		0,10
Posicionamento dos dosímetros		0,20
Repetibilidade das medições do dosímetro de dicromato de prata	0,53	
Incerteza combinada separada	0,53	1,59
Incerteza combinada padrão	1,68	
Incerteza relativa expandida (95,45%)	3,36 %	

O dosímetro de dicromato de prata apresenta características que o coloca disponível para ser utilizado como dosímetro de transferência, com incerteza expandida para $k=2$, entre 3 – 5 %.

Comparado com os resultados de Thomassen, J. [1985], observou-se que apesar do dosímetro de dicromato de prata apresentar excelente linearidade de resposta à calibração, há uma diferença referente ao fator de calibração devido ao desvio de resposta do espectrofotômetro após reparação de limpeza dos filtros e troca de lâmpada, mas que não compromete o resultado das medições uma vez que o sistema está rastreado ao dosímetro de referência Fricke.

5.5 - Calibração do dosímetro de Dicromato de Potássio

O dosímetro de dicromato de potássio visa atender uma faixa de dose que complete com o dosímetro Fricke e o dosímetro de dicromato de prata, quase que 100% de toda a faixa de processamento de produtos, conforme a tabela 1. Foram irradiados 60 dosímetros entre 3,0 e 49,0 kGy para construção da curva de resposta e calibração. Na figura 5.7, pode-se observar a curva de resposta para o dosímetro de dicromato de

potássio referentes aos resultados da tabela 5.12, e na figura 5.8, o respectivo fator de calibração.

Tabela 5.12 – Resultados das medições com dosímetros de Dicromato de Potássio

Dose (Gy)	$\Delta_{\text{abs a 440 nm}}$	Dose (Gy)	$\Delta_{\text{abs a 440 nm}}$	Dose (Gy)	$\Delta_{\text{abs a 440 nm}}$
2.922	0,041 ± 0,0007	19.506	0,311 ± 0,0052	35.302	0,562 ± 0,0094
2.962	0,063 ± 0,0011	19.856	0,341 ± 0,0057	35.433	0,593 ± 0,0099
3.210	0,035 ± 0,0006	21.427	0,334 ± 0,0056	35.435	0,611 ± 0,0102
3.213	0,037 ± 0,0006	21.448	0,324 ± 0,0054	35.685	0,612 ± 0,0102
3.235	0,037 ± 0,0006	21.599	0,358 ± 0,0060	35.887	0,613 ± 0,0102
3.254	0,041 ± 0,0007	21.722	0,351 ± 0,0059	37.744	0,665 ± 0,0111
3.266	0,053 ± 0,0009	21.803	0,370 ± 0,0062	40.885	0,702 ± 0,0117
3.266	0,061 ± 0,0010	21.804	0,361 ± 0,0060	40.895	0,683 ± 0,0114
3.289	0,059 ± 0,0010	21.958	0,384 ± 0,0064	41.397	0,662 ± 0,0111
3.308	0,063 ± 0,0010	22.082	0,363 ± 0,0061	42.056	0,670 ± 0,0112
13.048	0,197 ± 0,0033	24.532	0,433 ± 0,0072	43.896	0,721 ± 0,0120
14.307	0,216 ± 0,0036	26.574	0,465 ± 0,0078	44.683	0,760 ± 0,0127
14.311	0,216 ± 0,0036	26.580	0,464 ± 0,0077	48.216	0,773 ± 0,0129
14.486	0,211 ± 0,0035	26.907	0,469 ± 0,0078	48.264	0,774 ± 0,0129
14.629	0,244 ± 0,0041	27.335	0,476 ± 0,0079	48.605	0,782 ± 0,0131
14.717	0,210 ± 0,0035	31.701	0,526 ± 0,0088	48.882	0,786 ± 0,0131
16.069	0,250 ± 0,0042	32.269	0,571 ± 0,0095	49.063	0,823 ± 0,0137
16.084	0,253 ± 0,0042	34.821	0,559 ± 0,0093	49.065	0,823 ± 0,0137
16.198	0,245 ± 0,0041	34.856	0,555 ± 0,0093	49.411	0,841 ± 0,0140
16.290	0,258 ± 0,0043	35.102	0,556 ± 0,0093	49.692	0,841 ± 0,0140

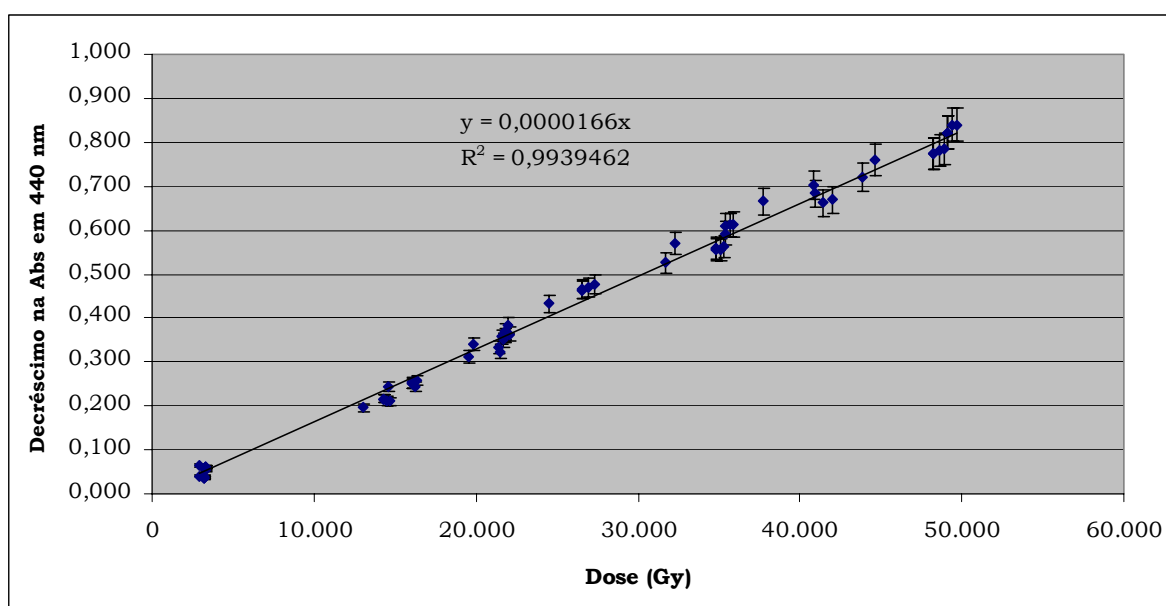


Figura 5.7 – Curva de resposta do dosímetro de Dicromato de Potássio

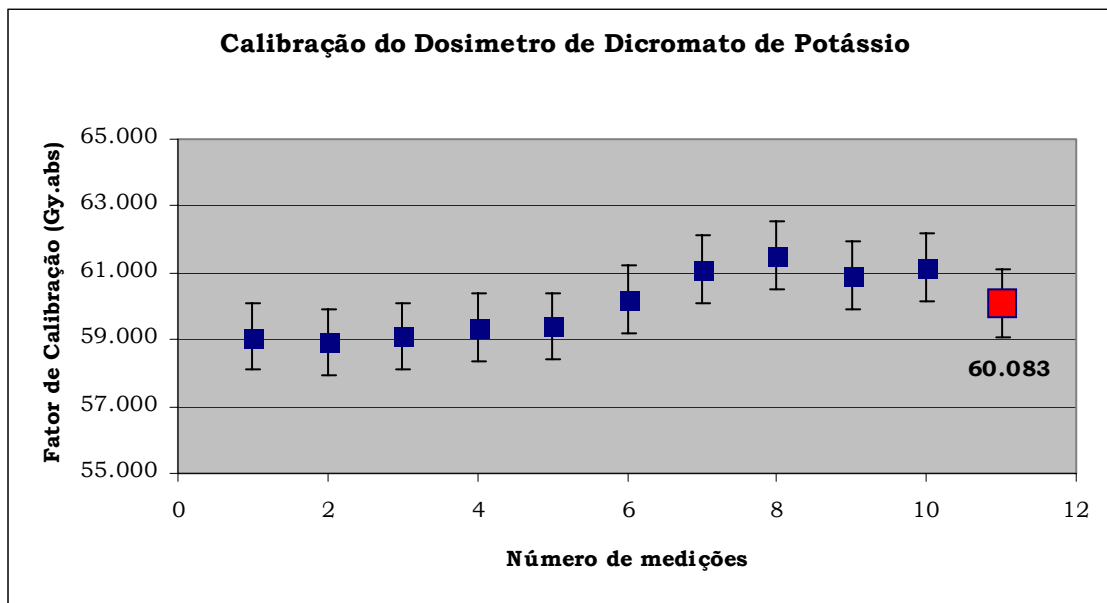


Figura 5.8 – Fator de calibração para o dosímetro de dicromato de Potássio

Comparado com os resultados de Sharp et al [1982], observou-se que apesar do dosímetro de dicromato de potássio apresentar boa linearidade de resposta à calibração, há uma diferença referente ao fator de calibração devido ao desvio de resposta do espectrofotômetro após reparação de limpeza dos filtros e troca de lâmpada, mas que não compromete o resultado das medições uma vez que o sistema está rastreado ao dosímetro de referência Fricke.

Com o sistema dosimétrico calibrado, a dose pode ser medição por:

$$D_i = F_{cal(k2Cr2O7)} \frac{\Delta abs_i}{[1+0,001.(T-25)][1+0,002.(T'-25)]} \quad (5.4)$$

Onde:

D_i = Dose absorvida de uma medição com o dosímetro de dicromato de prata (Gy)

$F_{cal. (k2Cr2O7)}$ = Fator de calibração para o dosímetro de dicromato de prata na planta de irradiação (Gy. Δabs_i)

Δabs_i = Resposta da medição no espectrofotômetro em absorbância

$T = [1 + 0,001.(t-25)]$ = Correção para temperatura da solução de medição

$T' = [1 + 0,002.(t'-25)]$ = Correção para temperatura de irradiação do dosímetro

Tabela 5.13 – Incerteza estimada para o dosímetro de Dicromato de Potássio

Incertezas na calibração do dosímetro de Dicromato de Potássio		
Fonte de incerteza	Tipo A (%)	Tipo B (%)
Fator de calibração do dosímetro Fricke		1,25
Calibração do Gammacell		0,94
Decaimento da fonte		0,01
Correção da temperatura de irradiação		0,20
Correção da temperatura de medição		0,10
Posicionamento dos dosímetros		0,20
Repetibilidade das medições do dosímetro de dicromato de prata	1,67	
Incerteza combinada separada	1,67	1,59
Incerteza combinada padrão	2,31	
Incerteza relativa expandida (95,45%)	4,62 %	

O dosímetro de dicromato de potássio apresenta características que o coloca disponível para ser utilizado como dosímetro de transferência, com incerteza expandida para $k=2$, entre 3 – 5 %.

5.6 - Calibração do dosímetro de Dicromato de Prata em instalação de grande porte

Como já foi discutida no item 4.6, a calibração do sistema de medição consiste em realizar um conjunto de medições para se ter a garantia da qualidade da medição de dose com os equipamentos envolvidos na sua avaliação. Neste sentido, são avaliadas as capacidades de medição dos dosímetros químicos na própria instalação. Os primeiros testes foram realizados no espectrofotômetro da empresa Embrarad – SP, para se ter uma noção da possibilidade de utilização do espectrofotômetro no qual se faz as medições do dosímetro de PMMA.

5.6.1 – Avaliação da resposta do espectrofotômetro do operador

Foi elaborada uma curva de resposta do espectrofotômetro Micronal B442 com as soluções padrão de dicromato de potássio do item 4.6. Na

tabela 5.14, pode-se observar a comparação com o valor reportado por Ellis et al [1980].

Tabela 5.14 – Resultado medição de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 350 nm no espectrofotômetro da instalação (Embrarad)

Curva N°	Data	inclinação curva de resposta em 350 nm	Correlação (r^2)
1	Jun 00	0,01011	0,99994
* Refer.: Ellis et al.		0,01072	1,00000

A resposta do equipamento é linear, demonstrando qualidade para este tipo de medição, muito embora o acompanhamento a longo prazo deva ser realizado para se testar a estabilidade.

5.6.2 – Curva da calibração do dosímetro de dicromato de potássio com o espectrofotômetro do operador

Utilizando o irradiador Gammacell, foram irradiados doze dosímetros com doses entre 1,05 e 6,37 kGy para construção da curva de resposta e fator de calibração.

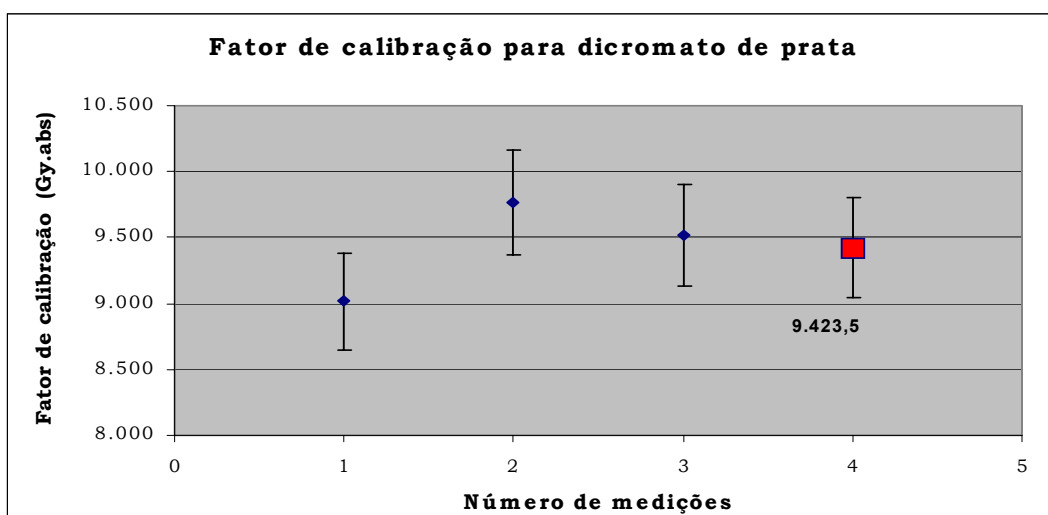


Figura 5.9 – Fator de calibração para o dosímetro de dicromato de Prata

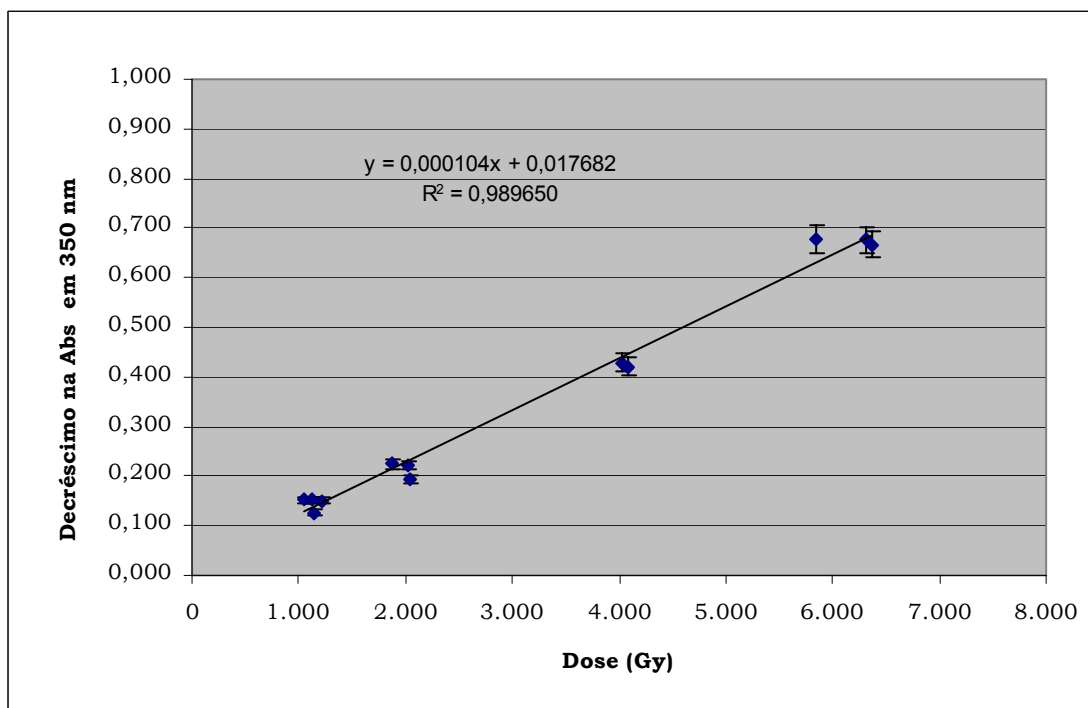


Figura 5.10 – Curva de resposta para o dosímetro de dicromato de Prata no operador

Com o sistema dosimétrico calibrado a dose pode ser medida por:

$$D_i = F_{cal(Ag_2Cr_2O_7)} \frac{\Delta abs_i}{[1 + 0,001.(T - 25)]. [1 + 0,002.(T' - 25)]} \quad (5.5)$$

Onde:

D_i = Dose absorvida de uma medição com o dosímetro de dicromato de prata (Gy)

$F_{cal. (Ag_2Cr_2O_7)}$ = Fator de calibração para o dosímetro de dicromato de prata na planta de irradiação (Gy.abs)

Δabs_i = Resposta da medição no espectrofotômetro em absorbância

$T = [1 + 0,001.(T - 25)]$ = Correção para temperatura da solução de medição

$T' = [1 + 0,002.(T' - 25)]$ = Correção para temperatura de irradiação do dosímetro

Tabela 5.15 – Incerteza estimada para o dosímetro de Dicromato de Prata calibrado na planta de irradiação

Incertezas na calibração do dosímetro de Dicromato de Prata na planta		
Fonte de incerteza	Tipo A (%)	Tipo B (%)
Fator de calibração do dosímetro Fricke		1,25
Calibração do Gammacell		0,94
Decaimento da fonte		0,01
Correção da temperatura de irradiação		0,20
Correção da temperatura de medição		0,10
Posicionamento dos dosímetros		0,20
Repetibilidade das medições do dosímetro de dicromato de prata	4,07	
Incerteza combinada separada	4,07	1,59
Incerteza combinada padrão	4,37	
Incerteza relativa expandida (95,45%)	8,74 %	

* A incerteza combinada é igual a raiz quadrada da soma quadrática de todas as incertezas do tipo A e B com a câmara padrão, o dosímetro Fricke, o irradiador Gammacell e da repetibilidade do fator de calibração do dicromato de prata no espectrofotômetro da instalação.

Os resultados obtidos nesta calibração sugerem que o dosímetro pode ser utilizado para medições de rotina em irradiadores de grande porte como controle de qualidade, pois o nível de incerteza encontrado é compatível com o dosímetro PMMA utilizado neste tipo de medições. A precisão nominal para dosímetros de PMMA com precisão de 1σ é da ordem de 5%, segundo McLaughling,[1989]. A utilização de um espectrofotômetro com maior qualidade pode resultar, em medições com níveis de incertezas um pouco mais baixa.

5.6.3 – Comparação com dosímetros de PMMA

Os resultados obtidos desta comparação podem ser observados na tabela 5.16, onde pode-se observar que os valores de dose são estatisticamente iguais para o nível de incerteza para este tipo de

medição. Para o dosímetro de PMMA, com $k=1$, pode-se esperar incertezas da ordem de 5 % e para o dosímetro de dicromato de prata tratado na seção 5.6, para $k=1$, o nível de incerteza é da ordem de 4,37%.

Tabela 5.16 – Comparação dosímetro de dicromato de prata e PMMA

Posição de irradiação	Dicromato de potássio Dose (Gy)	PMMA Dose (Gy)	Dicromato PMMA
A1	1.839,6	1,900 ± 95	0,959
A2	1.865,0		
A3	1.763,0		
	1.822,6 ± 53,1		
B1	2.892,3	3,100 ± 155	0,941
B2	3.001,5		
B3	2.855,8		
	2.916,6 ± 75,8		
C1	4.881,2	4.800 ± 240	1,020
C2	4.983,1		
C3	4.822,9		
	4.895,7 ± 81,1		
D1	6.717,1	6.600 ± 330	1,023
D2	6.789,9		
D3	6.753,5		
	6.753,5 ± 36,4		

5.7 - Calibração do dosímetro Fricke no CDTN

Como no item 5.6, são avaliadas as capacidades de medição dos dosímetros químicos na própria instalação. No caso específico desta planta, a calibração de um ponto de irradiação para desenvolvimento de novas metodologias e controle de qualidade permite à planta de irradiação mais independência e flexibilidade nas operações de pesquisa, rotina e prestação de serviços.

5.7.1 – Avaliação da resposta do espectrofotômetro

Foi elaborada uma curva de resposta do espectrofotômetro com as soluções padrão de dicromato de potássio do item 4.6. O equipamento

utilizado foi um espectrofotômetro UV-VIS do fabricante Shimadzu, modelo: UV-2401 PC, com uma faixa de medição de 190 nm a 800 nm.

Tabela 5.17 – Resultados das medições de soluções padrão de $K_2Cr_2O_7$ em 313 nm e 350 nm no espectrofotômetro do CDTN

Curva Nº	Data	inclinação curva de resposta em 313 nm	Correlação (r^2)
1	Nov 05	0,00474	0,99972
* Refer.: Ellis et al.		0,00483	1,00000
		inclinação curva de resposta em 350 nm	
1	Nov 05	0,01042	0,99971
* Refer.: Ellis et al.		0,01072	1,00000

5.7.2 – Irradiação do dosímetro Fricke no “Gammacell” calibrado (fator de calibração para o dosímetro Fricke no CDTN)

As irradiações do dosímetro Fricke foram realizadas no “Gammacell” calibrado, descrita previamente no item 5.4, e consistiu de uma série de medições, nas respectivas posições com doses variando de 50 a 350 Gy. No total foram realizadas 20 medições no Gammacell calibrado da UFRJ-LIN, sendo cinco diferentes doses para cada um dos cinco pontos calibrados, descritos nos itens 4.3 e 5.3. Na figura 5.4 pode-se observar a determinação do valor do fator de calibração “ $F_{cFricke}$ ” através da média das inclinações das curvas em cada posição no “set-up” do irradiador.

Tabela 5.18 – Resultados da calibração do dosímetro Fricke no CDTN

Resultado Final	
Ponto de irradiação No gammacell	$F_{calFricke}$ (Gy.abs)
1	266,10
2	272,87
3	Fora do intervalo
4	272,78
5	270,05
Média	270,45
±	±
Desvio Padrão	3,18

Na figura 5.11, pode-se observar os valores determinados comparados com o valor de referência da IAEA-TR409.

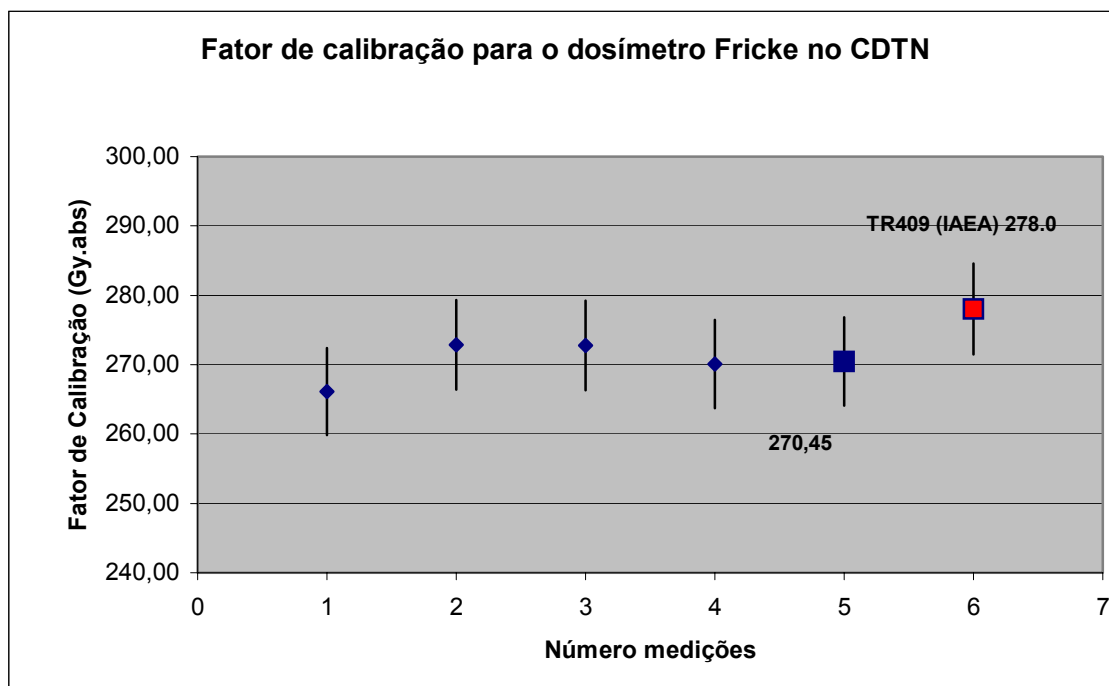


Fig. 5.11 – Fator de calibração para dosímetro Fricke no CDTN

O fator de calibração determinado é válido para medições deste tipo, rastreado ao padrão nacional, mas não é estatisticamente igual ao valor encontrado no TR409 – IAEA [2002], onde o valor da dose com o dosímetro Fricke calibrado é $D \text{ (Gy)} = 278.\Delta\text{abs}$, ultrapassando o limite de $k=2$ para efeito comparativo. As incertezas para o fator de calibração podem ser observadas na tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Incerteza estimada para a calibração do dosímetro Fricke no CDTN

Incertezas no fator de calibração do dosímetro Fricke CDTN		
Fonte de incerteza	Tipo A (%)	Tipo B (%)
Dose no irradiador Gammacell		1,58
Repetibilidade na determinação do Fator de calibração do dosímetro Fricke	1,18	
Taxa de dose absorvida em água		0,20
Decaimento da fonte		0,01
Correção da temperatura de irradiação		0,15
Correção da temperatura de medida		0,70
Incerteza combinada separada	1,18	1,75
Incerteza combinada padrão	2,11	
Incerteza relativa expandida (95,45%)	4,22	

O resultado obtido com a calibração do dosímetro Fricke nas condições já descritas, indica que o sistema dosimétrico pode ser utilizado como dosímetro de transferência. Para ser utilizado como dosímetro de referência, a calibração deve ser realizada em um arranjo experimental rastreado ao padrão nacional, obtendo-se um fator de calibração estatisticamente compatível ao valor encontrado no TR409 – IAEA [2002] e nível de incerteza para esta classe de dosímetro, entre 2 e 3% para $k=1$.

5.7.3 – Calibração de pontos de irradiação em fantoma de água no irradiador multipropósito

Os trabalhos foram realizados no CNEN-CDTN-MG, na planta de irradiação com as seguintes características: **Planta Tipo:** multipropósitos, com geometria de exposição panorâmica, equipada com fonte de ^{60}Co armazenada a seco; **Fabricante:** MDS Nordion; **Atividade:** 2.220 TBq (60.000 Curies); **Sistema de carregamento de produtos:** manual. Foi utilizado um phantom de água (estrutura em PMMA), de acordo com a figura 5.12, com três (3) posições de irradiação (foram utilizadas 2 posições, pois uma delas apresentou problemas).

5.7.3.1- Determinação da dose de trânsito

A medição da dose de trânsito é realizada com sucessivas subidas e descidas da fonte do irradiador (N_i) para se atingir a faixa de dose mensurável do dosímetro, estimada em um número igual a 10 repetições, sem a parada da fonte, utilizando-se o dosímetro Fricke. As respectivas doses de transito foram: $D_{trans.}$ (ponto 01) = $2,48 \pm 0,11$ (Gy) em 24/11/2005 e $D_{trans.}$ (ponto 02) = $2,46 \pm 0,10$ (Gy) em 24/11/2005.

5.7.2.2 - Calibração e determinação de incertezas no fantoma

Foram realizadas quatro (4) irradiações de 15 minutos com os dosímetros Fricke nos pontos 01 e 02 do fantoma de água.

Tabela 5.20 – Calibração e avaliação de incertezas do PONTO 01 do fantoma no irradiador do CDTN

Calibração e avaliação de incertezas do PONTO 01 do fantoma no irradiador do CDTN					
Calibração			Incertezas		
Nr. irradiação	Δ_{abs}	Dose (Gy)	Fonte de incerteza	Tipo A (%)	Tipo B (%)
01	0,778	211,48	Fator de calibração do dosímetro Fricke		2,11
02	0,775	210,65	Taxa de dose absorvida em água		0,20
03	0,773	210,10	Decaimento da fonte		0,01
04	0,775	210,65	Correção da temperatura de irradiação		0,15
Dose média	210,72	Correção da temperatura de medida			0,35
		Repetibilidade no posicionamento dos dosímetros no irradiador CDTN		0,27	
Incerteza (94,45%)	$\pm 9,15$	Incerteza combinada separada		0,27	2,15
		Incerteza combinada padrão		2,17	
		Incerteza relativa expandida (95,45%)		4,34	

Tabela 5.21 – Calibração e avaliação de incertezas do PONTO 02 do fantoma no irradiador do CDTN

Calibração e avaliação de incertezas do PONTO 02 do fantoma no irradiador do CDTN					
Nr. irradiação	Calibração		Incertezas		
	Δ_{abs}	Dose (Gy)	Fonte de incerteza	Tipo A (%)	Tipo B (%)
01	0,767	211,81	Fator de calibração do dosímetro Fricke		2,11
02	0,773	213,47	Taxa de dose absorvida em água		0,20
03	0,769	212,36	Decaimento da fonte		0,01
04	0,770	212,64	Correção da temperatura de irradiação		0,15
05	0,776	214,30	Correção da temperatura de medida		0,35
Dose média		212,91	Repetibilidade no posicionamento dos dosímetros no irradiador CDTN	0,47	
Incerteza (94,45%)		$\pm 9,37$	Incerteza combinada separada	0,47	2,15
			Incerteza combinada padrão	2,20	
			Incerteza relativa expandida (95,45%)	4,40	

Os resultados obtidos para os pontos 1 e 2 no fantoma, indicaram que as medições das respectivas taxas de dose estão compatíveis com os níveis de incerteza para efeito de calibração e desenvolvimento de dosímetros de rotina, e que uma calibração com um dosímetro de referência como o Fricke, rastreado ao padrão nacional, pode resultar um níveis de incerteza ainda menores, garantindo uma melhor qualidade nas medições de dose absorvida na planta multipropósito.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

CONCLUSÕES: Os resultados obtidos demonstram que os dosímetros estudados apresentam qualidade para serem utilizados de acordo com a classe metrológica exigida. Desta forma, pode-se dizer que a metodologia aplicada é válida para que se estabeleça um laboratório padrão para medições de altas doses. Apesar de não ter sido estudado neste trabalho parâmetros de dependência das condições ambientais de irradiação (principalmente temperatura de irradiação, dependência energética, entre outros) para os dosímetros, há na literatura ampla documentação sobre cada um destes dosímetros, principalmente para utilização em irradiadores de grande porte com fonte de ^{60}Co , o que dispensa este tipo de estudo adicional [Mc Laughlin, W.L.; et al., 1989]. Outro ponto importante, é que com a qualidade apresentada, estes dosímetros de baixo custo, podem atender a requisitos de certificação e podem reduzir os custos com a dosimetria em instalações industriais para aproximadamente 20% do custo atual em medidas de rotina e procedimentos de validação, substituindo em grande parte os dosímetros importados de PMMA (Polimetilmetacrilato), dosímetro mais utilizado neste tipo de instalação. Em termos financeiros, quando nos procedimentos de rotina uma instalação de grande porte utiliza aproximadamente 1.000 a 1.200 dosímetros/mês, com custo aproximado de US\$ 3.00 a unidade, ela pode reduzir seus custos com dosimetria em aproximadamente US\$ 25,000.00 por ano.

Sob o ponto de vista legal, as normas brasileiras (CNEN – NN-3.01 e CNEN – NE-6.02) que regulamentam a utilização das radiações ionizantes no país, através do seu órgão regulador que é a Comissão Nacional de Energia Nuclear, não prevêm e não incluem a

rastreabilidade do sistema dosimétrico de instalações que prestam serviço ou fazem pesquisa nas aplicações nucleares.

SUGESTÕES: Sugere-se que a CNEN revise as normas mencionadas para que a rastreabilidade dos sistemas dosimétricos façam parte do licenciamento e operação de irradiadores industriais e de pesquisa, e com sistemas como os estudados neste trabalho que comprovaram qualidade metrológica, o LMNRI possa implementar um laboratório padrão nacional para manter a rastreabilidade da grandeza dose absorvida. Sugere-se ainda, que a rastreabilidade da grandeza dose absorvida deva ser mantida através de serviços de calibração como praticam os laboratórios NIST-USA, [Humpreys, J.C. et. Al, 1998]; e NPL-UK e programas de comparação interlaboratorial como o programa IDAS da IAEA.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

André Wallard, 2005 - “Confiança global através da Rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI)”. BIPM, 19/05/2005 <http://www.inmetro.gov.br/noticias/>- Dia Mundial da Metrologia - 20 de Maio de 2005

ASTM-E1400-95a - “Standard Practice for Characterization and performance of a High-Dose Radiation Dosimetry Calibration Laboratory” - 1997.

Attix, F.H.; Roesch, W.C.; “Radiation Dosimetry” - Volume 1 - Academic Press-NY - 1966.

Attix, F.H.; Roesch, W.C.; Tochilin, E. - “Radiation Dosimetry” - 2nd edn; Academic Press (1971).

Barrow, G. M., "Introduction to Molecular Spectroscopy", McGraw-Hill, New York, 1962.

Burke, R.W.; Madrodineanu, R.: “Certificate and use of acidic potassium dichromate solutions as an ultraviolet absorbance standard”. SRM 935. NBS Special Publication 260-54, 1-47, 1977.

Burlin, T.E.; A general theory of cavity ionization. J. Radiol., 1966.

Dainton, F.S.; “Chemical effects of Radiation” - University of Leeds - UK - Radiation Research Supplement 1, 1-25, 1959.

Draganic, I.G.; Draganic, Z.P.; - “The Radiation Chemistry of water” - New York Academic Press - 1971.

Ellis, S. C.; “The determination of Absorbed Dose Standard by Chemical Dosimetry – Mecanism and use of Fricke Dosemeter” NPL Report – Teddington – UK – 1980.

Ellis, S. C.; Barret, J.H.; Sharpe, P.H.G.; “Preliminary Report on an intercomparison of Fricke dosimetry systems”. NPL Report – Teddington – UK – 1980.

Ellis, S.; “The Dissemination of Absorbed Dose Standards by Chemical Dosimetry” – NPL- UK, 1974

Feist, H – “Determination of the absorbed dose to water for high-energy photons and electrons by total absorption of electrons in ferrous sulphate solution” - Phys. Med. Biol. 27, 1435-1447, 1982.

Humphreys, J.C.; Puhl, J.M.; Seltzer, S.M.; Mc Laughlin, W.; Desrosier, M.F.; Nagy, V.Y.; Bensen, D.L.; Walker, M.L., “Radiation Processing Dosimetry Calibration (Manual of Calibration Procedures)”, NIST Special Publication 250-45, 1998.

Humphreys, J.C.; Puhl, J.M.; Seltzer, S.M.; Mc Laughlin, W.; Desrosier, M.F.; Nagy, V.Y.; Bensen, D.L.; Walker, M.L., “Radiation Processing Dosimetry Calibration Services and Measurement Assurance Program” NIST Special Publication 250-44, 1998.

ICRU Report 14 – “Radiation Dosimetry: “X-rays and Gamma Rays with Photon Energies Between 0.6 and 50 MeV”, 1969.

ICRU Report 17 – “Radiation Dosimetry: “X-rays Generated at Potentials of 5 to 150 keV”, 1970.

IDAS – (Internacional Dose Assurance Service)

<http://www-naweb.iaea.org/nahu/dmrp/laboratory.asp>

ISOGUM95 - “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements” – First Edition – English - ISBN 92-67-10188-9 - International Organization for Standardization, 1995.

Matheson, M.S. and Dorfman, L.M.; “Pulse Radiolysis” – 1969 (Cambridge, Massachusetts: The MIT Press)

Mc Laughlin, W.L.; Boyd, A.W.; Chadwick, K.H.; McDonald, J.C.; Miller, A.: “Dosimetry for Radiation Processing” – Taylor & Francis – 1989.

MDS Nordion - 447 March Road, Ottawa, ON K2K 1X8, Canada
www.mds.nordion.com, 2005.

Nam, J.W. e Regula, D.F – “The significance of the International Dose Assurance Service for Radiation Processing” – Appl. Radiat. Isot. Vol. 40, No. 10-12, pp, 953-955, 1989

Ramos, M.M.O; Tauhata, L.; “Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante (Recomendações e definições)” - Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes Laboratório Designado pelo INMETRO – IRD/CNEN/MCT - Rio de Janeiro , 2002.

Sharpe, P.H.G.; Barret, J.H.; Berkley, A.M.; “Dichromate Solution as a Reference Dosimeter for use in Industrial Irradiation Plants”; Rep. NPL Report - RS(EXT)60, 1982.

Tauhata, L.; Almeida, E.S.; “Estatística, Teoria de Erros e Processamento de Dados” – IRD – CNEN, 1981.

Thomassen, J., “Silver Dichromate as a routine dosimeter in the range 1 to 12 kGy” – IAEA-SM-272/35 - Pag. 171 – 181, 1985.

TR 178 - Technical Reports Series no. 178 – IAEA, 1977.

TR 409 - Technical Reports Series no. 409 – IAEA – “Dosimetry for food irradiation”, 2002.

APÊNDICE 1

Mensagem do Diretor do BIPM Dr. André Wallard em maio de 2005.

“No dia 20 de maio de 1875, dezessete países fundaram a Convenção do Metro. A convenção é o segundo mais antigo tratado intergovernamental, tendo preparado o terreno para o que é hoje um sucesso de 130 anos de realizações e de sucesso no estabelecimento de uma infra-estrutura global de medição exata e rastreável. Atualmente, a Convenção reúne 51 membros, além de 17 países e economias associados à Conferência Geral de Pesos e Medidas.

Os primeiros membros da Convenção e o quadro de pessoal do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) começaram com o metro e o quilograma como padrões de referência. Entretanto, o trabalho da Convenção, hoje em dia, é extensivo a um número muito maior de padrões de medição internacionais, com presença marcante em áreas tão diversas quanto os padrões biológicos e de nanotecnologias.

Nós estamos celebrando o 20 de maio como um dia em que os metrologistas podem orgulhar-se de suas conquistas importantes, ainda que pouco divulgadas e pouco expostas. Eles podem olhar para um passado de sucesso e vislumbrar outros 130 ou mais anos de serviços prestados às áreas científica, técnica, comercial e social, na aplicação de medidas exatas e rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades (SI).

Esta mensagem do BIPM, que está no coração da metrologia mundial, é não apenas um desafio, mas também o reconhecimento da imensa contribuição de muitos milhares de metrologistas de todo o mundo.

O objetivo é também o de chamar a atenção dos governos dos países-membros e de outros países, bem como de instituições internacionais, para os benefícios de uma boa metrologia e dos enormes benefícios econômicos provenientes de seus investimentos. Muitos estudos apresentaram um benefício técnico-econômico muito significativo dos investimentos públicos em metrologia. Outro estudo, conduzido recentemente no Reino Unido, detectou que um investimento da ordem de 40 milhões de libras esterlinas traz um retorno superior a 5.0 bilhões de libras. Números semelhantes são aplicáveis a economias de todos os tamanhos ou estágios de desenvolvimento econômico. Os benefícios da metrologia tocam a todos nós, não importa a maneira de como se viva ou atue.

Metrologia é a ciência da medição, abrangendo tanto as medições teóricas como as experimentais, assim também como as determinações com qualquer nível de incerteza em qualquer área da ciência e da tecnologia. As mais intrincadas e invisíveis redes de serviços, fornecedores, e as comunicações das quais somos dependentes, confiam na metrologia para que possam operar com eficiência e confiabilidade.

O sucesso econômico dos países depende de nossa capacidade para fabricar e comercializar produtos e serviços que passaram por uma eficaz medição e uma série de testes. A metrologia é vital para os fabricantes, fornecedores e consumidores de produtos e serviços. Todos os grupos devem ter confiança na eficácia e credibilidade das medições feitas em todos os níveis de exatidão.

Um exemplo atual desse padrão internacional de padronização metrológica é a construção do Europeu Airbus A380, com partes sendo fabricadas no Reino Unido, na Espanha, na Alemanha e na França, sendo então transportadas para a França para montagem. Para

conseguir este objetivo, tornou-se necessário realizar medições de alta exatidão sobre um intervalo de 50 metros para que fosse possível vencer o desafio de se atingir uma incerteza de apenas 50 micrômetros. Até bem recente, isto era tecnologia de laboratório, e mesmo agora representa um desafio aos melhores rastreadores de laser. Este tipo de colaboração internacional de negócios e a qualidade do produto seriam impossíveis de se conseguir sem uma rigorosa validação das medições dimensionais entre os diversos institutos nacionais de metrologia e de laboratórios dos países envolvidos.

Independentemente das áreas de engenharia, a ciência das medições tem profundas implicações em expressivo número de outras áreas da ciência e tecnologia. No campo das medições de tempo, sistemas de navegação de satélites e coordenação de tempo internacional tornaram possível determinar-se uma locação com bastante exatidão, permitindo a operação de uma rede mundial de sistemas de computadores, e assegurando o pouso de uma aeronave em condições de baixa visibilidade.

O novo consórcio Galileo está trabalhando fortemente para garantir que o chamado “tempo Galileo” seja consistente com o Tempo Universal Coordenado, produzido pelo BIPM a partir de 300 relógios atômicos, em 41 países.

A manutenção da saúde humana depende basicamente da capacidade de se fazer um diagnóstico eficaz, fazendo o tratamento adequado, em que medições confiáveis são essenciais. Isso também mantém uma indústria mundial estimada em bilhões de dólares. Durante anos, temos focalizado a dosimetria de radiações e a medição da atividade de radionuclídeos e continuamos a melhorar as incertezas na disseminação do padrão de referência internacional, principalmente para as medições de

radioterapia. Isto é desafiador, e qualquer pequeno progresso tem um efeito direto e benéfico na segurança e bem-estar de pacientes que são tratados em milhões de hospitais em todo o mundo.

Recentemente, superamos barreiras ao trabalhar em parceria com a Federação Internacional de Clínicas Químicas, com o ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) , e com a Organização Mundial de Saúde, no desenvolvimento de uma infra-estrutura com medições consistentes e rastreáveis em laboratórios médicos. Isto trará implicações profundas na eficácia dos diagnósticos e no monitoramento da saúde de todos nós, seja quando estivermos em casa ou principalmente viajando.

A capacidade para se fazer medições eficazes, rastreáveis aos padrões fundamentais de importantes parâmetros para monitorar a ciência ambiental, é essencial para se monitorar a qualidade do ar e as mudanças do meio ambiente, tais como o aquecimento global e as mudanças climáticas. Essas são áreas em que temos que confiar na metrologia antes de tomar decisões claras e confiáveis que afetam a todos. Estamos trabalhando em parceria com a Organização Meteorológica Mundial e seu programa de vigília da atmosfera global, para prover referências rastreáveis para temas tão importantes, seja para o nosso futuro ou mesmo para o futuro do nosso planeta.

Os metrologistas que trabalham em áreas distintas especializam-se em tipos diferentes de medições. No mais alto nível científico, os esses metrologistas garantem a consistência do Sistema Internacional de Unidades (SI), que construíram com as primeiras unidades do Sistema Métrico, e que foi formalmente criado em 1960. Seu trabalho geralmente inclui a pesquisa da definição das unidades e os meios de realizá-las com suficiente exatidão para atender às necessidades da sociedade e do mundo da pesquisa científica. Os metrologistas da metrologia legal estão

envolvidos em aspectos da metrologia do setor regulamentado, que se refere diretamente aos consumidores. Ambas essas metrologias são essenciais para garantir sistemas de medição nacionais consistentes, rastreáveis a padrões internacionais, estabelecendo que medições e ensaios efetuados nos mais diversos países são considerados equivalentes.

A manutenção do sistema mundial de unidades é feita de várias maneiras, desde a disseminação direta das unidades (como no caso de massa e tempo), à coordenação através das comparações internacionais dos padrões nacionais de medição (como no caso de extensão, eletricidade e radiação ionizante). Essas comparações são coordenadas pelo Comitê Internacional para Pesos e Medidas (CIPM).

A criação em 1999 do Arranjo de Reconhecimento Mútuo (MRA – Mutual Recognition Arrangement) do CIPM representou um avanço na internacionalização da metrologia. A forma encontrada para aumentar a confiança na capacidade técnica dos participantes nos laboratórios ao redor do mundo, para fazer medições equivalentes, e possibilitar a provisão de certificados de calibração que são validados, verificados e aceitos por todos os signatários, representa uma contribuição significativa à redução das barreiras técnicas ao comércio. Algumas pessoas sustentam que o MRA/CIPM tem uma influência semelhante à da Convenção do Metro. O tempo dirá, mas está claro que os metrologistas estão envolvidos ativamente na pesquisa prática com o intuito de produzir resultados que tragam grandes benefícios para a sociedade como um todo. Uma estimativa recente é a de que o impacto apresentado pelo MRA/CIPM na redução de barreiras técnicas ao comércio seria algo superior a 4.0 bilhões de dólares.

A razão para a crescente importância da metrologia é a turbulência associada à globalização e ao comércio global. Para que uma economia se destaque no mercado mundial, ela precisa melhorar a competitividade de sua indústria produtiva. Isso requer mais que simplesmente a fabricação de melhores produtos a preços mais baixos. O cliente em potencial precisa ser convencido da qualidade e da conformidade do produto, que precisa ser comprovado por meio de relatórios de ensaio confiáveis e por uma avaliação da conformidade.

Para conseguir isso, é necessário um crescimento contínuo de tecnologia e da perícia. Geralmente a exatidão exigida para os padrões nacionais de medição dobra a cada dez anos. Essa exigência por uma exatidão e uniformidade crescente se aplica não apenas aos padrões nacionais, mas igualmente à implementação de sistemas da qualidade baseados em normas internacionais. Por exemplo, a norma da qualidade ISO/IEC 17025 exige que todos os instrumentos de medição usados na produção ou em serviços sejam calibrados. Calibração por sua vez, significa a comparação das medições feitas com os instrumentos de medição com padrões ou com materiais de referência de valor conhecido.

Onde estão as áreas importantes para a metrologia do futuro? Com certeza, continuará havendo uma série de desafios em áreas tradicionais como as da física e da engenharia. Entretanto, a maior e mais premente exigência vêm das áreas da química e das ciências baseadas na química. Sendo assim, aqui existe uma necessidade urgente para medições exatas e rastreáveis. Nosso objetivo a longo prazo consiste em incluir esses domínios na estrutura da MRA/CIPM ou a um arranjo semelhante, para que assim possamos continuar em nossa missão de buscar a uniformidade mundial das medições.

O trabalho internacional desenvolvido pelo BIPM comprova que a Convenção do Metro continua sendo um instrumento vivo, responsável pelas necessidades atuais da globalização. Isto é um testemunho à sagacidade daqueles que se reuniram em Paris, em maio de 1875. A aventura da metrologia é um empreendimento que tem ajudado a evolução do mundo moderno, e que continua excitando a imaginação e apoiando a sociedade”.

André Wallard,

Diretor do BIPM

Mai, 2005

APÊNDICE 2

Tabela 3.1 – Grandezas relacionadas com o campo de radiação

Grandeza	Símb.	Unidade	Definição
Número de partículas <i>Particle number</i>	N	1	É o número de partículas que estão presentes, emitido, transferido ou recebido.
Energia radiante <i>Radiant energy</i>	R	J	É a energia (excluindo a energia de massa) das partículas que estão presentes, emitida, transferida ou recebida
Energia depositada <i>Energy imparted</i>	\mathcal{E}	J	É a diferença entre a energia de entrada e a energia de saída da radiação ionizante, num material, descontada a energia transformada em radiação de freiamento e a de excitação, convertida em luz ou raios X.
Fluência (partícula) <i>Fluence (particle)</i>	Φ	m^{-2}	É o quociente do número de partículas incidentes dN sobre uma esfera de área de secção da . $\phi = \frac{dN}{da}$
Taxa de fluência (partículas) <i>Fluence rate (particle)</i>	ϕ	$m^{-2}.s^{-1}$	É o quociente de $d\Phi$ por dt , onde $d\Phi$ é o incremento da fluência de partícula no intervalo de tempo dt $\phi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2 N}{da.dt}$
Fluência de energia <i>Energy fluence</i>	Ψ	$J.m^{-2}$	É o quociente de dR por da , onde dR é a energia radiante incidente numa esfera de área de seção da $\psi = \frac{dR}{da}$
Taxa de fluência de energia <i>Energy fluence rate</i>	ψ	$W.m^{-2}$	É o quociente de $d\Psi$ por dt , onde $d\Psi$ é o incremento da fluência de energia no intervalo de tempo dt $\psi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d^2 R}{da.dt}$

Tabela 3.2 – Grandezas relacionadas com a interação da radiação com a matéria

Grandeza	Símb.	Unidade	Definição
Secção de choque			
Cross section	σ	m^2	<p>É o quociente da P por ϕ, onde P é a probabilidade da interação para o alvo quando sujeito a uma fluência Φ de partícula incidente carregada ou neutra de determinado tipo e energia sobre o alvo para produzir determinada interação.</p> $\sigma = \frac{P}{\phi}$
Coefficiente de atenuação em massa			
Mass attenuation coefficient (photons)	μ/ρ	$m^2.kg^{-1}$	<p>É a razão entre o decréscimo de intensidade do feixe de radiação dI, ao percorrer a espessura dx de um material, em relação à intensidade I do feixe incidente num ponto P do material e pela densidade ρ.</p> $\frac{\mu}{\rho} = \frac{-\frac{dI}{I}}{dx}$
Coefficiente de absorção de energia em massa			
Mass energy-absorption coefficient (photons)	μ_{en}/ρ	$m^2.kg^{-1}$	<p>É a razão entre a energia absorvida pelo material associada ao decréscimo de intensidade do feixe de radiação dI, ao percorrer a espessura dx do material, em relação à intensidade I do feixe incidente de energia E num ponto P do material e pela densidade ρ.</p> $\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{-\frac{dI(E)}{I(E)}}{dx}$
Coefficiente de transferência de energia em massa			
Mass energy-transfer coefficient (photons)	μ_{tr}/ρ	$m^2.kg^{-1}$	<p>É a razão entre a energia total transferida ao material associada ao decréscimo de intensidade do feixe de radiação dI, ao percorrer a espessura dx do material, em relação à intensidade I do feixe de incidente de energia E num ponto P do material e pela densidade ρ.</p> $\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{-\frac{dI(E)}{I(E)}}{dx}$
Poder de freiamento linear total			
Linear stopping power	S	$J.m^{-1}$	<p>É o quociente de dE por dl, onde dE é a energia perdida pela partícula carregada ao percorrer a distância dl no material de densidade ρ, para partículas carregadas de determinado tipo e energia</p> $S = \frac{dE}{dl}$
Poder de Freiamento Total em Massa			
Total mass stopping power	S/ρ	$J m^2 kg^{-1}$	<p>É o quociente de dE por ρ dl, onde dE é a energia perdida pela partícula carregada ao percorrer a distância dl no material de densidade ρ, para partículas carregadas de determinado tipo e energia.</p> $\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}$

Continuação da tabela 3.2 – Grandezas relacionadas com a interação da radiação com a matéria

Grandeza	Símb.	Unidade	Definição
Transferência Linear de Energia <i>Linear energy transfer</i>	L_{Δ}	$J\ m^{-1}$	<p>É o quociente de dE por dl, onde dE é a energia transferida pela partícula carregada ao material por meio de colisões com elétrons ao atravessar a distância dl, menos a soma das energias cinéticas de todos os elétrons perdida com energias cinéticas acima de Δ</p> $L_{\Delta} = \left[\frac{dE}{dl} \right]_{\Delta}$ <p>O LET é também denominado de poder de freiamento de colisão restrito.</p>
Energia média necessária para formar um par de íons num gás <i>Mean energy expended in a gas per ion pair formed</i>	W	J	<p>É o quociente de E por N, onde N é o número médio de pares de íons formados quando uma partícula carregada de energia cinética E é completamente dissipada no gás.</p> $W = \frac{E}{N}$ <p>Seu valor normalmente é expresso dividido pela carga do elétron e. Para o ar o W/e vale: 33,97 J C⁻¹</p>

Tabela 3.3 – Grandezas dosimétricas

Grandeza	Símb.	Unidade	Definição
Dose absorvida <i>Absorbed dose</i>	D	Gray Gy=J kg ⁻¹	É o quociente de $d\bar{\varepsilon}$ por dm , onde $d\bar{\varepsilon}$ é a energia média depositada pela radiação ionizante na matéria de massa dm , num ponto de interesse. $D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$
Taxa de dose absorvida <i>Absorbed dose rate</i>	\dot{D}	Gray/s Gy=J kg ⁻¹ .s ⁻¹	É o quociente de $d\bar{\varepsilon}$ por dm , onde $d\bar{\varepsilon}$ é a energia média depositada pela radiação ionizante na matéria de massa dm , num ponto de interesse, num intervalo de tempo dt $\dot{D} = \frac{d^2\bar{\varepsilon}}{dm.dt}$
Kerma <i>Kerma</i>	K	Gray Gy=J kg ⁻¹	É o quociente dE_{tr} por dm , onde dE_{tr} é a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa dm $K = \frac{dE_{tr}}{dm}$
Taxa de Kerma <i>Kerma rate</i>	\dot{K}	Gray/s Gy=J kg ⁻¹ .s ⁻¹	É o quociente dE_{tr} por dm , onde dE_{tr} é a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa dm , por intervalo de tempo dt $\dot{K} = \frac{d^2E_{tr}}{dm.dt}$
Exposição <i>Exposure</i>	X	C.kg-1	É o quociente entre dQ por dm , onde dQ é o valor absoluto da carga total de íons de um mesmo sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons no ar, em uma massa dm , são completamente freados no ar. $X = \frac{dQ}{dm}$
Taxa de Exposição <i>Exposure rate</i>	\dot{X}	C kg ⁻¹ .s ⁻¹	É o quociente entre dQ por dm , onde dQ é o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons no ar, em uma massa dm , são completamente freados no ar, por intervalo de tempo dt $\dot{X} = \frac{d^2Q}{dm.dt}$

Continuação da tabela 3.3 - Grandezas dosimétricas

Grandeza	Símb.	Unidade	Definição
Atividade Activity	A	Becquerel Bq = s ⁻¹	É o quociente dN/dt, de uma quantidade de núcleos radioativos num estado de energia particular, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas deste estado de energia no intervalo de tempo dt. $A = \frac{dN}{dt}$
Cte. de taxa de kerma no ar <i>Air kerma-rate constant</i>	Γ_{δ}	m ² .Gy.Bq ⁻¹ s ⁻¹	É o quociente de $l^2 \dot{K}_{\delta}$ por A, onde \dot{K}_{δ} é a taxa de kerma no ar devido a fótons, com energia maior do que δ a uma distância l de uma fonte puntiforme de um radionuclídeo com atividade A. $\Gamma_{\delta} = \frac{l^2 \dot{K}_{\delta}}{A}$
Rendimento químico por irradiação Radiation chemical yield	G	mol.J ⁻¹	É o quociente de n(x) por ε , onde n(x) é a quantidade média da substância x produzida, destruída ou modificada pela energia depositada ε pela radiação na matéria. $G(x) = \frac{n(x)}{\varepsilon}$
Coefficiente linear de absorção molar Molar linear absorption coefficient	\mathcal{E}	m ² .mol ⁻¹	Também chamado de coeficiente de extinção molar. É uma constante relacionada à absorbância espectrofotométrica, A_{λ} , de uma espécie molecular em um determinado comprimento de onda, λ , por unidade de comprimento, d , para uma concentração, c , desta espécie em solução: $\mathcal{E} = \frac{(A_{\lambda}/d)}{c}$

APÊNDICE 3



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France

N° 24

17 May 2002

CERTIFICATE

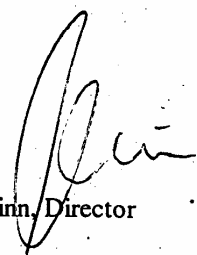
**Study and calibration in Co-60 gamma ray beam of the ionization chamber
NE 2561 serial number 264 of the LNMRI**

The secondary standard ionization chamber NE 2561 serial number 264 of the Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro, Brazil, has been calibrated at the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in terms of air kerma and absorbed dose to water in the ^{60}Co beam. The measurements were carried out in May 2002 by C. Kessler.

The results are shown below. The calibration coefficients N_K and $N_{D,w}$ in terms of air kerma and absorbed dose to water, respectively, are given at 20 °C and 101.325 kPa. The uncertainties u_c represent one standard combined uncertainty.

Radiation quality	K_{BIPM} /(mGy s ⁻¹)	N_K /(Gy μC ⁻¹)	u_c	$N_{D,w}$ / Gy μC ⁻¹	u_c
^{60}Co	2.39	93.95	0.16	102.5	0.3

Information on the conditions of measurement at the BIPM, on the determination of the rates of air kerma, K_{BIPM} , and absorbed dose to water, $(D_w)_{\text{BIPM}}$, and an analysis of the uncertainties can be found in the *Rapport BIPM-01/04*. Details concerning the uncertainties are given in Table 1 and Table 2.


T.J. Quinn, Director

Details concerning the calibration of the chamber NE 2561 serial number 264

1. *Positioning of the chamber.* The axis of the chamber was placed in the reference plane, at 1 m from the source of radiation. The chamber was oriented with the number inscribed on the stem facing the source. For calibration in air, the chamber centre was taken to be 5 mm from the tip (without the build-up cap) and the chamber was calibrated with the build-up cap supplied. For calibration in water, at 5 g cm^{-2} , the chamber was inserted in a PMMA¹ sleeve provided by the LNMRI (IAEA water proof sleeve type, 3.45 mm wall thickness, cylinder of 130 mm length below the chamber); the line marked on the sleeve facing the source. The effect of the radial non-uniformity of the beam over the section of the chamber was not taken into account; it is less than 10^{-4} .
2. *Collecting voltage.* A collecting voltage of 200 V (negative polarity) supplied by the BIPM, was applied to the chamber at least 30 minutes before any measurements. No correction is applied to the measured ionization current for the polarity effect, nor for the incomplete collection of charge due to ion recombination.
3. *Charge measurement and leakage.* The charge collected by the chamber was measured with the BIPM electrometer following a pre-irradiation of at least 20 minutes. All measurements are corrected for current leakage; this correction was less than 2×10^{-4} in relative value.
4. *Ambient conditions.* The chamber was left in the measurement room for 24 hours before any measurements were made to ensure stability to the ambient conditions. During calibration, the relative humidity was about 48 %. No correction for humidity is applied to the ionization current measured by the chamber. The air and water temperature was around 20 °C. During a series of measurements, the air and water temperature was stable to better than 0.02 °C. The current measured by the chamber is normalized to the reference conditions of 20 °C and 101.325 kPa.
5. *Reproducibility of measurements.* The short-term relative standard uncertainty of the mean ionization current measured with the chamber is estimated to be 2×10^{-4} (3 sets of 30 measurements in air and 2 sets of 30 measurements in water).
6. *Ratio of calibration coefficients.* The calibration coefficients for thimble type secondary standard chambers measured over many years show a relative standard uncertainty of typically 7×10^{-4} in ^{60}Co therapy beams. The ratio $N_{D,w}/N_K$ of the calibration coefficients in ^{60}Co is in agreement with the value observed at the BIPM for this type of chamber.
7. *Variation of the calibration coefficient.* Although the chamber was calibrated at the BIPM in 1997, the graphite thimble was replaced earlier in 2002. The present air kerma calibration coefficient changed by around 3×10^{-3} in relative value, probably due to the different volume of the chamber. The variation in the water calibration coefficient was larger because of the thicker water proof sleeve provided by the LNMRI for this calibration.

¹ PMMA : polymethylmethacrylate

Table 1. Estimated relative standard uncertainties associated with the calibration coefficient N_K for the chamber NE 2561 serial number 264 in ^{60}Co gamma radiation

Uncertainty component	$s_i^\dagger \times 10^2$	$u_i^\ddagger \times 10^2$
Air kerma rate	0.03	0.17
Ionization current of transfer chamber	0.02	0.02
Position	0.01	-
Uncertainty of N_K		
quadratic summation	0.04	0.17
combined uncertainty		0.18

Table 2. Estimated relative standard uncertainties associated with the calibration coefficient $N_{D,w}$ at 5 g cm^{-2} for the chamber NE 2561 serial number 264 in ^{60}Co gamma radiation

Uncertainty component	$s_i \times 10^2$	$u_i \times 10^2$
Absorbed dose rate \dot{D}_w in water	0.20	0.21
Ionization current of transfer chamber	0.02	0.02
Position	0.02	-
Depth in water	0.02	0.06
Uncertainty of $N_{D,w}$		
quadratic summation	0.20	0.22
combined uncertainty		0.30

[†] s_i represents the relative standard Type A uncertainty, estimated by statistical methods
[‡] u_i represents the relative standard Type B uncertainty, estimated by other means

APÊNDICE 4

Terminologia

Calibração: Processo no qual a resposta de um dosímetro ou de um instrumento de medição são caracterizados através de comparação com um padrão apropriado que é rastreado e consistente com um padrão nacional ou internacional.

Controle de qualidade: Procedimento e técnica operacional que são aplicadas rotineiramente para encontrar e manter um nível de qualidade metrológico pré-definido.

Dosímetro de rotina: Dosímetro calibrado contra um dosímetro padrão primário, ou dosímetro padrão de transferência, utilizado para medições de rotina de dose absorvida.

Dosímetro padrão de referência: Dosímetro de alta qualidade metrológica, usado como padrão para promover medições com rastreabilidade e com consistência das medições realizadas utilizando dosímetro padrão primário ou secundário para determinados fins.

Dosímetro padrão de transferência: Dosímetro, freqüentemente um dosímetro padrão de transferência com qualidade metrológica adequada, disponível para transporte entre diferentes localidades, utilizado para comparar medições de dose absorvida.

Dosímetro padrão primário: Dosímetro da mais alta qualidade metrológica implantado e mantido como padrão nacional ou internacional de dose absorvida.

Garantia de qualidade dosimétrica: todas as ações necessárias para fornecer nível de confiança adequada para que uma medição ou calibração seja realizada em um nível pré-definido de qualidade dosimétrica.

Manual de qualidade: Documento que demonstra a política de qualidade, qualidade do sistema e práticas de qualidade de uma entidade.

Padrão de trabalho: Padrão normalmente calibrado contra um padrão de referência, utilizado rotineiramente para calibrar ou verificar instrumentos de medição e outros componentes do sistema.

Processamento por radiação ionizante: Irradiação intencional de

produtos ou materiais para preservar, modificar ou melhorar suas características.

Processos de Validação: Processo pelo qual fica estabelecido que cada produto irradiado sob determinadas condições irá receber uma dose absorvida dentro dos limites especificados.

Programa de medição confiável: Programa documentado para o processo de medição que quantifica sobre uma base contínua de medição com avaliação total da incerteza. Este programa requer rastreabilidade e consistência com os padrões nacional e internacional, e deve garantir que a incerteza total permaneça dentro dos parâmetros especificados para cada aplicação.

Qualidade do sistema: Estrutura organizacional, responsabilidades, procedimentos, processos e recursos para implementação do gerenciamento da qualidade.

Rastreabilidade da medição: Capacidade para demonstrar e documentar periodicamente que os resultados das medições de um sistema particular de medição estão de acordo com os resultados de medições comparativas obtidas com o padrão nacional (ou algum padrão identificável e aceito) para uma incerteza específica.

Redução D_{10} : Parâmetro freqüentemente utilizado na esterilização de produtos médicos descartáveis em que representa a dose necessária para eliminar 90% dos microorganismos presentes inicialmente.

Sistema dosimétrico: Sistema utilizado para determinação da dose absorvida, consistindo de dosímetros, instrumentos de medição e seus padrões de referência associados e procedimentos para o sistema em uso.
Obs.: Os tipos de dosímetros incluem: dosímetros padrão de referência; dosímetros padrão de transferência e dosímetros de rotina.