

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**CÂMARA DE IONIZAÇÃO APLICADA A MEDIDAS DE ALTAS
TAXAS DE DOSE**

ARY DE ARAÚJO RODRIGUES JÚNIOR

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações.**

**Orientadora:
Dra. Margarida Mizue Hamada**

SÃO PAULO

2005

Aos funcionários do IPEN, que fazem
o impossível com o possível.

A minha esposa Sueli, pelo seu apoio
nos imprevistos da vida e por todo seu
amor, apoio e compreensão.

Agradecimentos

À Dra. Margarida Mizue Hamada, por ter aceitado o desafio de orientar esta tese e pela dedicação fora do comum e pelo apoio a mim dispensados.

Ao Sr. José Mauro Vieira, pelo fundamental apoio à realização deste trabalho, sem o qual esta tese não teria sido possível.

As chefias do CTR: Dra. Maria Helena Sampa e MSc. Wilson Aparecido Parejo Calvo, pelo apoio dado à realização deste trabalho.

Aos funcionários do laboratório de fontes intensas de radiação: Sr. Carlos Gaia da Silveira, Sra. Elizabeth S. R. Somessari, Sr. Samir Luiz Somessari, Sr. Helio Antônio Paes, pelo apoio material e fraternal na realização das medidas no irradiador gama de categoria I.

À MSc. Icimone Braga de Oliveira, pela preciosa ajuda nas realizações das medidas no irradiador gama de categoria I.

Ao Dr. Paulo Roberto Relá, pela construção e cessão da utilização do irradiador de grande porte do IPEN.

Ao Sr. Cláudio Botelho pelos excelentes e profissionais desenhos do projeto da câmara de ionização.

Ao Msc. Nelson Minoru Omi pelo tratamento digital final dos desenhos do projeto da câmara de ionização.

Ao Sr. Wagner dos Santos Oliveira, pelo apoio a realização das medidas no irradiador de grande porte e, principalmente, pela construção da mesa que serviu de suporte para os aparelhos eletrônicos, durante a realização das medidas no irradiador de grande porte, o que tornou a tarefa mais confortável.

Ao MSc. Fábio Eduardo da Costa, ao Sr. Eduardo Pavão Araújo e ao Sr. Paulo de Souza Santos, pelo apoio na realização das medidas no irradiador de grande porte.

Ao Sr. Ethel Martins Pedroso, pela dedicação, pela tremenda boa vontade, pelo bom humor e pelo companheirismo demonstrados em me ajudar na realização das medidas no irradiador de grande porte, apesar de todos os seus problemas pessoais, qualidades sem as quais a realização deste trabalho teria sido impossível.

À Dra. Maria da Penha A. Potiens e ao Dr. Carlos Henrique de Mesquita, por terem aceitado o convite para participar da minha banca de seminário de área e pelas valiosas críticas e sugestões feitas ao trabalho durante a mesma.

À MSc. Célia Maria Napolitano, pelo fornecimento dos dosímetros de polimetacrilato de metila da Harwell e pelas discussões sobre dosimetria.

Ao Sr. Danilo Cardenuto Ferreira e ao Sr. Sebastião Feliciano da Silva, pela paciente leitura de todos os dosímetros de polimetacrilato de metila utilizados neste trabalho.

À direção do CTC – Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá – campus de Umuarama e à direção do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, pelo apoio material e pelas licenças concedidas, que me permitiram, mesmo estando empregado longe da cidade de São Paulo, a continuidade e o término desta tese.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), pela possibilidade oferecida para a realização deste trabalho.

A todos os amigos que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

E especialmente ao meu pai Ary, à minha mãe Alayde e a minha irmã Simone, pela compreensão e apoio, que foram de grande ajuda na realização deste trabalho.

Caminhada do Aprendiz

Mais um dia se passa
Mais um dia de aprendizado
Mais um dia de turbulência
Mais um dia, mais um passo
Para que eu deixe de ser o aprendiz
E me torne o Mestre

Ary de Araújo Rodrigues Júnior

1980 (15 anos)

Hoje, eu tenho consciência de que esta
caminhada, felizmente, não tem fim . . .

Ary de Araújo Rodrigues Júnior

2005 (40 anos)

CÂMARA DE IONIZAÇÃO APLICADA A MEDIDAS DE ALTAS TAXAS DE DOSE

Ary de Araújo Rodrigues Júnior

RESUMO

Irradiadores comerciais de grande porte são projetados para processarem grandes quantidades de produtos com altas doses, por exposição à radiação gama. A irradiação em escala industrial é efetuada de forma dinâmica, em que os produtos percorrem um caminho em torno de uma fonte de radiação, geralmente de ^{60}Co , cuja atividade é da ordem de TBq a PBq (kCi a MCi). A dose será diretamente proporcional ao tempo transcorrido pelo material para percorrer este trajeto em torno da fonte. Entretanto, em algumas situações, principalmente para pesquisas ou processos de validação de clientes seguindo a norma ISO 11137, se faz necessário irradiar pequenas amostras com doses fracionadas na posição de irradiação estática. Nesta posição as amostras são colocadas dentro da sala de irradiação a uma distância fixa da fonte e as doses recebidas são determinadas utilizando-se dosímetros. Portanto, a dose somente será conhecida depois da irradiação, pela leitura dos mesmos. Entretanto, em irradiadores industriais, diferentes tipos de produtos com diferentes densidades atravessam o caminho entre a fonte e a posição de irradiação estática, onde estão as amostras. Conseqüentemente, a taxa de dose variará dependendo da densidade do produto, que está sendo irradiado dinamicamente. Uma metodologia adequada seria monitorar a dose recebida pelas amostras em tempo real, medindo a dose por meio de um detector de radiação, com uma melhor precisão e exatidão. Neste trabalho foi desenvolvida uma câmara de ionização cilíndrica de 0.9 cm^3 , para monitorar as altas doses recebidas por amostras em tempo real, na posição de irradiação estática de um irradiador gama de ^{60}Co . Os gases de nitrogênio e de argônio a pressão de 10^5 Pa (1 bar) foram utilizados para preencherem a câmara de ionização e determinar uma configuração de trabalho apropriada, para o detector ser utilizado em medidas de altas doses. Cabos de isolamento mineral foram soldados diretamente ao corpo da câmara de ionização, para a transmissão do sinal gerado

pelo detector até a eletrônica associada, distante cerca de 20 m. O sinal obtido foi cerca de 100 vezes maior do que o ruído de fundo. Este sistema dosimétrico foi testado em um irradiador gama de categoria I e na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte, em que diferentes taxas de dose foram obtidas utilizando materiais absorvedores. Foi encontrada uma boa linearidade do detector entre a dose e a carga, independentemente das diferentes taxas de dose. As incertezas de todas as curvas ficaram abaixo dos $\pm 5\%$, valor de incerteza máxima recomendada para um sistema dosimétrico de rotina. A câmara de ionização desenvolvida se mostrou adequada para ser utilizada como um dosímetro em tempo real, independente da degradação do espectro causada pela absorção dos fótons da fonte de ^{60}Co , pelo material em irradiação dinâmica.

IONIZATION CHAMBER FOR HIGH DOSE MEASUREMENTS

Ary de Araújo Rodrigues Júnior

ABSTRACT

Industrial gamma irradiators facilities are designed for processing large amounts of products, which are exposed to large doses of gamma radiation. The irradiation, in industrial scale, is usually carried out in a dynamic form, where the products go through a ^{60}Co gamma source with activity of TBq to PBq (kCi to MCi). The dose is estimated as being directly proportional to the time that the products spend to go through the source. However, in some situations, mainly for research purposes or for validation of customer process following the ISO 11137 requirements, it is required to irradiate small samples in a static position with fractional deliver doses. The samples are put inside the irradiation room at a fixed distance from the source and the dose is usually determined using dosimeters. The dose is only known after the irradiation, by reading the dosimeter. Nevertheless, in the industrial irradiators, usually different kinds of products with different densities go through between the source and the static position samples. So, the dose rate varies in function of the product density. A suitable methodology would be to monitor the samples dose in real time, measuring the dose on line with a radiation detector, which would improve the dose accuracy and avoid the overdose. A cylindrical ionization chamber of 0.9 cm^3 has been developed for high-doses real-time monitoring, during the sample irradiation at a static position in a ^{60}Co gamma industrial plant. Nitrogen and argon gas at pressure of 10^5 Pa (1bar) was utilized to fill the ionization chamber, for which an appropriate configuration was determined to be used as a detector for high-dose measurements. To transmit the signal generated in the ionization chamber to the associated electronic and processing unit, a 20 m mineral insulated cable was welded to the ionization chamber. The signal to noise ratio produced by the detector was about 100. The dosimeter system was tested at a category I gamma irradiator and at an industrial irradiation plant in static position, using

different absorbing materials. A good linearity of the detector was found between the dose and the accumulated charge, independently of the different dose rates caused by absorbing materials. The uncertainties for all curves were less than 5%, which is recommended for a dosimetric system routine. The developed ionization chamber showed to be suitable as a dosimeter on line, independently of the spectrum degradation caused by the absorption of the ^{60}Co photons in the material under dynamic irradiation.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xiv

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO	9
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
3.1. Exposição, Dose Absorvida e Kerma.....	10
3.2 Câmaras de ionização.....	11
3.2.1 Introdução	11
3.2.2 Teoria da cavidade de ionização	15
3.2.3 Projeto de câmaras de ionização	17
3.2.4 Eficiência da coleta de íons	18
3.2.5 Espessura da parede	20
3.2.6 Aspectos gerais	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4.1 Projeto da câmara de ionização	23
4.2 Cabos coaxiais de isolação mineral	25
4.3 Dosímetros Amber e Gammachrome	27
4.4 Procedimento para medidas no Irradiador gama de categoria I	29
4.5 Procedimento para medidas no irradiador de grande porte	35
5 RESULTADOS.....	44
5.1 Câmara de ionização	44
5.2 Câmara preenchida com nitrogênio e irradiada no irradiador gama de categoria I	44
5.3 Câmara preenchida com argônio e irradiada no irradiador gama de categoria I	55

5.4 Comparação entre as curvas de calibração obtidas no irradiador gama de categoria I	66
5.5 Independência direcional da câmara de ionização	68
5.6 Câmara preenchida com nitrogênio e irradiada no irradiador de grande porte	69
5.7 Comparação dos dados da câmara preenchida com nitrogênio e irradiada no irradiador gama de categoria I e no irradiador de grande porte	79
5.8 Estimativa de custo.....	82
6 DISCUSSÃO	84
7 CONCLUSÕES.....	91
8 TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura Número:	Descrição	Página
1.1	Irradiador gama de categoria IV, fabricado pelo IPEN/CNEN-SP	1
1.2	Esquema da diminuição da intensidade da radiação emitida por uma fonte de um irradiador de grande porte, na posição de irradiação estática, devido à atenuação provocada pelo material que está sendo irradiado dinamicamente em torno da fonte	3
1.3	Posição de irradiação estática na câmara de irradiação do irradiador gama de categoria IV, fabricado pelo IPEN/CNEN-SP	4
3.1	Diagrama esquemático da distribuição de elétrons na região de um dosímetro	13
3.2	Distribuição da dose absorvida na região dos dosímetros com dimensões que, em relação com ao alcance dos elétrons, são: comparáveis, pequenas e grandes.	15
3.3	Esquema de uma câmara de ionização com eletrodo central	18
3.4	Comportamento da corrente fornecida por uma câmara de ionização exposta a uma fonte, aumentando-se a tensão aplicada até atingir a corrente de saturação.	19
3.5	Variação da corrente de ionização com a espessura da parede da câmara – curva de acúmulo de carga (buildup)	21
4.1	Desenho esquemático da câmara de ionização e vista expandida das soldas realizados nos cabos de isolamento mineral e no tubo do gás	23
4.2	Detalhe do cabo de isolamento mineral	24
4.3	Vista frontal e lateral do cabo de isolamento mineral utilizado neste trabalho	26
4.4	Curva de calibração do dosímetro “gammachrome” e o mesmo em seu envelope de alumínio e uma série irradiada com doses escalonadas.	27
4.5	Curva de calibração do dosímetro “amber perspex” e o mesmo em seu envelope de alumínio e uma série irradiada com doses escalonadas.	28

Figura Número:	Descrição	Página
4.6	Esquema do arranjo experimental, para a medida das correntes de saturação e para as medidas de carga e dose no irradiador gama de categoria I do CTR.	31
4.7	Detalhe interno da câmara do irradiador gama de categoria I mostrando o posicionamento do dosímetro e da câmara de ionização e o absorvedor de chumbo para 50% de atenuação	34
4.8	Vista geral do arranjo experimental no irradiador gama de categoria I	34
4.9	Arranjo experimental para preenchimento da câmara a pressão de 10^5 Pa (1 bar) e a 30 °C	36
4.10	Vista esquemática, superior e em corte do irradiador	37
4.11	Posicionamento da câmara de ionização na posição de irradiação estática do irradiador gama de categoria IV, fabricado pelo IPEN/CNEN-SP	38
4.12	Detalhe da conexão entre os cabos de isolamento mineral e os cabos coaxiais comuns e do ponto de passagem dos cabos coaxiais pela parede do irradiador	38
4.13	Ponto de acompanhamento com o eletrômetro e a fonte de tensão	39
4.14	Esquema da vista lateral e frontal da sala de irradiação, mostrando os contêineres de alumínio que transportam o material para ser irradiado e a câmara de ionização na posição de irradiação estática.	40
4.15	Câmara de ionização na posição de irradiação estática dentro do tarugo de polietileno.	41
4.16	Câmara de ionização na posição de irradiação estática com a parede de chumbo.	42
4.17	Câmara de ionização na posição de irradiação estática dentro do tarugo de polietileno e com a parede de chumbo.	42
5.1	Detalhe da câmara de ionização e vista geral do conjunto.	44
5.2	Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a várias pressões, irradiada no irradiador gama de categoria I sem absorvedores.	45

Figura Número:	Descrição	Página
5.3	Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I sem e com absorvedores.	46
5.4	Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 0,6 kGy/h, obtida utilizando absorvedor de chumbo para 90%.	47
5.5	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.4.	48
5.6	Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 1,8 kGy/h, obtida utilizando absorvedor de chumbo para 70%.	48
5.7	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.6	49
5.8	Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 2,6 kGy/h, obtida utilizando absorvedor de chumbo para 50%.	49
5.9	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.8	50
5.10	Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 5,9 kGy/h, obtida sem a utilização dos absorvedores de chumbo	50
5.11	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.10.	51

Figura Número:	Descrição	Página
5.12	Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I em diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50% e sem a utilização de absorvedores.	53
5.13	Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I em diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%.	53
5.14	Curva de calibração de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I, para taxas de dose de 0,6; 1,8 e 2,6 kGy/h, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%, respectivamente	54
5.15	Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com argônio a várias pressões, irradiada no irradiador gama de categoria I sem absorvedores.	56
5.16	Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I sem e com absorvedores.	57
5.17	Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 0,5 kGy/h, obtida utilizando absorvedor de chumbo para 90%	58
5.18	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.17	59
5.19	Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 1,6 kGy/h, obtida utilizando absorvedor de chumbo para 70%.	59

Figura Número:	Descrição	Página
5.20	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.19	60
5.21	Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 2,3 kGy/h, obtida utilizando absorvedor de chumbo para 50%.	60
5.22	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.21	61
5.23	Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 4,8 kGy/h, obtida sem a utilização dos absorvedores de chumbo	61
5.24	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.23	62
5.25	Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I em diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50% e sem a utilização de absorvedores.	64
5.26	Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I em diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%.	64
5.27	Curva de calibração de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I, para taxas de dose de 0,5; 1,6 e 2,3 kGy/h, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%, respectivamente.	65

Figura Número:	Descrição	Página
5.28	Superposição das curvas de calibração obtidas com a câmara de ionização preenchida em um caso com argônio e em outro caso com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I, para diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%.	67
5.29	Superposição das curvas de calibração obtidas com a câmara de ionização preenchida em um caso com argônio e em outro caso com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I, sem a utilização de absorvedores, para as taxas de dose de, respectivamente: 4,8 e 5,9 kGy/ h.	67
5.30	Teste de avaliação da dependência direcional da câmara de ionização na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte	68
5.31	Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP.	70
5.32	Quatro curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,3 kGy/h, obtida utilizando a configuração: tarugo de polietileno e parede de chumbo.	71
5.33	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.31	72
5.34	Quatro curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,3 kGy/h, obtida utilizando a configuração: parede de chumbo.	72
5.35	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.33	73

Figura Número:	Descrição	Página
5.36	Quatro curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,6 kGy/h, obtida utilizando a configuração: tarugo de polietileno.	73
5.37	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.35	74
5.38	Quatro curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,9 kGy/h, obtida utilizando a configuração: exposta ao ar.	74
5.39	Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.37	75
5.40	Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), para cada uma das quatro configurações expostas na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP.	77
5.41	Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), para três configurações expostas na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP: “tarugo de polietileno e parede de chumbo”, “parede de chumbo” e “tarugo de polietileno”.	77
5.42	Curva de calibração de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e para três configurações expostas na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP: “tarugo de polietileno e parede de chumbo”, “parede de chumbo” e “tarugo de polietileno”.	78
5.43	Superposição das curvas de calibração obtidas com a câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I e no irradiador de grande porte.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela Número:	Descrição	Página
3.1	Valores típicos de espessuras de parede, para provocar o equilíbrio eletrônico, em função da energia dos fótons incidentes e a atenuação provocada por elas	21
3.2	Potenciais de ionização para alguns gases	22
5.1	Para cada absorvedor de chumbo colocado no irradiador gama de categoria I: a corrente de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), a tensão mínima necessária para estabelecê-la e a taxa de dose obtida.	46
5.2	Equações obtidas pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para cada uma das curvas resultantes de carga por dose, obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar).	52
5.3	Equação obtida pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para a curva de calibração de carga por dose, obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), utilizando-se os absorvedores de chumbo entre 50 e 90%.	55
5.4	Para cada absorvedor de chumbo colocado no irradiador gama de categoria I: a corrente de saturação da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), a tensão mínima necessária para estabelecê-la e a taxa de dose obtida.	57
5.5	Equações obtidas pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para cada uma das curvas resultantes de carga por dose, obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar).	63

Tabela Número:	Descrição	Página
5.6	Equação obtida pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para a curva de calibração de carga por dose, obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), utilizando-se os absorvedores de chumbo entre 50 e 90%.	66
5.7	Valores das correntes de saturação da câmara de ionização na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN/S.P, medidas nas orientações 0° , 90° e 180° em relação à fonte	69
5.8	Corrente de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), a tensão mínima necessária para estabelecê-la e a taxa de dose obtida, para cada uma das quatro configurações expostas na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP	70
5.9	Equações obtidas pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para cada uma das curvas resultantes de carga por dose, obtidas no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar).	76
5.10	Equação obtida pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para a curva de calibração de carga por dose, obtidas no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1bar), utilizando-se as configurações: tarugo, parede de chumbo e tarugo e parede de chumbo.	79
5.11	Detalhamento da estimativa do custo de confecção da câmara de ionização desenvolvida neste trabalho.	83

1 INTRODUÇÃO

Um irradiador gama de categoria IV, também conhecido como de grande porte, é uma máquina cuja função é irradiar materiais em escala industrial (IAEA, 1992, 1996; Fairand, 2002; McLaughlin et al., 1989). Para atingir este objetivo esta irradiação tem que ser feita nos moldes de uma linha de produção. A técnica utilizada é realizar a irradiação dos materiais de forma dinâmica, em que estes são levados por mecanismos de transportes automáticos a percorrer um único trajeto em torno de uma fonte de radiação gama (geralmente ^{60}Co), com atividades da ordem de dezenas a centenas de PBq (centenas a milhares de kCi). Para fins de proteção radiológica todo este conjunto é confinado dentro de um prédio de concreto, cujas paredes são espessas o suficiente para reduzir o nível de radiação abaixo do nível da radiação de fundo. A dose será diretamente proporcional ao tempo transcorrido pelo material para percorrer este trajeto, quanto maior o tempo de exposição maior a dose (EMBRARAD, 1998; Fairand, 2002; IAEA, 1996; McLaughlin et al., 1989; Rodrigues Júnior, 2000). A Figura 1.1 ilustra esquematicamente um modelo de irradiador industrial.

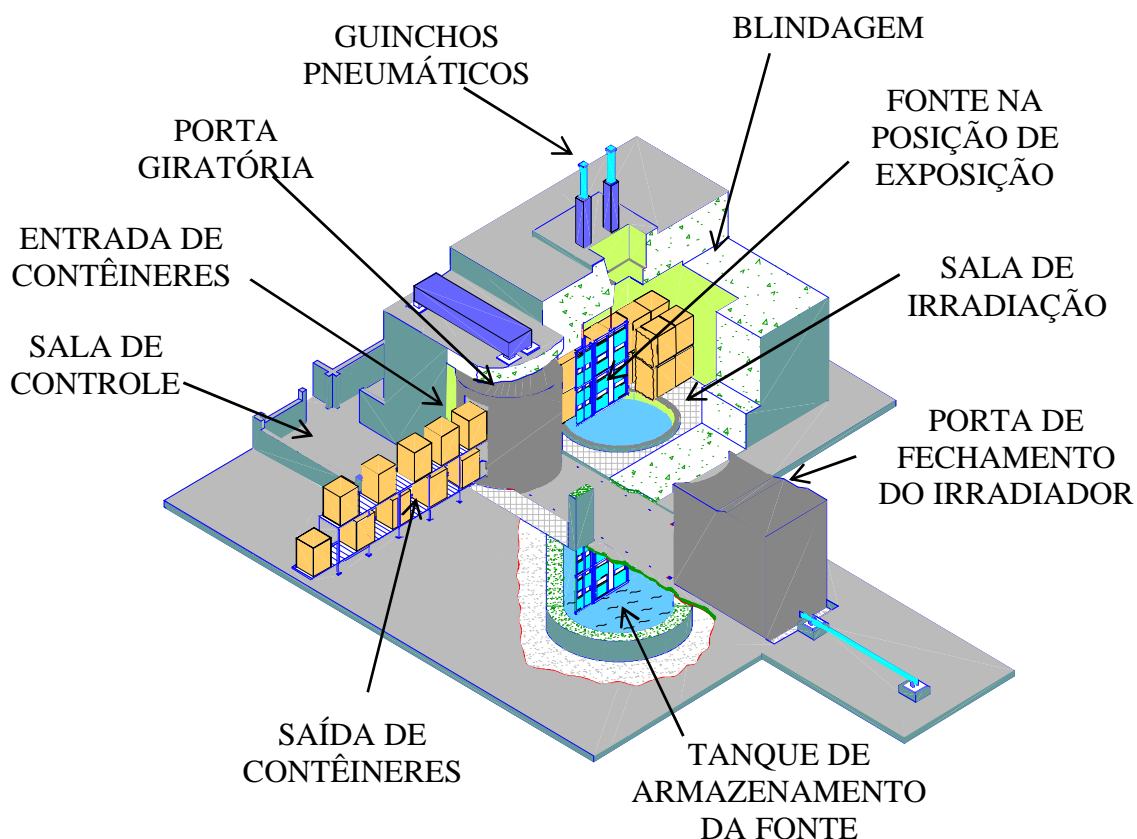


Figura 1.1: Irradiador gama de categoria IV, fabricado pelo IPEN/CNEN-SP (Calvo et al., 2004).

No Brasil existem atualmente seis irradiadores gama de categoria IV: um em São José dos campos – S.P, pertencente à Johnson & Johnson; dois em Cotia – S.P, pertencentes à EMBRARAD; um em Jarinú – S.P, pertencente à CBE; um em Manaus - AM, pertencente à Tech Ion e um em São Paulo – S.P, pertencente ao IPEN.

Em algumas situações, na rotina de trabalho de irradiadores de grande porte comerciais, é necessário realizar irradiações de materiais de pequeno volume, com doses que estão fora da linha de produção do irradiador e/ou necessitam de uma precisão maior do que a fornecida pela irradiação dinâmica. Esses tipos de irradiações são solicitadas por pesquisadores de universidades ou de institutos de pesquisa, para fins de estudos do efeito produzido em materiais, vegetais ou microorganismos submetidos à radiação ou são solicitadas por clientes interessados em validar o processo de irradiação do seu produto. Um volume extremamente significativo de mercadorias irradiadas no Brasil vem de empresas que fabricam produtos para a área médica¹. Cada vez mais estas empresas necessitam validar o processo de esterilização de seus produtos, segundo a norma internacional ISO 11137 (ISO, 1995). Esta norma estabelece três métodos de irradiação de amostras do produto para fins de validação, a saber: o método 1; 2A e 2B. O método 2B é o mais rigoroso, exigindo a irradiação das amostras em uma série de pelo menos 8 doses com incrementos nominais de 1 kGy. Em relação à dose nominal a dose aplicada à amostra deve ficar dentro de uma faixa de $\pm 0,5$ kGy ou ± 10 %, considerando o que for maior, com exceção da dose de 1 kGy cuja tolerância é de $\pm 0,2$ kGy. O método 2A exige uma série de pelo menos 9 doses com incrementos nominais de 2 kGy. Em relação à dose nominal a dose aplicada à amostra deve ficar dentro de uma faixa de $\pm 0,5$ kGy ou ± 10 %, considerando o que for maior. O método 1 exige a aplicação de uma dose de verificação à amostra. O valor desta dose de verificação é fornecida pela norma e a dose aplicada não pode ser superior a 10 % ou inferior a 90 % deste valor (ISO, 1995).

Para estes casos, atualmente, a opção é irradiar as amostras em uma posição estática onde a taxa de dose seja conhecida. Um local dentro da sala de irradiação é escolhido a uma distância fixa da fonte, onde a taxa de dose é determinada por meio de dosímetros. O tempo de exposição é calculado dividindo a dose solicitada pela taxa de dose, e assim a amostra é irradiada durante o tempo calculado. No entanto, na prática, este tipo de

¹ Segundo informação verbal de representantes da CBE e da EMBRARAD, as duas empresas existentes no Brasil, que prestam serviço de irradiação de mercadorias, para terceiros.

irradiação não é simples, pois em virtude de motivos econômicos a irradiação dinâmica não é interrompida, ou seja, sempre haverá materiais de diferentes densidades percorrendo o trajeto em torno da fonte e, conseqüentemente, passando entre a fonte e a amostra a ser irradiada. Portanto, a taxa de dose na posição de irradiação estática variará dependendo da densidade do material que estiver sendo irradiado dinamicamente (Attix, 1986; Knoll, 1989; McLaughlin et al., 1989; Rodrigues Júnior, 2000), como é mostrado na Figura 1.2. Na Figura 1.3 é mostrado o interior de um irradiador de grande porte e a posição de irradiação estática.

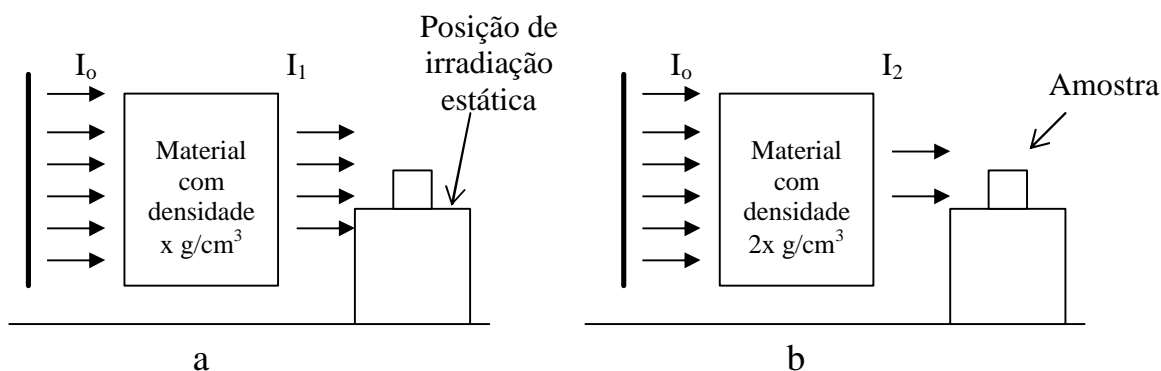


Figura 1.2: Esquema da diminuição da intensidade da radiação emitida por uma fonte de um irradiador de grande porte, na posição de irradiação estática, por causa da atenuação provocada pelo material, que está sendo irradiado dinamicamente em torno da fonte:

- a) material de uma densidade “x”, intensidade I_1 .
- b) material com uma densidade “2x”, intensidade I_2 ($I_2 < I_1$).

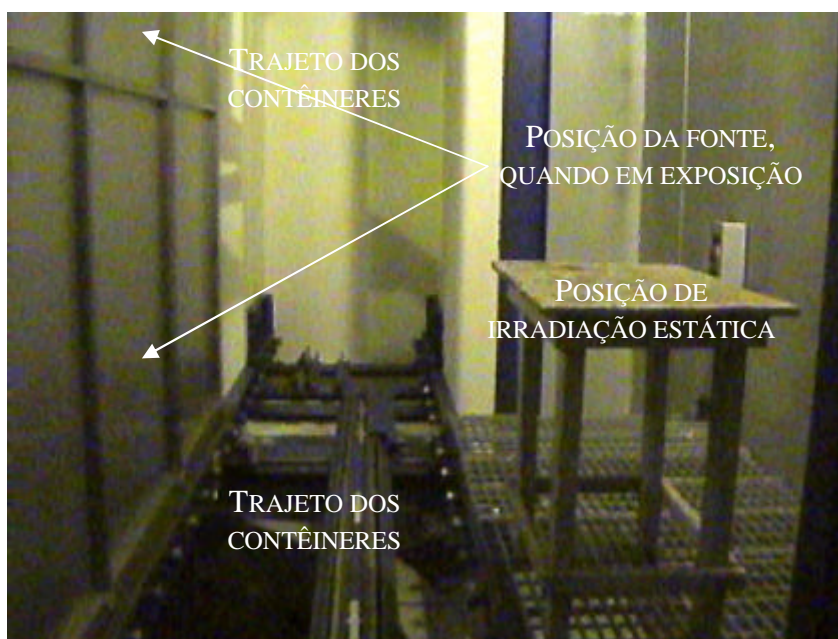


Figura 1.3: Posição de irradiação estática na câmara de irradiação do irradiador gama de categoria IV, fabricado pelo IPEN/CNEN-SP.

Dessa forma, a taxa de dose determinada na posição de irradiação estática será sempre uma taxa de dose média. Isto implica que o cálculo do tempo de exposição de uma amostra também será um intervalo de tempo de exposição médio, o que aumenta a incerteza da dose que se pretende aplicar. Para minimizar esta incerteza deve-se usar o seguinte procedimento, para uma irradiação estática, em que pelo menos dois dosímetros são utilizados:

- Um dosímetro é lido no final do tempo de exposição calculado.
- Se a dose alvo não é atingida, uma nova irradiação é realizada.
- O novo tempo de exposição (T_{NE}) será o resultado da subtração do valor da dose alvo (D_T) menos a dose fornecida pelo dosímetro (D_L), dividido pelo resultado da divisão da dose fornecida pelo dosímetro (D_L) pelo tempo de exposição deste (T_E), ou seja, a taxa de dose desta última irradiação:

$$T_{NE} = \frac{D_T - D_L}{\frac{D_L}{T_E}} \quad \begin{array}{l} \text{(Quantidade de dose que falta} \\ \text{para atingir a dose alvo)} \\ \text{(Taxa de dose da irradiação anterior,} \\ \text{em que a dose } D_L \text{ foi obtida)} \end{array}$$

- E este procedimento é repetido até que a dose alvo seja atingida

Os dosímetros utilizados podem ser os mesmos usados na monitoração rotineira dos produtos processados pelo irradiador, desde que a faixa de dose e a precisão sejam aceitáveis (ISO, 1995). Um bom sistema dosimétrico de rotina não excede a incerteza de $\pm 10\%$ em um nível de confiança de 95% ou $\pm 5\%$ de desvio padrão (Fairand, 2002).

Apesar desta metodologia de monitoração da dose para irradiações estáticas em irradiadores gama de categoria IV ser, ainda, utilizada em nível mundial², este método apresenta a desvantagem de não ser prático, estar sujeito a erros no caso da taxa de dose aumentar mais do que o previsto durante a irradiação (ocasionando a ultrapassagem da dose alvo) e exigir a entrada dentro do irradiador, para retirar e colocar os dosímetros e, conseqüentemente, a interrupção da irradiação dinâmica, ou seja, da produção. Uma solução adequada seria aquela que permitisse a monitoração da dose em tempo real, o que eliminaria o risco da dose alvo ser ultrapassada, melhoraria a precisão e diminuiria o tempo gasto nesta tarefa.

Para alcançar este objetivo é necessário utilizar um detector de radiação, que monitore a dose em tempo real, com as seguintes características:

- Ser possível confeccioná-lo em dimensões reduzidas, que possibilite monitorar a dose no interior da amostra, interferindo o menos possível com o equilíbrio eletrônico do meio.
- Ser resistente à doses altas, da ordem de MGy, e à taxas de dose altas, da ordem de dezenas de kGy/h (típicas de um irradiador gama de categoria IV).
- Apresentar reprodutibilidade ($\pm 5\%$).
- Apresentar independência com a taxa de dose.
- Poder ser calibrado.
- Não apresentar dependência direcional (Attix, 1986; Knoll, 1989; McLaughlin et al., 1989).
- Gerar um sinal com amplitude suficiente para ser transmitido por volta de duas dezenas de metros, que é a distância geralmente encontrada entre a sala de

² Informação verbal de técnicos da MDS Nordion (Canadá), empresa fabricante de irradiadores, e de técnicos de outras empresas de irradiação.

irradiação e o painel de controle de um irradiador gama de categoria IV (IAEA, 1992; Fairand, 2002; McLaughlin et al., 1989; Rodrigues Júnior, 2000).

Uma escolha poderia recair sobre os detectores à base de diodos semicondutores, que são usados rotineiramente para medir a taxa de dose em várias aplicações, como a radioterapia, em que a dose total acumulada é baixa. Entretanto, danos temporários e permanentes provocados pela radiação impedem o uso deste tipo de detector em aplicações que exijam exposições a doses da ordem de kGy, resultando em doses acumuladas da ordem de MGy (Knoll, 1989; McLaughlin et al., 1989).

Outra alternativa seria o detector SPGD (Self-Power Gamma Detectors), que consistem de dois eletrodos concêntricos separados por uma camada de material isolante, em que os raios gama externos induzem um fluxo de elétrons que pode ser medido externamente e que é proporcional à taxa de fluência dos raios gama. Os SPGD tinham a sua aplicação limitada, em razão do seu baixo sinal de saída, da ordem de 20 pA, dificultando o envio do sinal eletrônico até a eletrônica associada, através de dezenas de metros de cabo. Em 2002, com o avanço da qualidade dos sistemas eletrônicos, para medidas de corrente, Nieuwenhove e Vermeeren utilizaram o SPGD para aplicações em medidas de alta taxa de dose, em um reator nuclear tipo piscina, obtendo resultados relativamente precisos de dose, para raios gama, na faixa de 0,5 a 2,0 kGy/h (Nieuwenhove e Vermeeren, 2002). No entanto o seu custo de fabricação é elevado e as câmaras de ionização apresentam maior sensibilidade (corrente por unidade de taxa de dose).

O detector mais indicado para a aplicação proposta é a câmara de ionização. Em virtude de suas propriedades, como alta resistência aos danos causados pela radiação, alta sensibilidade e baixo custo de fabricação. A câmara de ionização que melhor preenche os requisitos exigidos é a de eletrodo central, por não apresentar dependência direcional, o que não ocorre com o modelo de placas paralelas (Attix, 1986; Attix e Roesch, 1968; Holm e Berry, 1970; Knoll, 1989; McLaughlin et al., 1989; Price, 1958). Outro fator que deve ser considerado, especialmente para amostras pequenas, é o volume do detector. Este necessita ser pequeno o suficiente para permitir eventuais monitorações de dose no interior da amostra, como por exemplo, na validação do processo de esterilização do produto, segundo a norma ISO 11137 (ISO, 1995). Um volume adequado para este detector é menor do que 1 cm^3 .

Na literatura há vários exemplos da aplicação de câmaras de ionização de diferentes tamanhos e modelos, tais como: na monitoração da radiação ambiente (Park et al., 2005), no controle de qualidade da espessura de chapas de metal (Alex e Prasad, 1997), na padronização e calibração de fontes de radionuclídeos de pequeno volume (Alvarez e Caldas, 2005; Gonçalves et al., 2005; Hino et al., 1996; Oliveira e Caldas, 2002; Brancaccio e Dias, 2002), na determinação do espectro de energia de fontes de radiação (Conti et al., 1995; Santos e Silva, 2005; Smith et al., 1994; Tepper e Losee, 1995, 1996; Tepper et al., 1998), na monitoração e medição de feixes de radiação produzidos por aceleradores de partículas (Ahamed et al., 2000; Field et al., 2004; McDonald et al., 2003; Pant et al., 2002; Saito e Suzuki, 1999; Velissaris, 2005; Zwaska et al., 2003), na determinação da concentração de KCl durante a produção de fertilizante, com base na medida de ^{40}K , (Dimitrenko et al., 1999), na medicina nuclear, para a medida de radioatividade de soluções radioativas (Schrader, 2000) e para a calibração dos equipamentos de diagnóstico e tratamento (Afonso e Caldas, 2005; Bessa e Caldas, 2005; Costa e Caldas, 2002; Costa, 2003; Dewerd e Wagner, 1999; Ensaf et al., 2002; Laitano et al., 2002; Low et al., 1998; Maia e Caldas, 2002; Maia e Caldas, 2005; Munck af Rosenschöld et al., 2002; Newhauser et al., 2002; Potiens e Caldas, 2002; Rocha e Caldas, 2002; Sánchez-doblado et al., 2005; Santos et al., 2005; Shortt et al., 2002; Van der Merwe e Keddy, 1999; Vivolo e Caldas, 2005).

Para aplicações de câmaras de ionização em irradiadores gama de categoria IV foram encontrados na literatura quatro artigos. Tanaka et al. (1985) desenvolveram uma câmara de placas paralelas, cujo volume total era de 6 cm^3 , para a monitoração em tempo real da taxa de exposição em uma posição de irradiação. No entanto, este irradiador realizava somente irradiações panorâmicas, portanto não possuindo sistema de irradiação dinâmica (materiais percorrendo um único trajeto em torno da fonte). Ahmad et al. (1992) descrevem o teste de uma câmara de ionização de cavidade, com volume total de 1130 cm^3 , em um irradiador comercial, visando sua utilização na dosimetria gama do combustível de um reator nuclear tipo piscina. Sharpe et al. (2000) desenvolveram um sistema de monitoração em tempo real da taxa de dose durante o trajeto em torno da fonte, utilizando uma pequena câmara de ionização, cujo volume total não foi mencionado e o sinal era transmitido por ondas de rádio. E como continuidade deste trabalho, Sephton et al. (2002) testaram cinco câmaras de ionização disponíveis comercialmente, com dimensões

variando entre 3,5 e 15 cm³, para monitorar a taxa de dose durante o trajeto em torno da fonte. Duas não apresentaram danos aparentes para doses da ordem de MGy e destas uma foi escolhida por apresentar maior sensibilidade. Ambas utilizavam cabos de isolamento polimérica, que apresentaram enrijecimento ao final dos testes, por causa da reticulação dos mesmos pela radiação. A câmara escolhida possuía um volume externo total de 13,6 cm³ e a outra câmara um de 15 cm³.

Todas as câmaras de ionização, estudadas nos quatro trabalhos dentro de irradiadores gama de categoria IV, descritos acima, utilizaram cabos coaxiais convencionais, para ligar a câmara a sua eletrônica associada (eletrômetro e fonte de tensão). Estes cabos necessitam de conectores para se ligar à câmara de ionização, o que dificulta a confecção de uma câmara com volume adequado para a aplicação proposta (menor do que 1cm³). Além disto os cabos convencionais apresentam limitações para esta aplicação, a saber: 1) sofrem danos pela radiação, por serem feitos com isolamento polimérica, a qual é sujeita a danos na faixa de operação desejada, 2) apresentam dimensão próxima ou superior a do detector proposto, tornando difícil a conexão entre ambos, 3) provocam a interferência na transmissão do sinal, pelo fato de irradiadores gama categoria IV possuírem um tanque de água, para a blindagem da fonte, e portanto há evaporação de água, que aumenta a umidade do ambiente, podendo acarretar uma corrente de fuga através dos conectores. Neste trabalho estas limitações foram contornadas, utilizando cabos com isolamento mineral, que possuem diâmetro pequeno ($\approx 1,5$ mm), são resistentes à radiação (Calvo et al., 1990; McMinn e Goodins, 1971) e podem ser soldados diretamente à câmara de ionização, dispensando a utilização de conectores. Esta alternativa possibilitou o desenvolvimento de uma câmara de ionização com o volume total requerido, dispensando a utilização de conectores e da troca periódica de cabos, por causa da degradação provocada pela radiação. Usualmente a distância entre a posição de irradiação estática e a do painel de controle, onde, geralmente, se encontra a eletrônica associada é da ordem de dezenas de metros.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma câmara de ionização com volume externo total da ordem de 1 cm^3 , para monitorar a dose em tempo real, na posição de irradiação estática de um irradiador gama de categoria IV, sem interromper a irradiação dinâmica. Este detector deverá apresentar a reprodutibilidade de, pelo menos, um sistema dosimétrico de rotina, ou seja, de no máximo $\pm 5\%$, para um intervalo de confiança de 68%. Ter características adequadas para sua utilização em procedimentos de validação do processo de esterilização por radiação de produtos, pela norma ISO 11137, em empresas que prestam este tipo de serviço.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Exposição, Dose Absorvida e Kerma

A carga do elétron produzida no ar pela radiação ionizante é denominada por: Exposição, e é simbolizada pela letra "x" maiúscula (X). Esta grandeza é definida como: a carga total, dQ, de íons de um mesmo sinal produzidos no ar, quando todos os elétrons liberados pelos fótons na massa de ar, dm, são completamente freados no ar.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad \text{C / kg}$$

Esta grandeza é uma média das cargas produzidas em uma massa de ar finita, portanto será dada como carga por unidade de massa de ar. A unidade da grandeza exposição no S.I (Sistema Internacional) é o coulomb por quilograma (C / kg). A unidade anterior ao S.I é o röntgen (R), nome dado em homenagem ao descobridor dos raios X, Wilhelm Röntgen. A equivalência de röntgens em C/kg é (McLaughlin et al., 1989):

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg.}$$

Para o propósito de processamento por radiação a grandeza mais importante é a dose absorvida, simbolizada pela letra "d" maiúscula (D). esta grandeza é definida como a energia média cedida, de, à matéria dividida pela massa desta matéria, dm:

$$D = \frac{de}{dm} \quad \text{Gy}$$

Embora esta definição seja dada, exclusivamente, para a dose absorvida em um ponto da matéria, que absorveu radiação, ela é geralmente uma média sobre uma massa

finita de um dado material, sendo a dose absorvida (ou dose) lida por um dosímetro calibrado em função da energia cedida por unidade de massa deste material.

A unidade da dose absorvida no S.I é o joule por quilograma (J/ kg), que é expressa em gray, símbolo: Gy, em homenagem a um dos pioneiros da física de radiações, medicina e biologia L. H. Gray. A equivalência do gray com a unidade anterior, o rad (McLaughlin et al., 1989) é:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Atribui-se a energia cinética fornecida à matéria pela interação de uma partícula sem carga, por exemplo: fótons, como a quantidade de kerma, K, que é definida como o quociente de dE_{tr} por dm , em que E_{tr} é a soma da energia cinética de todas as partículas ionizadas carregadas liberadas pela interação das partículas sem carga no material de massa dm :

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad \text{Gy}$$

A unidade do kerma no S.I é o joule por quilograma (J /kg), que é a mesma unidade da dose absorvida (D), o gray (Gy). O grau em que os valores de D e K se aproximam é determinado pelo grau em que as partículas carregadas se aproximam do equilíbrio eletrônico (McLaughlin et al., 1989).

3.2 Câmaras de ionização

3.2.1 Introdução

A medida prática de exposição e determinação da dose absorvida implica na introdução de um detector no campo de radiação, no ponto em que se deseja medir estas grandezas. Este detector deve reagir à presença da radiação ionizante.

Em geral este detector não será idêntico à composição do meio que o envolve, portanto ele causará uma descontinuidade no meio, que neste contexto será chamada de “cavidade”. A resposta do detector (ou da cavidade) dependerá da energia por unidade de massa depositada dentro dele (a dose absorvida). Entretanto, a quantidade a ser determinada é a dose absorvida no meio na ausência do detector, portanto é essencial haver um modo de relacionar a dose absorvida no detector com a dose absorvida no meio. Esta é a função da teoria da cavidade.

Considere a distribuição de elétrons na região de um dosímetro, dentro de um meio irradiado por raios-X ou γ , como é mostrado na Figura 3.1 A. Suponha que o número atômico do meio é maior do que o do dosímetro. Para fótons de baixa energia o número de elétrons atingirá um mínimo no centro do dosímetro. Esta situação representa um caso intermediário entre dois extremos.

Quando as dimensões lineares do dosímetro são muito menores do que o alcance dos elétrons, Figura 3.1 B, os elétrons dentro do dosímetro serão, praticamente, somente aqueles que foram produzidos no meio e estão cruzando o dosímetro.

Quando as dimensões lineares do dosímetro são muito maiores do que o alcance dos elétrons, Figura 3.1 C, os elétrons dentro do dosímetro serão, praticamente, somente aqueles que foram produzidos dentro do dosímetro.

A energia depositada dentro do dosímetro (e, portanto, a sua resposta) será uma consequência do espectro resultante dos elétrons dentro do dosímetro. A energia depositada no dosímetro e no meio é determinada pelo poder de freamento para elétrons do material que compõe o dosímetro e do meio e também, em um menor grau, das propriedades de espalhamento de elétrons dos dois materiais.

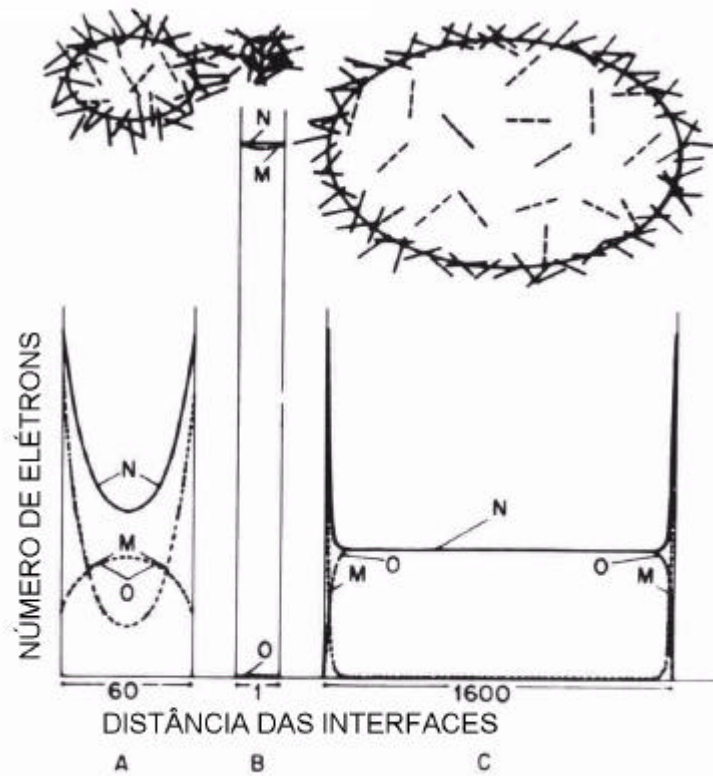


Figura 3.1: Diagrama esquemático da distribuição de elétrons na região de um dosímetro. As linhas sólidas representam elétrons gerados no meio, em que a dose está sendo medida, e as linhas tracejadas representam os elétrons gerados no dosímetro. A fluência de elétrons através da cavidade é mostrada graficamente, com a fluência de elétrons resultantes “N” composta por duas componentes, a saber: dos elétrons gerados no meio “M” e dos elétrons gerados nos dosímetros “O”. A escala é diferente para os três tamanhos ilustrados, suas magnitudes comparativas são mostradas na base da figura. As partes do diagrama representam: (A) um dosímetro com dimensões comparáveis com o alcance dos elétrons, (B) um dosímetro com dimensões pequenas comparado com o alcance dos elétrons e (C) um dosímetro com dimensões grandes comparado com o alcance dos elétrons (Holm e Berry, 1970).

A distribuição da dose absorvida, para estes três tamanhos de dosímetro, é mostrada nas Figura 3.2. Na Figura 3.2 A, representando a cavidade de tamanho intermediário, três características são discerníveis :

- 1) para distâncias da interface maiores do que o alcance dos elétrons, a dose absorvida chega a um valor de platô nos dois materiais.
- 2) perto da interface a dose absorvida desvia deste platô por causa das propriedades mútuas de espalhamento dos elétrons dos dois materiais e
- 3) na interface há uma descontinuidade na dose absorvida por causa dos diferentes poderes de freamento para elétrons dos dois materiais.

Na Figura 3.2 B o tamanho da cavidade é muito menor do que o alcance dos elétrons secundários, neste caso o fluxo de elétrons através da cavidade é virtualmente o que existe no meio na ausência da cavidade. Para a cavidade de pequenas dimensões, a relação entre a dose absorvida no dosímetro e no meio varia dependendo da relação entre os poderes de freamento de massa para elétrons nos dois materiais.

Na Figura 3.2 C há a representação do outro extremo, o tamanho da cavidade é muito maior do que o alcance dos elétrons secundários, portanto a contribuição da dose na interface da região é uma parte desprezível da energia total depositada na cavidade. Para a cavidade de grandes dimensões, esta relação variará dependendo da relação entre os coeficientes de massa de absorção de energia para os fótons nos dois materiais (Attix e Roach, 1968; Holm e Berry, 1970).

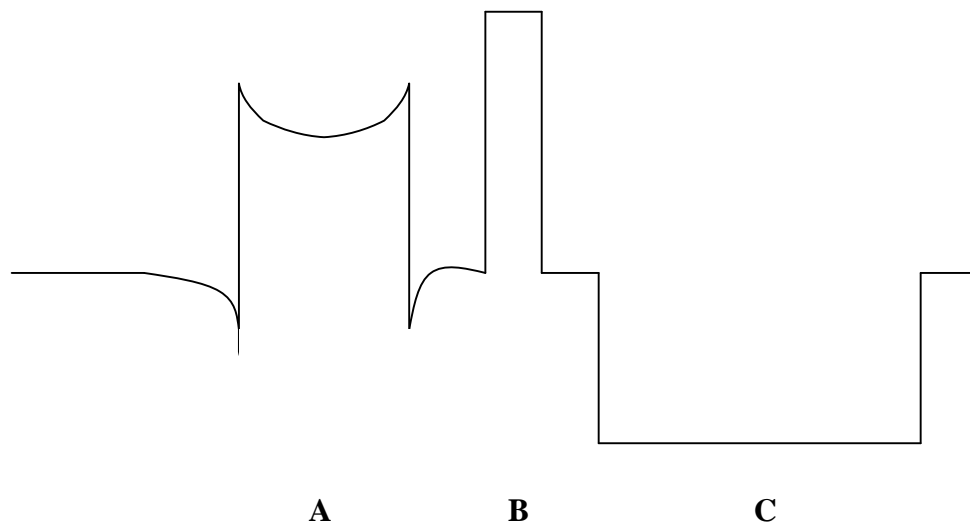


Figura 3.2: Distribuição da dose absorvida na região dos dosímetros com dimensões que, em relação com ao alcance dos elétrons, são: (A) comparáveis, (B) pequenas e (C) grandes (Holm e Berry, 1970).

3.2.2 Teoria da cavidade de ionização

Formulação inicial

A primeira formulação rigorosa da teoria da cavidade de ionização foi feita por Gray, embora algumas considerações anteriores tenham sido feitas por Bragg e Fricke e Glasser. Quatro suposições estão implícitas na formulação de Gray sobre a teoria da cavidade de ionização (Attix e Roesch, 1968; Holm e Berry, 1970):

- 1) A presença da cavidade não altera o espectro dos elétrons estabelecido no meio.
- 2) Interações de fótons gerando elétrons dentro da cavidade são desprezíveis.
- 3) A fluência dos fótons primários é uniforme no espaço, na região onde se originam os elétrons secundários, que podem penetrar na cavidade.

- 4) Os elétrons perdem energia continuamente (isto é, a produção de raios δ , elétrons produzidos pelo choque de partículas carregadas, é ignorada).

As duas primeiras condições somente podem ser preenchidas por cavidades, cujas dimensões lineares sejam muito menores do que o alcance dos elétrons. A construção de detectores com cavidades deste tamanho somente foi possível em câmaras de ionização e por esta razão a identificação histórica da teoria da cavidade ocorre com este tipo de detector (Holm e Berry, 1970). Então, segundo Gray, esta consideração é limitada a cavidades pequenas em relação ao alcance dos elétrons, como se verifica na parte “B” da Figura 3.1 e 3.2.

Considere dois elementos de volume, geometricamente idênticos. Um é um elemento de volume sólido com dimensões proporcionais a $(dE / dX)_G$, o poder de freamento de elétrons para o gás, e o outro é uma cavidade pequena preenchida com gás, cujas dimensões são proporcionais a $(dE / dX)_s$, o poder de freamento de elétrons para o sólido. Isto assegura que a energia depositada por passagem de elétron, proporcional a $[(dE / dX)_s / (dE / dX)_G]$, é a mesma nos dois elementos de volume. O número de elétrons cruzando a cavidade com gás é $[(dE / dX)_s / (dE / dX)_G]^2$ vezes maior do que aqueles que cruzam a cavidade sólida, mas o volume da cavidade com gás é $[(dE / dX)_s / (dE / dX)_G]^3$ vezes maior. Então a relação entre a energia depositada no elemento de volume sólido, ${}_vE_s$, e a depositada no elemento de volume gasoso, ${}_vE_G$, é:

$$\frac{{}_vE_s}{{}_vE_G} = \frac{(dE / dX)_s}{(dE / dX)_G} \quad (1)$$

Expressando em função da massa, em que “ ρ ” é a densidade:

$$\frac{{}_mE_s}{{}_mE_G} = \frac{[(1/\rho) dE / dX]_s}{[(1/\rho) dE / dX]_G} \quad (2)$$

Considerando “W” a energia média gasta pelos elétrons dentro do gás para formar um par de íons e considerando “ ${}_mJ_G$ ” como a ionização por unidade de massa produzida no gás, tem-se:

$${}_mE_G = W {}_mJ_G \quad (3)$$

Das equações (1) e (2) resulta:

$${}_mE_S = \frac{[(1/\rho) dE / dX]_s}{[(1/\rho) dE / dX]_G} W {}_mJ_G$$

$${}_mE_S = {}_mS W {}_mJ_G \quad (4)$$

Em que ${}_mS$ é a razão entre os poderes de freamento de massa do sólido em relação ao gás para os elétrons. Esta dedução implica que a energia perdida pelos elétrons é depositada “no lugar marcado” e não é transportada para fora da cavidade pelos raios δ , que é a razão para a afirmação da quarta suposição inicial (Holm e Berry, 1970).

A razão entre os poderes de freamento de massa foi tratada como uma constante nesta dedução simples, mas de fato ela é dependente da energia e portanto deve ser usado o valor médio, obtido do espectro decrescente de elétrons (Holm e Berry, 1970).

3.2.3 Projeto de câmaras de ionização

Na Figura 3.3 é mostrado o diagrama de uma câmara de ionização de eletrodo central, com um circuito para medir o fluxo de corrente, que é feito pelo eletrômetro.

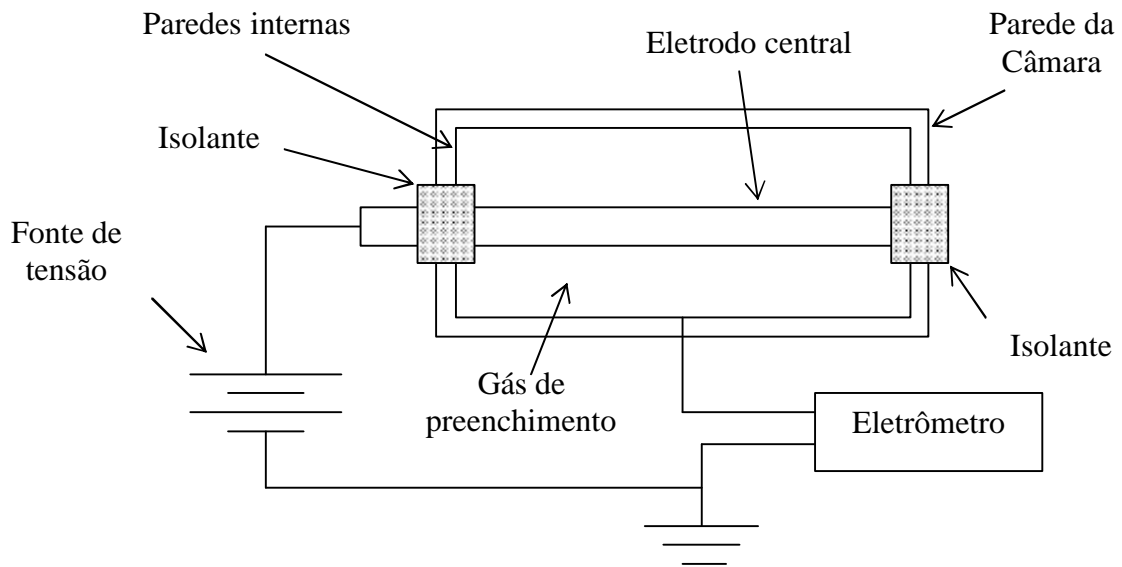


Figura 3.3: Esquema de uma câmara de ionização com eletrodo central (adaptado de Price, 1958).

3.2.4 Eficiência da coleta de íons

O uso da teoria da cavidade pressupõe a realização de medidas confiáveis da ionização. Primeiramente, o principal requisito é que os íons disponíveis formados pela radiação devem ser totalmente coletados pelo campo elétrico aplicado. Quando o campo elétrico entre os eletrodos de uma câmara de ionização é aumentado, o valor da corrente de ionização vai aumentando também, porque cada vez mais íons estão sendo coletados, até que para um certo valor de tensão em diante todos os íons disponíveis formados pela radiação incidente são coletados, então o valor da corrente de ionização permanece constante. Neste ponto a corrente de saturação da câmara de ionização foi atingida (Attix e Roesch, 1968; Holm e Berry, 1970; Knoll, 1989; McLaughlin et al., 1989; Price, 1958), como é mostrado na Figura 3.4.

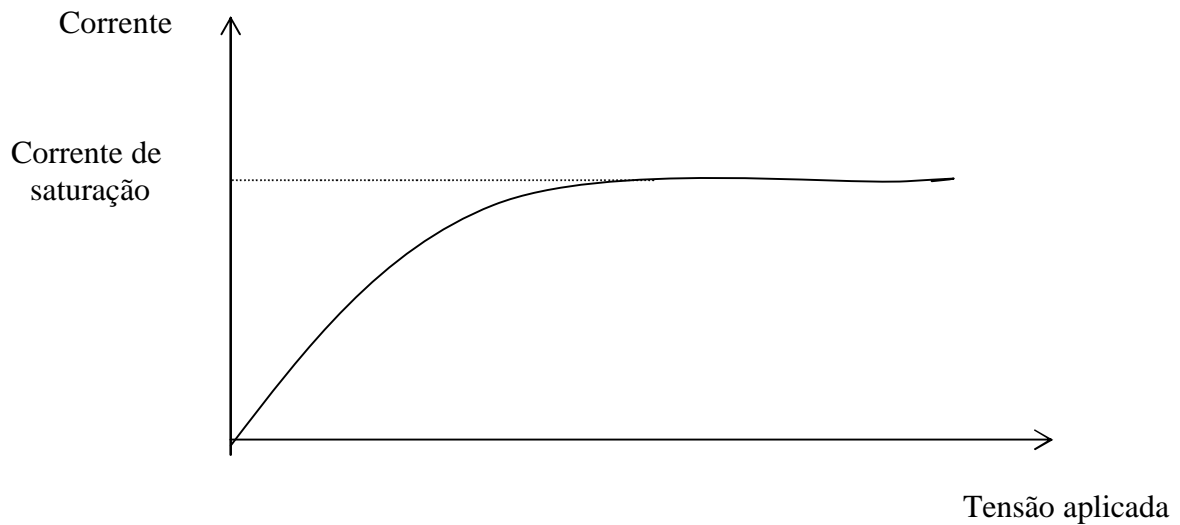


Figura 3.4: Comportamento da corrente fornecida por uma câmara de ionização exposta a uma fonte, aumentando-se a tensão aplicada até atingir a corrente de saturação.

O campo elétrico não deve ser aumentado indefinidamente, pois haverá o risco de ocorrer ionizações por colisão, o que falseará a medida da corrente de ionização. Deve-se tomar cuidado para que o projeto da câmara evite pontas e fios finos, pois estes podem causar regiões de altos e fortes campos elétricos, onde ionizações por colisão podem ocorrer, e cantos, que podem causar regiões de baixos e fracos campos elétricos, onde íons positivos e negativos podem se recombinar.

A recombinação de íons positivos e negativos é, geralmente, dividida em duas categorias: inicial e geral. A recombinação inicial é aquela que ocorre dentro da trajetória de uma partícula ionizante e é independente da taxa de dose, mas aumenta com a densidade de ionização por unidade de comprimento da trajetória. A recombinação inicial é desprezível para elétrons (isto é, quando a ionização é produzida por elétrons, raios-X e raios gama) à pressão atmosférica e quando o campo elétrico aplicado é da ordem de 100 V/cm. Para os elétrons em pressões altas de gás e para partículas mais maciças em todas as pressões de gás, a recombinação inicial pode ser significativa. A recombinação geral se refere à recombinação de íons positivos e negativos originados nas diferentes trajetórias das partículas e que ocorrem depois do rastro da trajetória ter se desintegrado sob a influência do campo aplicado e da difusão. A recombinação geral é diretamente

proporcional à taxa de dose e inversamente proporcional à distância entre os eletrodos. As características de saturação de uma câmara de ionização, após a sua construção, devem ser testadas experimentalmente, para, se necessário, corrigir uma eventual falta de saturação (Holm e Berry, 1970).

3.2.5 Espessura da parede

Na dosimetria de raios-X e gama os elétrons colocados em movimento, pela interação com os fótons, tendem a viajar na mesma direção e sentido do feixe incidente. Próximo à superfície o número de elétrons cruzando uma unidade de área aumenta com a profundidade, porque os elétrons colocados em movimento na primeira camada se somam aos elétrons colocados em movimento na segunda camada e assim por diante. Este acúmulo (“buildup”) continua até que os elétrons, gerados na primeira camada, tenham completado seu alcance, após esta profundidade o número de elétrons permanece, aproximadamente, constante, estabelecendo-se assim o equilíbrio eletrônico (Holm e Berry, 1970, Knoll, 1989; Price, 1958). Isto implica em que o número de elétrons cruzando a cavidade (e portanto a ionização), aumenta com a espessura da parede da câmara, como é mostrado na Figura 3.5. Após a profundidade em que a ionização máxima é atingida, ocorre o decréscimo da ionização conforme a espessura da parede vai aumentando, por causa da atenuação dos fótons. Portanto a profundidade máxima, que os elétrons podem alcançar dentro de um determinado material, dependerá da energia dos fótons incidentes. Frequentemente a espessura escolhida para as paredes da câmara é aquela que fornece a ionização máxima, esta espessura é melhor determinada experimentalmente. Na Tabela 3.1 é apresentada a espessura de parede em função da energia do fóton incidente, para se obter o equilíbrio eletrônico (Holm e Berry, 1970).

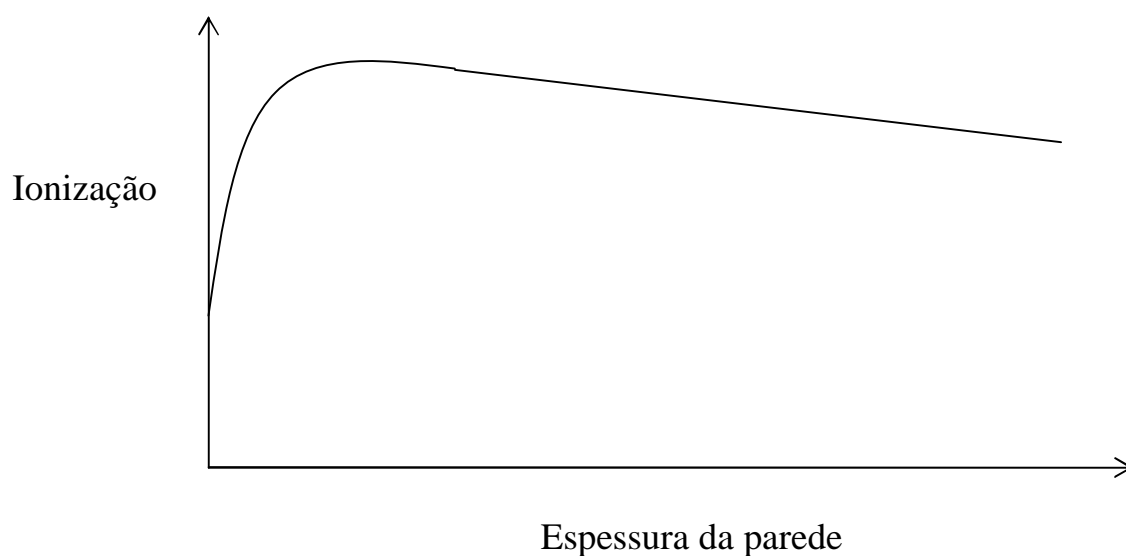


Figura 3.5: Variação da corrente de ionização com a espessura da parede da câmara – curva de acúmulo de carga (buildup).

Tabela 3.1: Valores típicos de espessuras de parede, para provocar o equilíbrio eletrônico, em função da energia dos fótons incidentes e a atenuação provocada por elas (Knoll, 1989, * McLaughlin et al., 1989).

Energia (MeV)	Espessura para ocorrer o equilíbrio eletrônico (g/ cm²)
0,02	0,0008
0,05	0,0042
0,1	0,014
0,2	0,044
0,5	0,17
1	0,43
2	0,96
5	2,5
10	4,9
⁶⁰ Co, raios gama (1,25 MeV)	0,5*

Se o objetivo for medir exposição, a definição de medida desta grandeza exige uma câmara com paredes equivalentes à densidade do ar e a que a espessura desta seja suficiente para estabelecer o equilíbrio eletrônico. Se o objetivo for determinar a dose absorvida em um ponto dentro de um meio, utilizando uma câmara de ionização, é desejável que a parede tenha uma espessura que possibilite o equilíbrio eletrônico e seja tão próxima quanto possível da composição do meio (Holm e Berry, 1970).

3.2.6 Aspectos gerais.

Por causa de sua simplicidade de operação, a câmara de ionização é um instrumento muito versátil. Ela pode ser projetada em vários tamanhos e formas e pode ser empregada para medir todo tipo de radiação, que produza ionização primária ou secundária (Price, 1958). O gás de preenchimento, assim como a sua pressão, irá depender da aplicação da câmara. Quanto maior o W (energia média despendida dentro de um gás para formar um par de íons), maior a energia média necessária para produzir um par de íons e quanto maior a pressão do gás maior o número de pares de íons formados. Deste modo, pode-se selecionar a sensibilidade desejada da câmara (Attix e Roesch, 1968; Knoll, 1989). Na Tabela 3.2 são apresentados os valores de W para elétrons, raios-X e gama, de alguns gases.

Tabela 3.2: Potenciais de ionização para alguns gases (Knoll, 1989)

Gás	W para elétrons, raios X e gama. (ev / par de íons)
Ar	33,8
Argônio	26,4
Hélio	41,3
Hidrogênio	36,5
Nitrogênio	34,8
Oxigênio	30,8

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Projeto da câmara de ionização

O corpo da câmara foi construído utilizando um tubo de aço inoxidável AISI 304, com 10,2 mm de diâmetro, 11,3 mm de comprimento e espessura de parede de 1 mm. Na Figura 4.1 é mostrado o desenho esquemático da câmara de ionização desenvolvida. Para estabelecer o equilíbrio eletrônico, para raios gama originários de uma fonte de ^{60}Co , a densidade superficial mínima é de $0,5\text{ g/cm}^2$ (ver tabela 3.1). Visto que a densidade do aço inoxidável está entre $7,7$ e $7,9\text{ g/cm}^3$ (Kochkin e Chirkévitch, 1986), a espessura mínima de aço inoxidável necessária para se obter o equilíbrio eletrônico é de $0,6\text{ mm}$. Neste trabalho foi utilizado aço inoxidável na espessura de 1 mm , para assegurar o equilíbrio eletrônico na câmara de ionização desenvolvida. O volume total do detector é da ordem de $0,9\text{ cm}^3$.

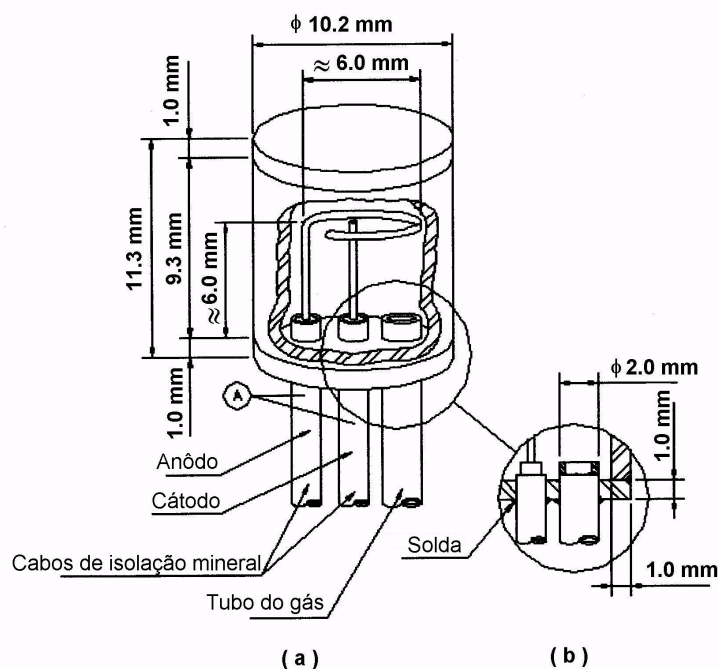


Figura 4.1: (a) Desenho esquemático da câmara de ionização; (b) vista expandida das soldas realizadas nos cabos de isolamento mineral e no tubo do gás.

A Figura 4.2 representa em detalhes o esquema das características do cabo de isolamento mineral utilizado para ligar a câmara de ionização à sua eletrônica associada, como esquematizado na Figura 4.1a

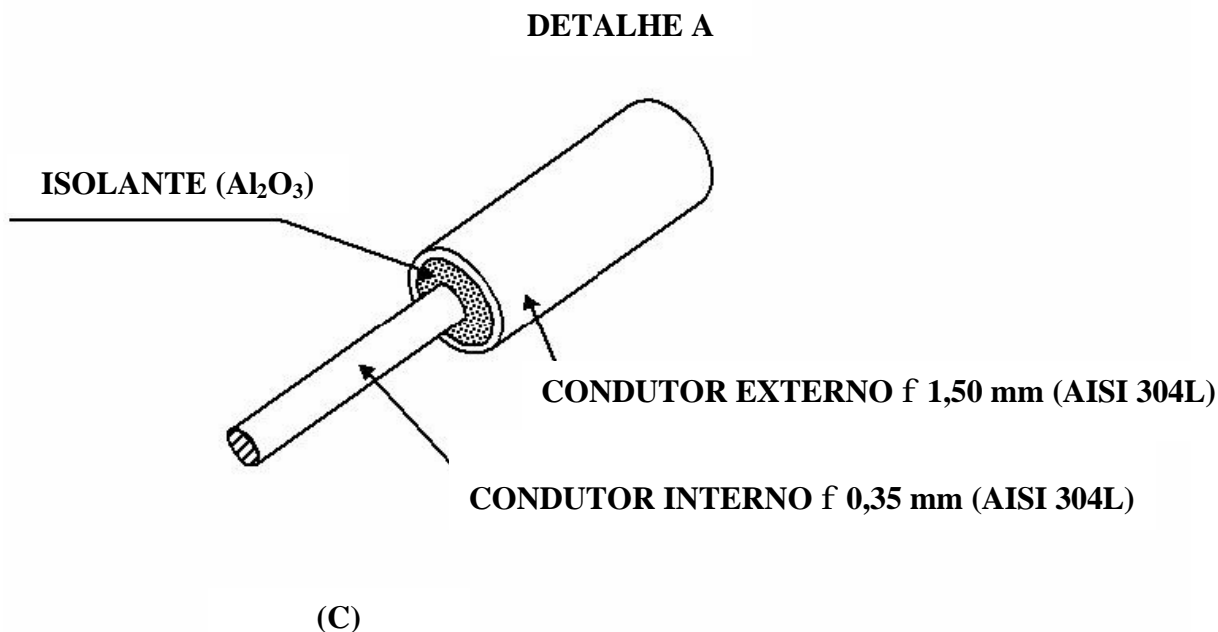


Figura 4.2: (c) Detalhe do cabo de isolamento mineral.

A tensão aplicada à câmara e a corrente por ela gerada são ligadas ao eletrômetro e a fonte de alimentação por meio de cabos coaxiais de isolamento mineral (Figura 4.2), em razão do seu pequeno diâmetro (1,5 mm), que possibilitou soldar um par destes cabos diretamente ao corpo da câmara de ionização, dispensando o uso de conectores, como é mostrado na Figura 4.1. Adicionalmente, estes cabos de isolamento mineral são altamente resistentes à radiação e ao calor (Calvo et al., 1990; McMinn e Goodings, 1971).

Os cabos coaxiais usados em câmaras ionização comerciais são, geralmente, confeccionados de material polimérico, que se deteriora em um tempo muito curto, quando submetidos a taxas de dose altas, por causa de sua baixa resistência à radiação. Além disto este tipo de cabo apresenta um diâmetro de cerca de 5 mm, impossibilitando-os de serem acoplados a uma câmara de ionização de apenas 10,2 mm de diâmetro.

Os fios internos dos cabos coaxiais de isolamento mineral foram usados como catodo e ânodo, e este último não deve ser um círculo completamente fechado, para evitar indução de corrente no ânodo, prejudicando as medidas, no caso de haver alguma fonte de radiofrequência nas proximidades. A capa de aço inoxidável dos cabos foi utilizada como fio terra do circuito, para evitar interferência eletromagnética.

Levando-se em conta os critérios de alto valor de “W” e custo baixo, os gases escolhidos para o preenchimento da câmara de ionização foram: o nitrogênio, com $W = 34,6$ eV/ par de íon, e o argônio, com $W = 26,2$ eV/ par de íon.

4.2 Cabos coaxiais de isolamento mineral

Cabos de isolamento mineral, face as elevadas propriedades físicas e elétricas em ambiente agressivos, são amplamente utilizados na fabricação de cabos termopares, cabos de extensão e compensação e cabos para bulbos de resistência. Suas aplicações abrangem às áreas petroquímicas, aeroespaciais, nucleares e criogênicas; explorações geológicas e processos industriais envolvendo atmosferas corrosivas, altas temperaturas e pressões (Calvo et al., 1990; McMinn e Goodings, 1971).

O cabo de isolamento mineral utilizado neste trabalho foi desenvolvido pelo IPEN – CNEN/SP em colaboração com a empresa ECIL S.A, na década de 80. Ele foi produzido pela técnica de trefilação (processo em que a peça de metal é puxada através de matrizes com orifícios cada vez menores, para que o diâmetro seja reduzido aos poucos, até atingir a dimensão desejada), em virtude da alta produtividade, excelente acabamento superficial e controle dimensional, que esta técnica proporciona (Calvo et al., 1990).

A diferença entre um cabo de isolamento mineral e o convencional reside, basicamente, no tipo de isolante utilizado. Em substituição ao plástico, papel ou borracha, o cabo de isolamento mineral utiliza um dielétrico (substância ou objeto isolador da eletricidade) resistente à degradação provocada por agentes agressivos (como a radiação) (Calvo et al., 1990; McMinn e Goodings, 1971). No cabo de isolamento mineral utilizado neste trabalho, o dielétrico empregado foi a alumina (Al_2O_3), com pureza superior a 99%, baixo teor de sódio e granulometria de $45 \mu m$. Cabos de isolamento mineral oferecem a vantagem adicional de serem mais finos que os convencionais (Calvo et al., 1990; McMinn e Goodings, 1971). Neste trabalho utilizou-se cabos com 1,5 mm de diâmetro externo. Na Figura 4.3 é mostrado, esquematicamente, o cabo de isolamento mineral utilizado neste trabalho. Tanto o fio quanto a capa condutora foram confeccionados com aço inoxidável AISI 304L (Calvo et al., 1990).

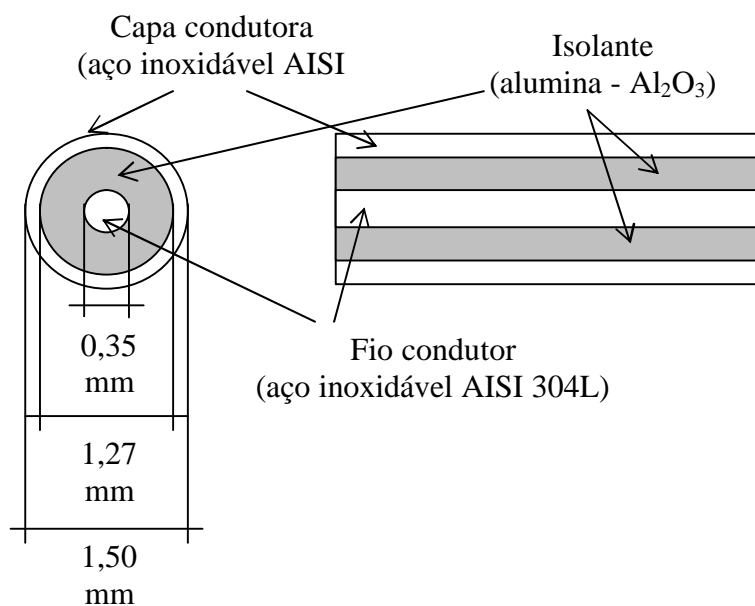


Figura 4.3: Vista frontal e lateral do cabo de isolamento mineral utilizado neste trabalho.

Para a confecção do ânodo e do catodo e para a fixação dos conectores da fonte e do eletrômetro, retirou-se a capa e a alumina das extremidades dos cabos desbastando-as com o auxílio de um esmeril. Após esta etapa os cabos foram deixados em uma estufa, a 400 °C, durante uma semana, para reduzir a umidade no isolante e, conseqüentemente, elevar a sua resistência. A selagem das extremidades dos cabos, após a saída da estufa, foi feita fundido-se pó de vidro de elevado grau de pureza, da marca Schott Glaswerke com coeficiente de dilatação entre 7 e $9,5 \times 10^{-6} / K$.

O pó de vidro foi misturado com água bi-distilada até formar uma pasta homogênea e foi colocado sobre uma das extremidades do cabo, que estava posicionado verticalmente. Esta extremidade foi aquecida, por meio de um mini maçarico, de baixo para cima, para evaporar a umidade, que poderia ter se alojado nela durante o tempo de espera do processo de selagem, e para que o calor conduzido pelo cabo fundisse o vidro evitando, deste modo o contato direto da chama com o vidro. A resistência elétrica medida pelo eletrômetro após a selagem foi da ordem de: $10^{14} \Omega$.

4.3 Dosímetros amber e gammachrome

Os dosímetros “gammachrome”, tipo: YR e “amber perspex” tipo 3042, utilizados para monitoração das irradiações, são fabricados na Inglaterra pela empresa Harwell Dosimeters Ltd. Os dosímetros são de polimetacrilato de metila, confeccionado na forma de retângulos, nas dimensões, aproximadas, de 11 mm x 30 mm e espessura, respectivamente, de 1,7mm (nominal) e $3 \text{ mm} \pm 0,55 \text{ mm}$ e medem, respectivamente, as seguintes faixas de dose absorvida na água: 0,1 a 3 kGy e de 1 kGy a 30 kGy. Para evitar o contato destes com a umidade, à qual são extremamente sensíveis, eles são embalados e selados individualmente em pequenos envelopes de alumínio (Harwell, 2004; McLaughlin et al., 1989). Neste estudo os lotes utilizados de dosímetros “gammachrome” foram os 62 e 63 e o de amber foi o: P. Nas Figuras 4.4 e 4.5 são mostrados os dosímetros “gammachrome” e “amber” embalados e irradiados com doses escalonadas.

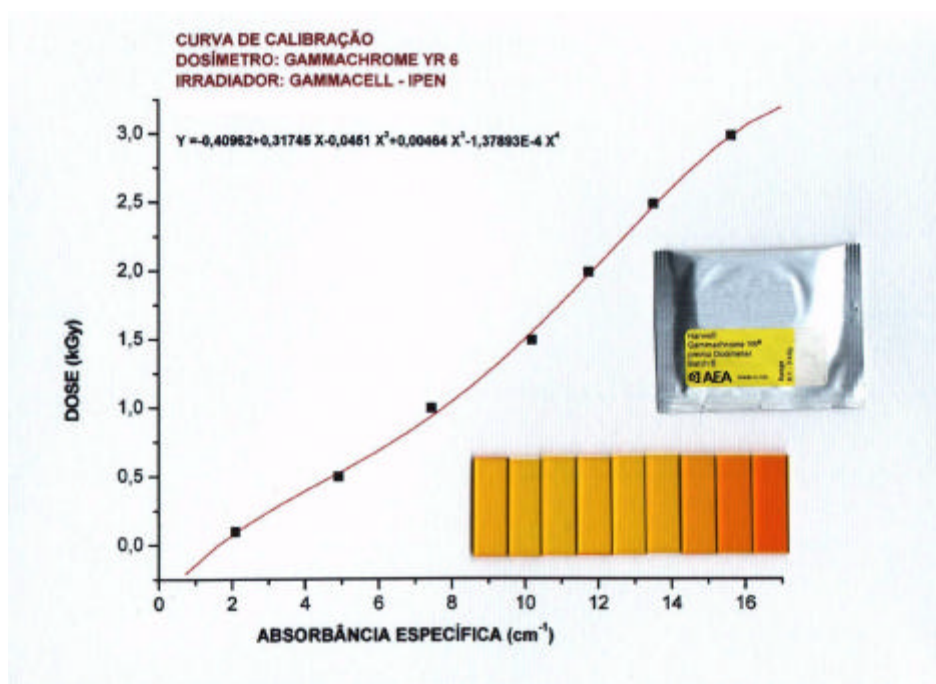


Figura 4.4 Curva de calibração do dosímetro “gammachrome” e o mesmo em seu envelope de alumínio e uma série irradiada com doses escalonadas (figura gentilmente cedida pela MSc. Célia M. Napolitano).

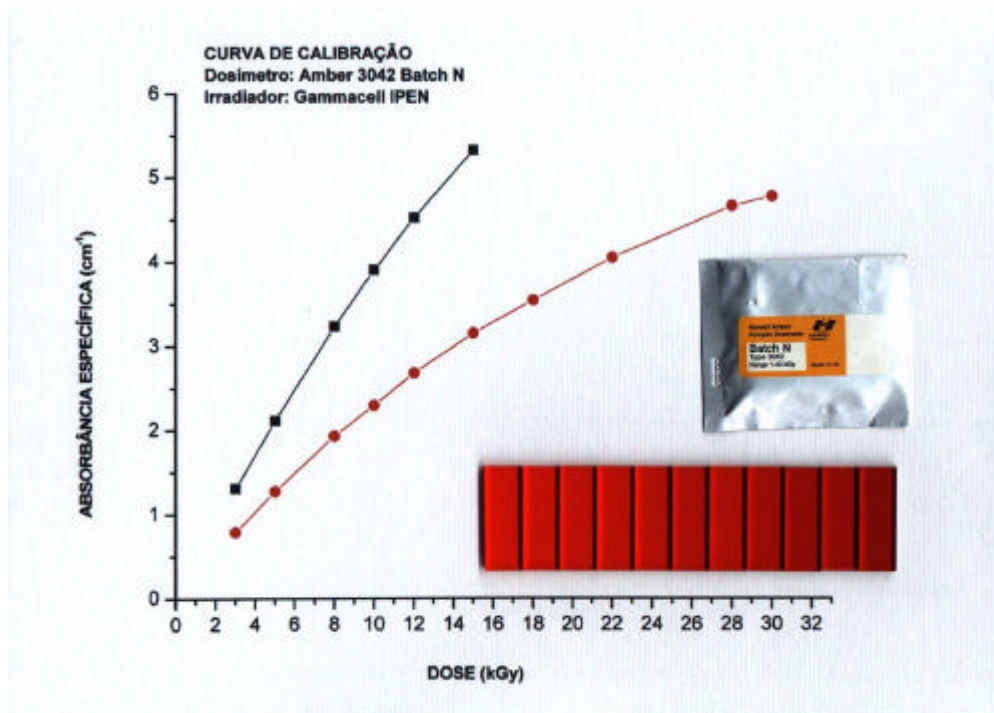


Figura 4.5 Curva de calibração do dosímetro “amber perspex” e o mesmo em seu envelope de alumínio e uma série irradiada com doses escalonadas (figura gentilmente cedida pela MSc. Célia M. Napolitano).

Cada novo lote de dosímetros adquirido pelo CTR (Centro de Tecnologia das Radiações) é calibrado em suas próprias dependências, utilizando-se um irradiador gama de categoria I (Gammacell), que é calibrada duas vezes por ano, com dosímetros de alanina, rastreáveis ao sistema IDAS - International Dose Assurance Service (IAEA – Agência Internacional de Energia Atômica). A calibração dos dosímetros consiste em irradiá-los em doses escalonadas dentro de sua faixa de trabalho, medir a absorbância de cada dosímetro no comprimento de onda indicado pelo fabricante, dividir a absorbância pela espessura do dosímetro correspondente, obtendo-se deste modo a absorção por unidade de comprimento correspondente à dose, o que possibilita a construção de uma curva de calibração, utilizando-se um polinômio de quarta ordem, do tipo:

$$f(x) = a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4$$

Em que: $f(x)$ = dose em kGy.

x = variação da absorção óptica pela espessura da amostra de vidro em mm^{-1} .

a_1 , a_2 , a_3 e a_4 = coeficientes da equação que serão obtidos pelo método dos mínimos quadrados.

A absorbância dos dosímetros “gammachrome”, tipo: YR, deve ser lida em 530 nm e do “amber”, tipo 3042, em 603 nm, quando a dose estiver entre 1 e 10 kGy e em 651 nm, quando a dose estiver entre 10 e 30 kGy. O desvio padrão destes dosímetros é menor do que 3% (Harwell, 2004; McLaughlin et al., 1989).

Os dosímetros utilizados no presente trabalho foram gentilmente cedidos pelo Laboratório de Dosimetria para Altas Doses do CTR/IPEN.

Para a medida da absorbância dos dosímetros foi utilizado um espectrofotômetro, marca: Shimadzu; modelo: UV-1601PC (Japão) e a medida da espessura por um micrômetro, marca: Mitutoyo; modelo: 9080972 (Japão).

4.4 Procedimento para medidas no Irradiador gama de categoria I

Utilizando-se um irradiador gama de categoria I de ^{60}Co , fabricada pela AECL (Atomic Energy of Canada Limited), modelo: 220, com 0,46 PBq (12513 Ci) em 8 de julho de 1997, com atividade da ordem de 0,25 PBq (7 kCi) e taxa de dose máxima de aproximadamente 6 kGy/h (março de 2002), foram realizadas medidas para se determinar a corrente de saturação da câmara, preenchida com nitrogênio ou argônio analíticos, da White Martins, entre as pressões de 1 a 2×10^5 Pa (1 a 2 bar).

Utilizando o nitrogênio ou argônio a pressão de 10^5 Pa (1 bar) foram obtidas curvas de carga por dose para diferentes taxas de dose. Estas diferentes taxas de dose foram obtidas por meio de absorvedores cilíndricos de chumbo com diferentes espessuras, colocados dentro da câmara de irradiação do irradiador gama de categoria I. Todas as unidades do conjunto de absorvedores disponível no Laboratório de Fontes Intensas de Radiação do CTR foram utilizados. Este conjunto é composto de 3 absorvedores que atenuam o fluxo de radiação em 50%, 70% e 90%. Assim a câmara de ionização foi testada com 4 taxas de dose diferentes, sendo uma para cada absorvedor e uma sem absorvedor. Como em todas as pressões a corrente de saturação, sem a utilização de absorvedor, foi da ordem de 10^{-9} A, optou-se pela pressão de 10^5 Pa (1 bar), que é a pressão atmosférica, para realizar as medidas de carga por dose, em razão de ser tecnicamente mais simples manter a câmara nesta pressão. A temperatura durante todas as irradiações, dentro da câmara do

irradiador gama de categoria I, foi da ordem de 35 °C. A faixa de dose escolhida para ser medida foi entre 0,5 e 7 kGy, por:

- a) Estar dentro da faixa utilizada nos métodos de irradiação para validação de produtos para esterilização, segundo a ISO 11137.
- b) O irradiador gama de categoria I estar disponível apenas em horário comercial (das 8 às 17h).

As doses foram medidas por meio de dosímetros de polimetacrilato de metila, fabricados pela Harwell (Inglaterra), sendo usado para as doses menores do que 2 kGy o dosímetro tipo “gammachrome” YR, cuja faixa de atuação vai de 100 Gy a 3 kGy, e para as doses acima de 2 kGy foi usado o dosímetro tipo “amber” 3042, cuja faixa de atuação vai de 1 a 30 kGy. Os dosímetros foram colocados imediatamente abaixo da câmara de ionização, dentro da câmara do irradiador gama de categoria I, sendo sustentados por um suporte feito de isopor[®]. Na Figura 4.6 é mostrado, esquematicamente, o arranjo experimental tanto para as medidas das correntes de saturação tanto para as medidas de correlação de carga com dose.

Estas medidas eram iniciadas, no mínimo, uma hora após a fonte de tensão e o eletrômetro serem ligados, visando à estabilização do equipamento e assim evitar oscilações nas leituras. Todas as curvas obtidas de carga por dose foram repetidas pelo menos três vezes, para verificar a reprodutibilidade das medidas. Antes e após a obtenção de cada curva de carga por dose, eram obtidas as curvas da corrente de saturação da câmara, com o objetivo de verificar se esta variou durante o experimento e entre os experimentos, que utilizaram o mesmo absorvedor. A fonte de tensão utilizada foi da marca Keithley Instruments, modelo: 247 High Voltage Supply. O eletrômetro foi da marca Keithley Instruments, modelo: 610C.

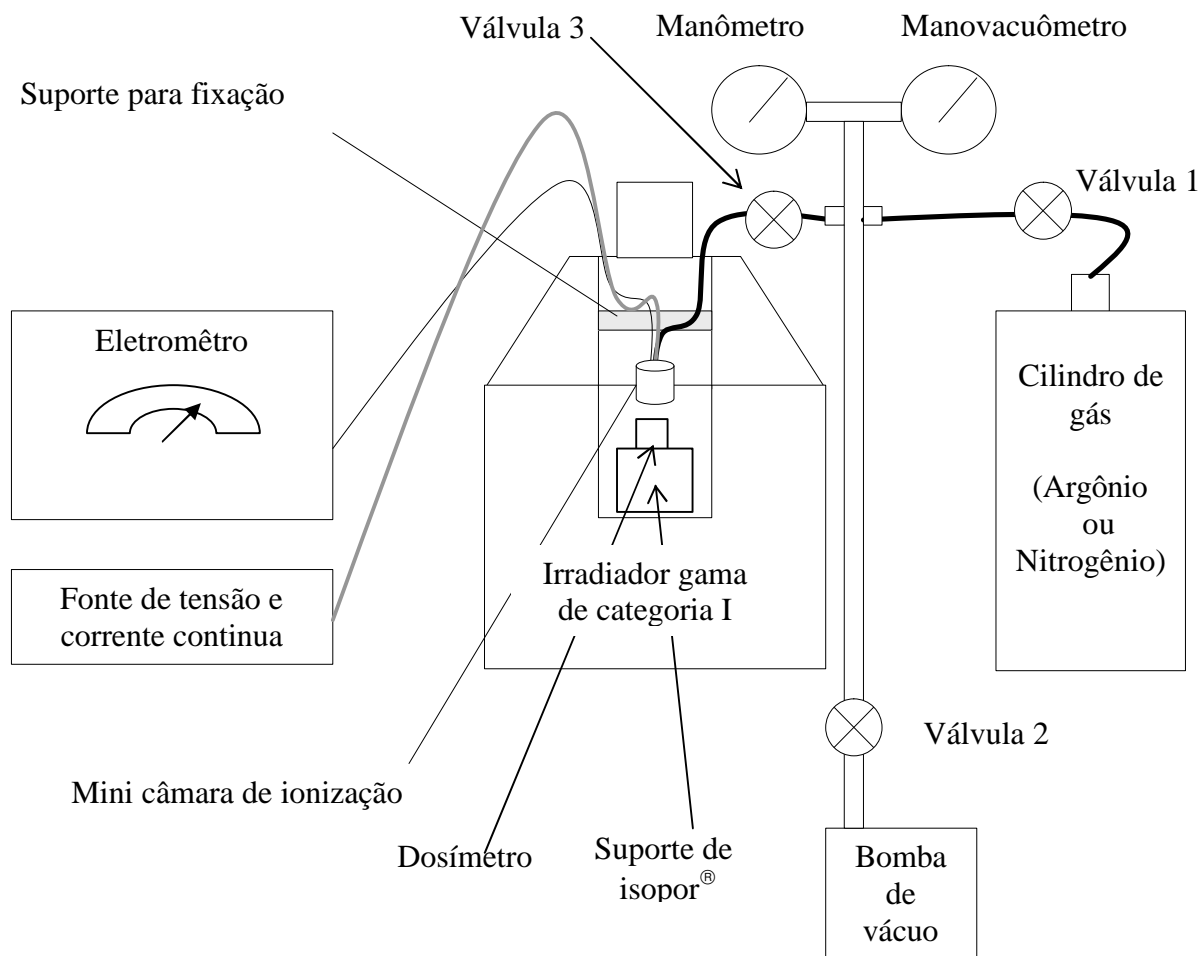


Figura 4.6 Esquema do arranjo experimental, para a medida das correntes de saturação e para as medidas de carga e dose no irradiador gama de categoria I do CTR.

Para as medidas das correntes de saturação, se adotou o seguinte procedimento, para o esvaziamento e enchimento da câmara de ionização:

- 1) Certificar que a válvula 1 e a do cilindro estavam fechadas.
- 2) Abrir a válvula 2 e a 3 e ligar a bomba mecânica de vácuo.
- 3) Esperar o manovacuômetro chegar a um valor mínimo [por volta de 10^3 Pa (10^{-2} bar)]. Esta operação requer um tempo de, aproximadamente, 2 minutos.
- 4) Abrir o registro do cilindro e a válvula 1.
- 5) Esperar cerca de 15 segundos e fechar a válvula 2.
- 6) Desligar a bomba de vácuo.

- 7) Fechar a válvula 1 até o manômetro chegar a zero, abrindo-a novamente. Esta operação deve ser repetida pelo menos mais duas vezes, cujo objetivo é assegurar que a câmara de ionização esteja livre do ar atmosférico.
- 8) Por meio da válvula 1 e do manômetro selecionar a pressão na linha e, conseqüentemente, na câmara de ionização.
- 9) Se a pressão desejada é a atmosférica, fechar a válvula do cilindro e a 1 e quando o manômetro chegar a zero fechar a válvula 3.

Selecionada a pressão desejada, iniciar as medidas de corrente por tensão aplicada, para determinar a corrente de saturação da câmara, para o tipo de gás selecionado.

O valor da medida da taxa de dose em um irradiador gama de categoria I aumenta do centro de sua câmara de irradiação para as bordas e do topo e do fundo para o centro (McLaughlin et al., 1989). Por isto a posição da câmara de ionização era fixada, aproximadamente, no meio da câmara do irradiador e um dosímetro colocado imediatamente abaixo dela (Figura 4.6 e 4.7), o qual fornece a dose obtida durante todo o experimento. Ao dividir esta dose pelo tempo total de irradiação, Obtém-se a taxa de dose para a posição onde a câmara se encontra, na melhor aproximação possível.

Para as medidas de carga por dose foi usado o mesmo procedimento de esvaziamento e enchimento da câmara de ionização, utilizado para as medidas das correntes de saturação. As medidas de carga acumulada e dose foram repetidas pelo menos 3 vezes sem absorvedor e com cada um dos absorvedores, preenchendo-se a câmara com nitrogênio ou argônio a pressão atmosférica, ou seja, de 10^5 Pa (1 bar). Para isto se adotou o seguinte procedimento:

Sem absorvedor:

Determinar a corrente de saturação antes de iniciar o experimento.

Selecionar a tensão da fonte para operar em corrente de saturação e o eletrômetro para medir carga.

Com base na taxa de dose medida calcular os tempos de exposição para se obter doses entre 0,5 e 7 kGy e usar estes valores de tempo para programar o irradiador gama de categoria I.

Colocar dois dosímetros identificados para duas doses no suporte de isopor[®], debaixo da câmara de ionização.

Iniciar a irradiação.

Após o tempo estipulado para a primeira dose interromper a irradiação e retirar o dosímetro referente à primeira dose e anotar o valor da carga registrado pelo eletrômetro e reiniciar a irradiação até completar o tempo estipulado para a segunda dose.

Após o tempo estipulado para a segunda dose interromper a irradiação e retirar o dosímetro referente à segunda dose e anotar o valor da carga e zerar o eletrômetro, colocar dois dosímetros identificados para as próximas duas doses e seguir o mesmo procedimento até encerrar todas as irradiações.

No final do experimento determinar novamente a corrente de saturação, para verificar se esta variou ou não durante as medidas.

Com absorvedor

Determinar a corrente de saturação antes de iniciar o experimento.

Selecionar a tensão da fonte para operar em corrente de saturação e o eletrômetro para medir carga.

Para se obter os tempos de exposição, que fornecessem os mesmos valores de carga obtidos sem absorvedor e, deste modo, facilitar a comparação dos dados obtidos com e sem absorvedores, seguiu-se o seguinte procedimento: 1) Dividir os valores das cargas obtidas sem absorvedor pela corrente de saturação medida com o absorvedor, o que resulta nos tempos de exposição; 2) Programar o irradiador gama de categoria I com estes tempos de exposição.

Utilizar o mesmo procedimento usado para a irradiação sem absorvedor e determinar a corrente de saturação ao final das exposições, para verificar se esta variou ou não durante o experimento.

Após a leitura dos dosímetros construir as curvas de dose por carga acumulada, sem e com absorvedor, na pressão de 10^5 Pa (1 bar) de nitrogênio ou argônio.

Na Figura 4.7 é mostrado o detalhe interno da câmara do irradiador gama de categoria I com o posicionamento do dosímetro e da câmara de ionização e na Figura 4.8 é mostrada uma visão geral do arranjo experimental.

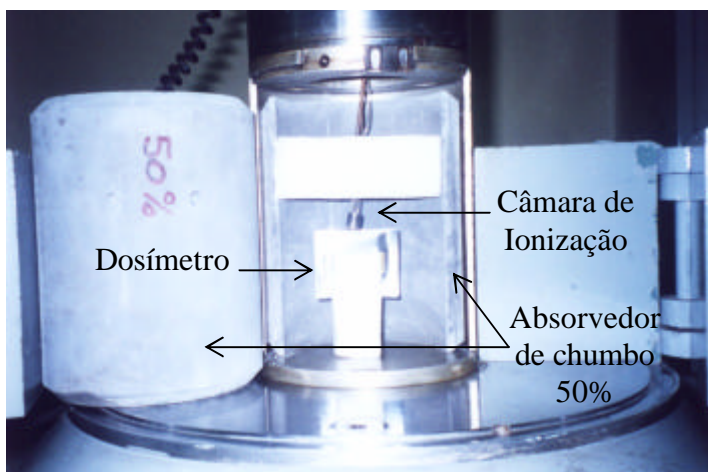


Figura 4.7 Detalhe interno da câmara do irradiador gama de categoria I mostrando o posicionamento do dosímetro e da câmara de ionização e o absorvedor de chumbo para 50% de atenuação



Figura 4.8 Vista geral do arranjo experimental.

4.5 Procedimento para medidas no irradiador de grande porte

Para as medidas realizadas no irradiador gama de categoria I, a câmara de ionização foi preenchida com argônio ou nitrogênio a pressão de 10^5 Pa (1 bar) para cada seqüência de medidas, segundo o procedimento descrito no item 4.4. Para as medidas no irradiador de grande porte, uma válvula foi adaptada à entrada de gás da câmara. Após o procedimento de preenchimento, esta válvula foi fechada para manter o gás dentro da câmara a pressão de 10^5 Pa (1 bar) durante todas as seqüências de medidas. Desta maneira este procedimento foi executado uma única vez para cada gás.

O procedimento de enchimento consistia em:

- 1) Encher um béquer com água a 50 °C.
- 2) Mergulhar a câmara e um termômetro na água
- 3) Esperar a temperatura chegar a 30 °C.
- 4) Executar o mesmo procedimento descrito no item 4.4, para enchimento da câmara no irradiador gama de categoria I.
- 5) Fechar a válvula adaptada à entrada de gás da câmara.

A finalidade de encher a câmara a temperatura de 30 °C é garantir a reprodutibilidade da pressão dentro da câmara, caso seja necessário enchê-la novamente, em razão de algum acidente que provocasse um vazamento da mesma. Na Figura 4.9 é mostrado, esquematicamente, o arranjo experimental para preenchimento da câmara.

Após a adaptação da válvula à entrada de gás da câmara, a estanqueidade do conjunto (câmara de ionização, tubo de enchimento e válvula) foi verificada mergulhando-o em um tanque com água e preenchendo-o com uma pressão de 5×10^5 Pa (5 bar) de nitrogênio, em que não se observou a formação de bolhas.

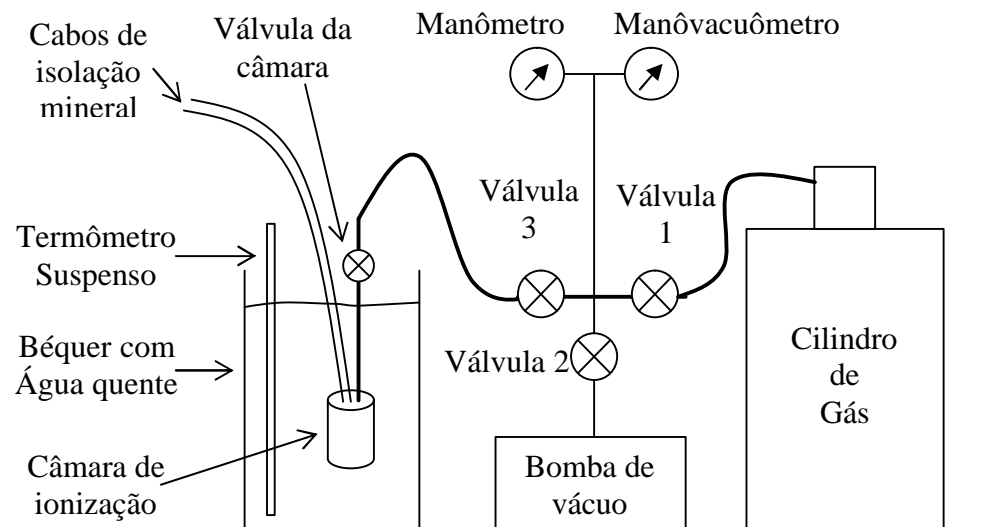


Figura 4.9 Arranjo experimental para preenchimento da câmara a pressão de 10^5 Pa (1 bar) e a $30\text{ }^\circ\text{C}$.

A câmara ionização foi instalada na posição de irradiação estática do irradiador gama tipo IV, fabricado pelo IPEN/CNEN-SP (Brasil), com atividade de, aproximadamente $3,7\text{ PBq}$ (100 kCi) de ^{60}Co em janeiro de 2005. Nas Figuras 1.1 e 1.2 são mostrados, respectivamente o irradiador em perspectiva e a posição de irradiação estática. Na Figura 4.10 é mostrada, esquematicamente, a vista superior do trajeto dos cabos que fazem a ligação entre a câmara até o ponto de acompanhamento, do lado de fora do irradiador, onde se encontra o eletrômetro e a fonte de tensão. Na Figura 4.11 é mostrado o posicionamento da câmara na posição de irradiação estática, ao passo que na Figura 4.12a e b são mostrados: a) o ponto de conexão entre os cabos de isolamento mineral e os cabos coaxiais comuns e b) a passagem dos cabos coaxiais por um conduto na parede do irradiador. Na Figura 4.13 é mostrado o ponto de acompanhamento, onde o eletrômetro e a fonte de tensão foram colocados. O trajeto total possui cerca de 14 m e os primeiros 7 m são feitos pelos cabos de isolamento mineral e o restante, em que o nível de taxa de dose diminuiu consideravelmente, por cabos coaxiais comuns de isolamento polimérica, em virtude do custo alto dos cabos de isolamento mineral.

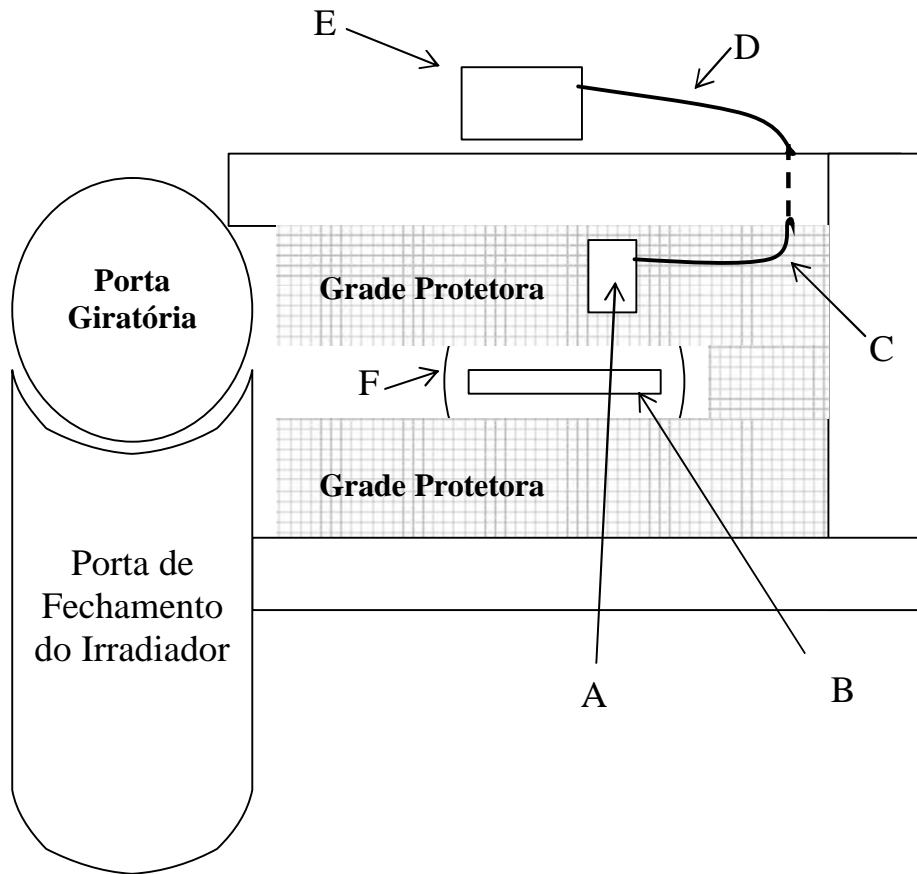


Figura 4.10: Vista esquemática, superior e em corte do irradiador.

A: Posição de irradiação estática e da câmara de ionização.

B: Posição da fonte, quando em exposição.

C: Posição até onde chegam os cabos de isolamento mineral soldados a câmara.

D: Trajeto dos cabos coaxiais comuns até o ponto de acompanhamento.

E: Ponto de acompanhamento.

F: Tanque de armazenamento da fonte.

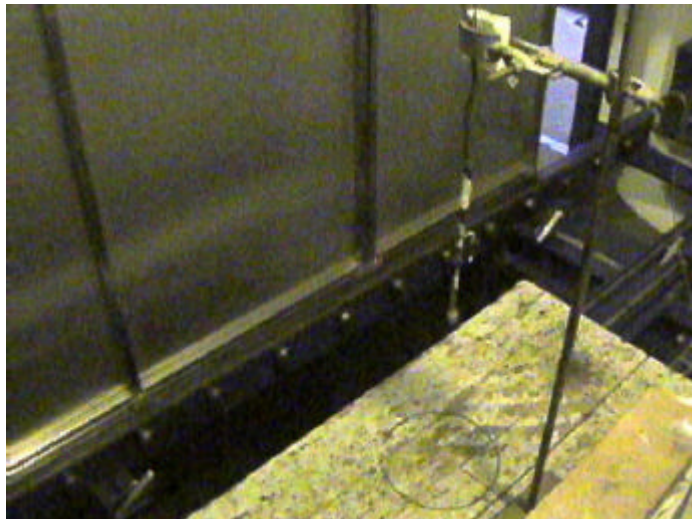


Figura 4.11: Posicionamento da câmara de ionização na posição de irradiação estática do irradiador gama de categoria IV, fabricado pelo IPEN/CNEN-SP.

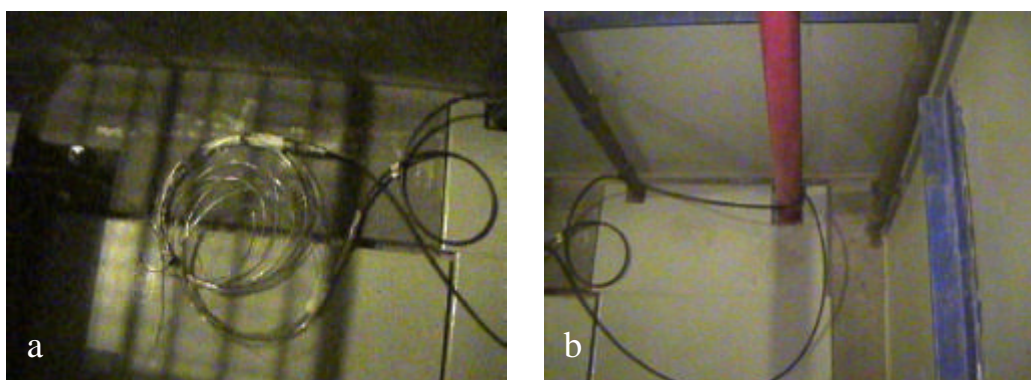


Figura 4.12: a) Detalhe da conexão entre os cabos de isolamento mineral e os cabos coaxiais comuns.
b) Ponto de passagem dos cabos coaxiais pela parede do irradiador.

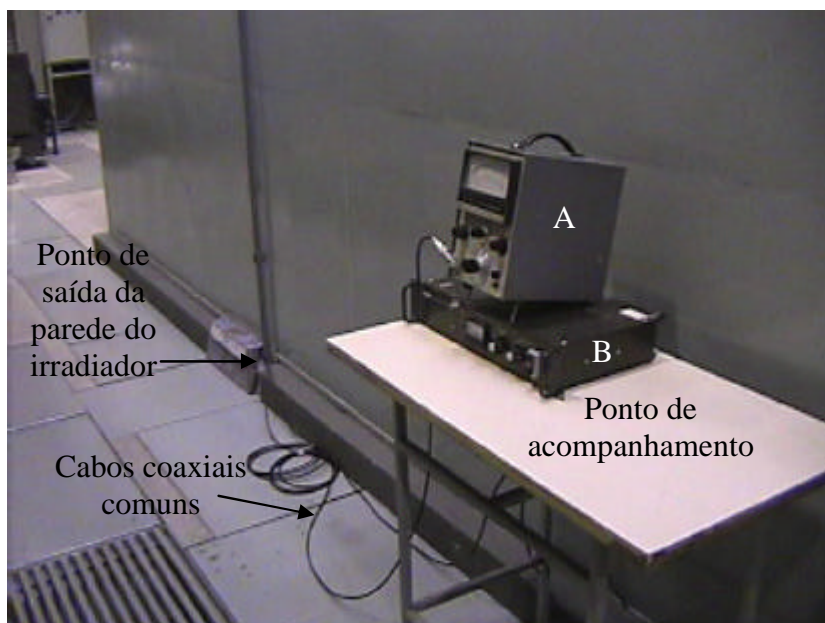


Figura 4.13: Ponto de acompanhamento com o eletrômetro (A) e a fonte de tensão (B)

Na Figura 4.14 é mostrado um esquema da vista lateral e frontal da sala de irradiação, mostrando os contêineres de alumínio que transportam o material para ser irradiado em dois planos (superior e inferior), a câmara de ionização na posição de irradiação estática e o suporte para amostras. Por este esquema pode-se notar que a maior parte da radiação que chega até a câmara e as eventuais amostras irá depender da densidade do contêiner a sua frente. O contêiner utilizado pelo irradiador do IPEN é feito de placas de alumínio de 2mm de espessura e possui as seguintes dimensões: altura: 100 cm; largura: 70 cm; profundidade: 60 cm. E as dimensões largura e profundidade são as que ficam, respectivamente, paralela e perpendicular à fonte, durante o trajeto dos contêineres na sala de irradiação. A capacidade máxima de carga de um contêiner é de 300 kg ou uma densidade aparente máxima de $0,71 \text{ g/cm}^3$ [$300 \text{ kg} \div (100 \times 70 \times 60 \text{ cm}^3)$] (Rela et al, 2002).

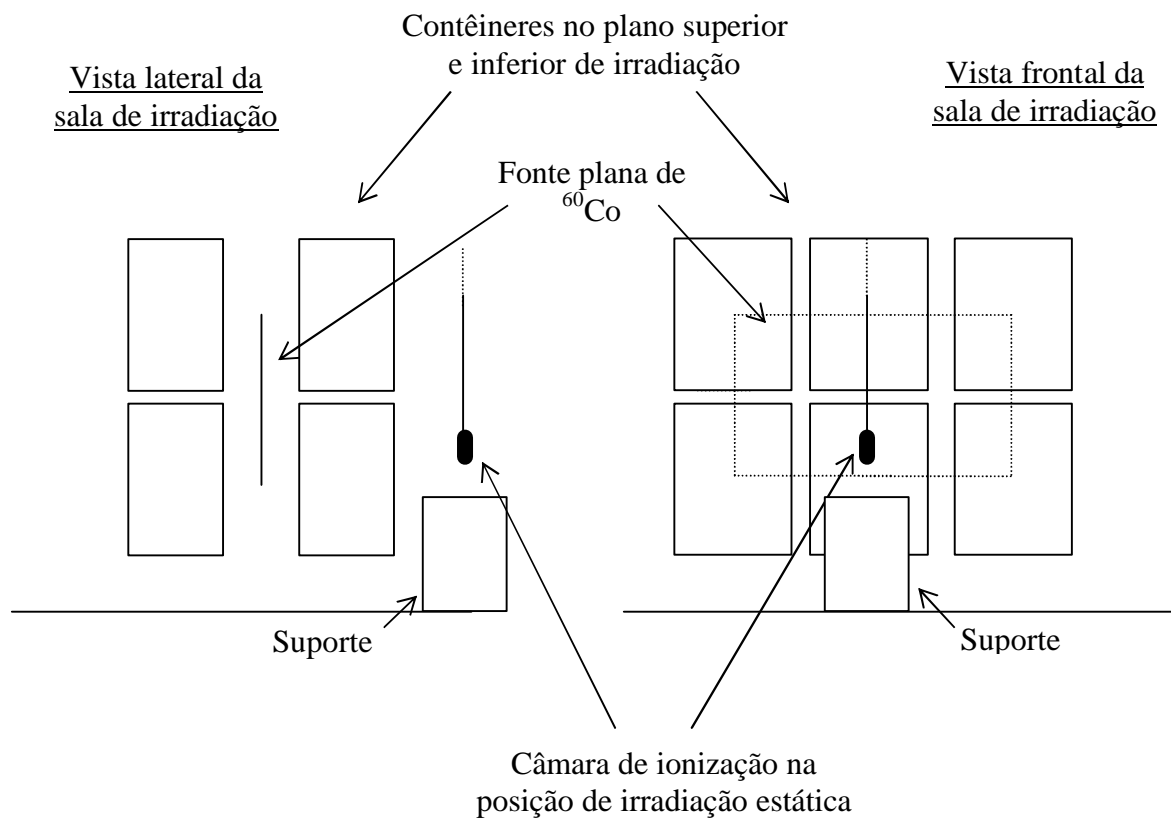


Figura 4.14: Esquema da vista lateral e frontal da sala de irradiação, mostrando os contêineres de alumínio que transportam o material para ser irradiado e a câmara de ionização na posição de irradiação estática.

Em razão do irradiador estar em início de atividades, a oferta de materiais para irradiação era limitada. Portanto a maior parte das irradiações da câmara ocorreu sem contêineres na sala de irradiação. Para simular a absorção da radiação quando estes estivessem presentes foi utilizada uma parede de chumbo com 20 cm de altura e 2 cm de espessura. O que equivale a uma densidade superficial de: $22,7 \text{ g/cm}^2$ ($11,35 \text{ g/cm}^3 \times 2 \text{ cm}$), esta densidade superficial representa um contêiner com densidade aparente de $0,38 \text{ g/cm}^3$ ($22,7 \text{ g/cm}^2 \div 60 \text{ cm}$), ou seja, um contêiner com cerca de 160 kg [$0,38 \text{ g/cm}^3 \times (60 \times 70 \times 100) \text{ cm}^3$].

Para simular a irradiação de uma amostra foi providenciado um tarugo de polietileno de $0,9 \text{ g/cm}^3$, com 25 cm de altura, 7,6 cm de raio e com um furo central de 1,9 cm de diâmetro e 15 cm de profundidade para alojar a câmara de ionização. O que representa uma amostra com densidade superficial máxima de $5,1 \text{ g/cm}^2$ [$0,9 \text{ g/cm}^3 \times (7,6 - 1,9) \text{ cm}$] ou um recipiente de 5,1 cm de raio ($5,1 \text{ g/cm}^2 \div 1 \text{ g/cm}^3$) preenchido com água.

Assim a câmara de ionização foi testada em quatro configurações na posição de irradiação estática:

- Exposta ao ar (Figura 4.11).
- Dentro do tarugo de polietileno ($5,1 \text{ g/cm}^2$) (Figura 4.15).
- Exposta ao ar e com a parede de chumbo ($22,7 \text{ g/cm}^2$) (Figura 4.16).
- Dentro do tarugo de polietileno e com a parede de chumbo ($27,8 \text{ g/cm}^2$) (Figura 4.17).



Figura 4.15: Câmara de ionização na posição de irradiação estática dentro do tarugo de polietileno.



Figura 4.16: Câmara de ionização na posição de irradiação estática com a parede de chumbo.



Figura 4.17: Câmara de ionização na posição de irradiação estática dentro do tarugo de polietileno e com a parede de chumbo.

A taxa de dose máxima na posição de irradiação estática, ou seja, sem nenhuma barreira, foi de 0,9 kGy/h, avaliada por meio de dosímetros Amber Perspex. Uma taxa de dose bem inferior a última taxa de dose máxima obtida no irradiador gama de categoria I, ou seja, sem absorvedores (4,8 kGy/h). Isto significou um estreitamento da faixa de dose investigada, em virtude do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP operar dentro de um horário comercial (aproximadamente 9 horas por dia).

As medidas de correntes de saturação foram realizadas variando a tensão de 0 a 500V, cujas medidas foram repetidas pelo menos três vezes em cada configuração. Com os resultados obtidos para as três medidas, foram obtidas as curvas médias da corrente de saturação em função da tensão, para cada uma das quatro configurações de exposição da câmara.

As medidas de carga e dose foram obtidas irradiando a câmara e ajustando o eletrômetro para leitura da carga. A tensão aplicada foi suficiente para manter a câmara operando dentro do patamar da corrente de saturação para cada uma das configurações.

5. RESULTADOS

5.1 Câmara de ionização

Na figura 5.1 é mostrada a câmara de ionização desenvolvida, com os cabos de isolamento mineral e o tubo de enchimento de gás soldados a ela. A relação entre o sinal, produzido pelo detector e transmitido até o eletrômetro por cerca de 20 m de cabo (15 m de cabos de isolamento mineral e 5 m de cabos coaxiais comuns), e o ruído foi da ordem de pelo menos 100.

Resultados similares foram encontrados para a câmara de ionização preenchida com nitrogênio ou argônio, sugerindo que os dois gases são adequados para a aplicação proposta.

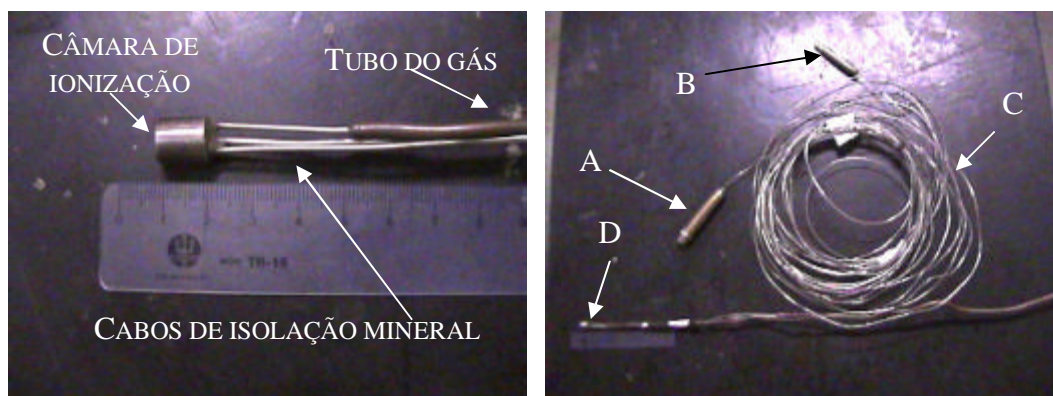


Figura 5.1 À esquerda: detalhe da câmara de ionização; à direita vista geral do conjunto:
 A: Conector de sinal.
 B: Conector da fonte de tensão.
 C: Cabos de isolamento mineral (15 m).
 D: Câmara de ionização.

5.2 Câmara preenchida com nitrogênio e irradiada no irradiador gama de categoria I

A maior parte destas medidas foi realizada no primeiro semestre de 2002, quando o irradiador gama de categoria I, apresentava uma taxa de dose máxima de, aproximadamente, 5,9 kGy/ h. Na Figura 5.2 são mostradas as correntes de saturação obtidas com a câmara de ionização preenchida com nitrogênio em pressões de 1 a 1,8 x 10⁵Pa (1 a 1,8 bar), exposta no irradiador gama de categoria I sem a utilização de

absorvedores. Por meio desta figura pode-se observar que a corrente de saturação, para a maior pressão ($1,8 \times 10^5$ Pa ou 1,8 bar) é cerca de 3,50 nA e para a menor pressão (10^5 Pa ou 1 bar ou atmosférica) é cerca de 1,90 nA, ambas obtidas com a tensão de cerca de 320 V. Para avaliar a reprodutibilidade das medidas, foram realizadas, pelo menos, três experimentos nas mesmas condições, para cada pressão. As três curvas obtidas, para cada pressão, apresentaram diferenças entre si menores do que 1 %.

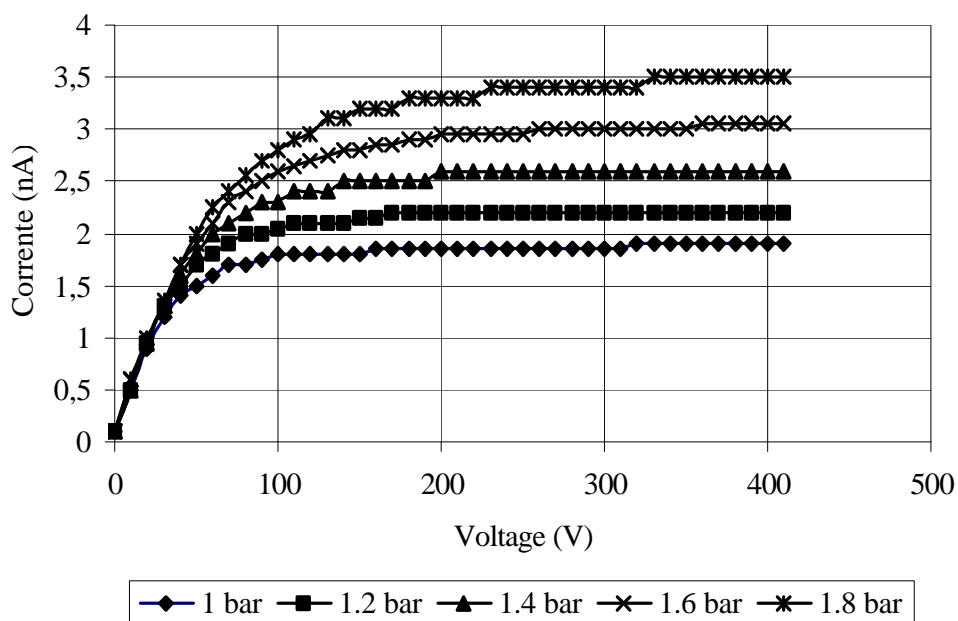


Figura 5.2: Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a várias pressões, irradiada no irradiador gama de categoria I sem absorvedores (1 bar = 10^5 Pa).

As correntes de saturação da câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e exposta no irradiador gama de categoria I com os absorvedores de 90, 70, 50% e sem absorvedor são mostradas na Figura 5.3 e na Tabela 5.1. Todas as correntes foram facilmente medidas pelo equipamento utilizado, o que demonstra a viabilidade de se trabalhar com a pressão de 10^5 Pa (1 bar). Para avaliar a reprodutibilidade das medidas, foram realizados, pelo menos, três experimentos para cada taxa de dose. As três curvas obtidas, para cada taxa de dose, apresentaram diferenças entre si menores do que 1 %.

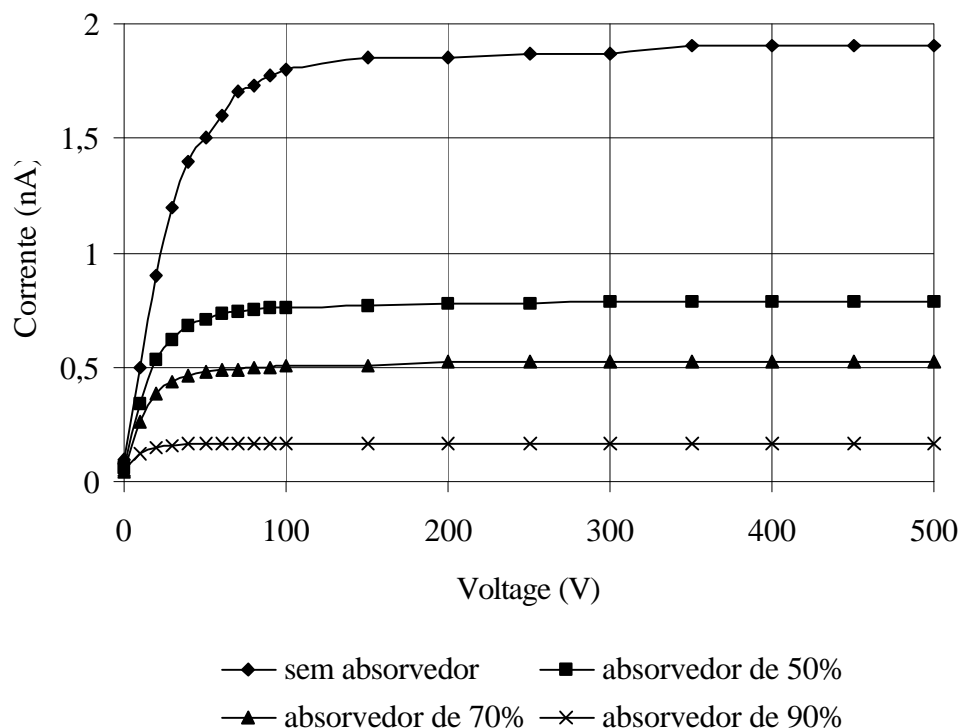


Figura 5.3: Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I sem e com absorvedores.

Tabela 5.1: Resultados da corrente de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), a tensão mínima necessária para estabelecê-la e a taxa de dose obtida, para os diferentes absorvedores e sem absorvedor de chumbo no irradiador gama de categoria I.

Absorvedor de chumbo	Corrente de saturação	Tensão mínima	Taxa de dose
90 %	0,165 nA	50 V	0,6 kGy/h
70 %	0,520 nA	200 V	1,8 kGy/h
50 %	0,790 nA	300 V	2,6 kGy/h
Sem absorvedor	1,900 nA	350 V	5,9 kGy/h

Pela Figura 5.3 e pela Tabela 5.1 pode-se constatar que quanto maior a taxa de dose, maior a corrente de saturação e maior a tensão mínima requerida. Por causa destes resultados foi utilizada a tensão de 400 V durante todas as medidas de carga por dose, para

garantir que a câmara de ionização trabalhasse na faixa da corrente de saturação, em qualquer uma das taxas de dose fornecidas pelo irradiador gama de categoria I.

Nas Figuras 5.4, 5.6, 5.8 e 5.10 são mostradas as curvas obtidas de carga por dose em tempos diferentes, utilizando-se cada um dos absorvedores e sem a utilização destes. As respectivas curvas resultantes são mostradas nas Figuras 5.5, 5.7, 5.9 e 5.11, que reúnem em cada figura todos os pontos para cada caso. Todas as curvas exibiram linearidade crescente entre as cargas coletadas e as doses medidas.

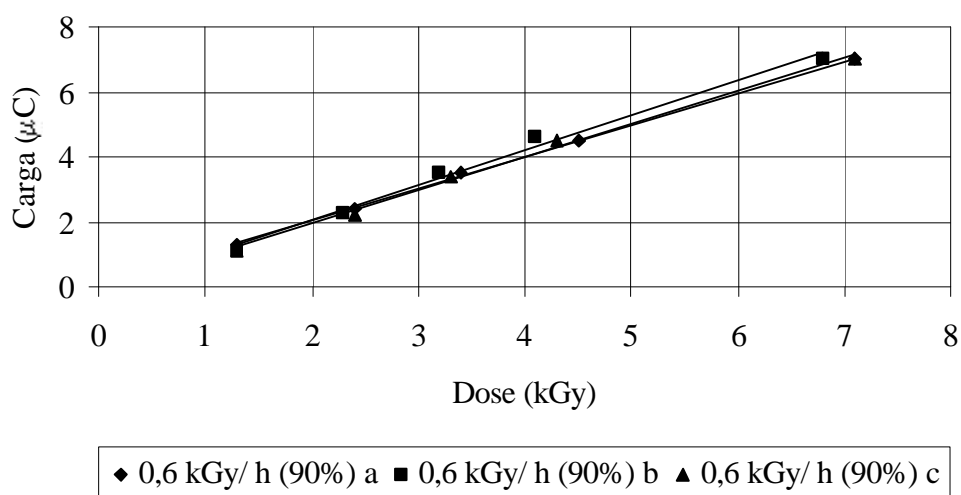


Figura 5.4: Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 0,6 kGy/h, obtidas utilizando absorvedor de chumbo para 90%.

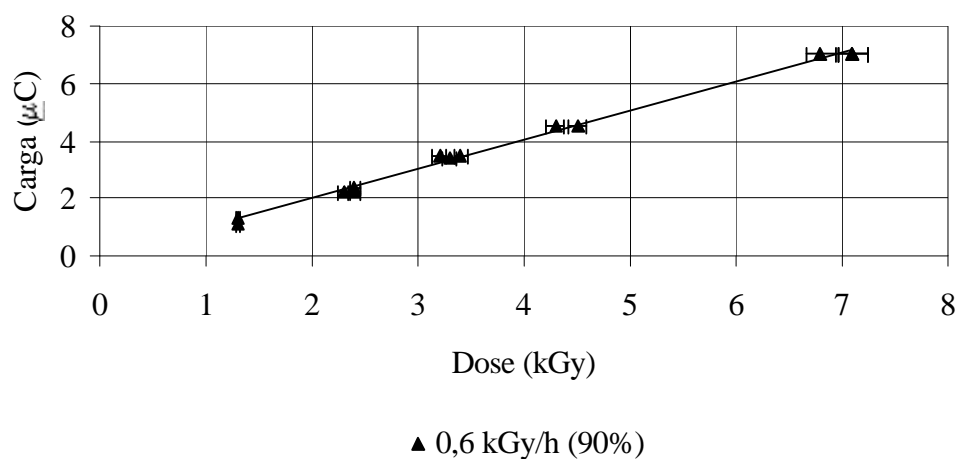


Figura 5.5: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.4 (câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 0,6 kGy/h, utilizando absorvedor de chumbo para 90%).

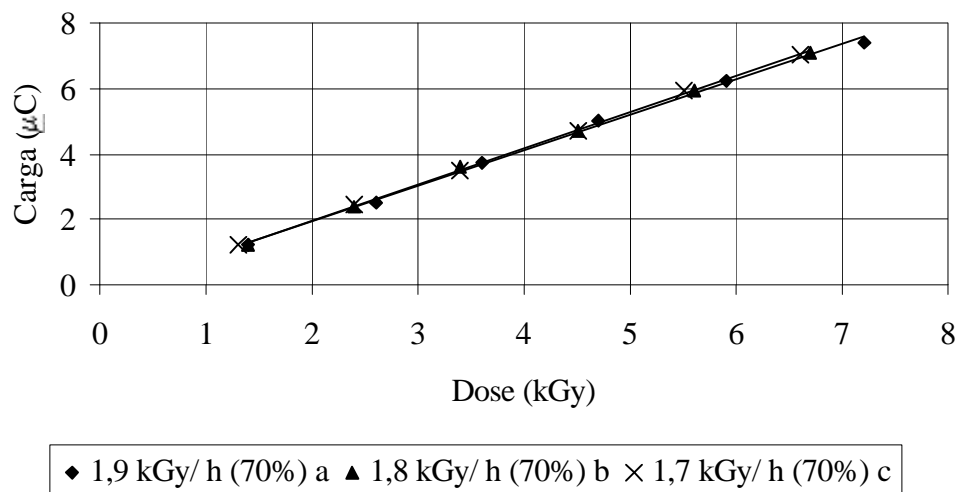


Figura 5.6: Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 1,8 kGy/h, obtidas utilizando absorvedor de chumbo para 70%.

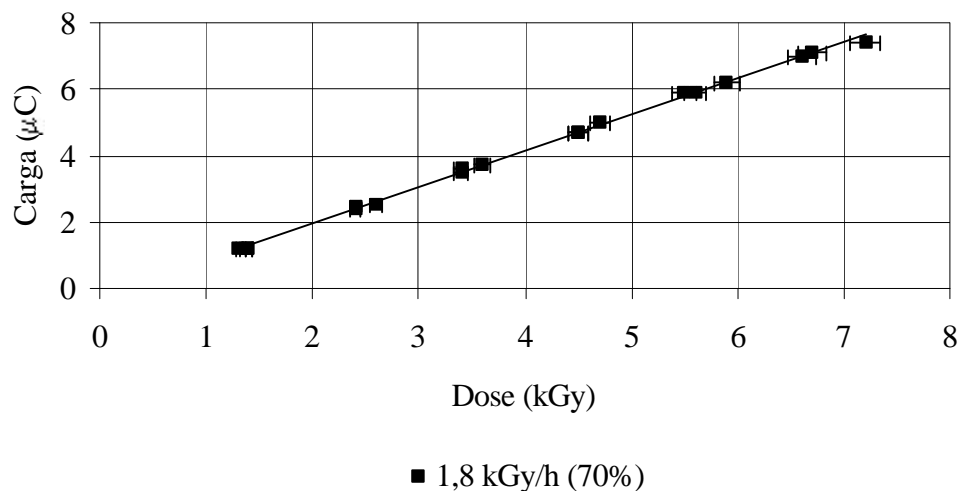


Figura 5.7: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.6 (câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 1,8 kGy/h, utilizando absorvedor de chumbo para 70%).

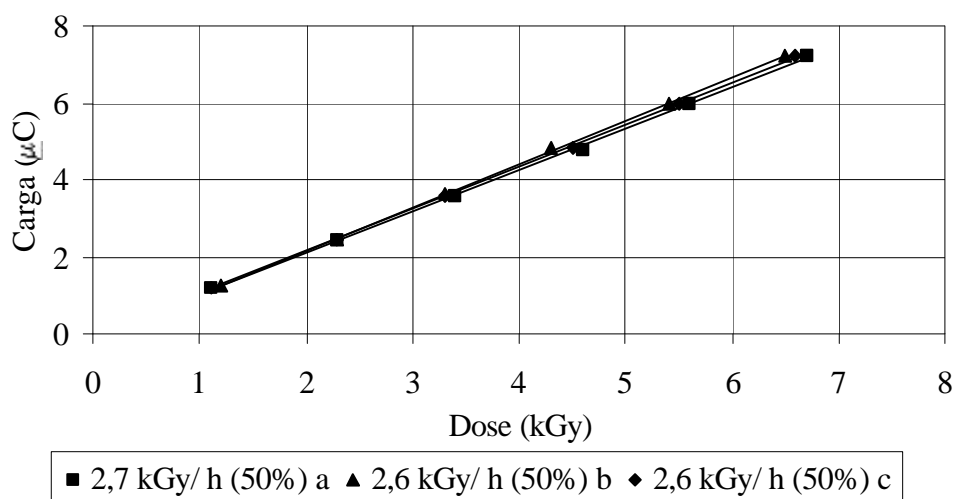


Figura 5.8: Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 2,6 kGy/h, obtidas utilizando absorvedor de chumbo para 50%.

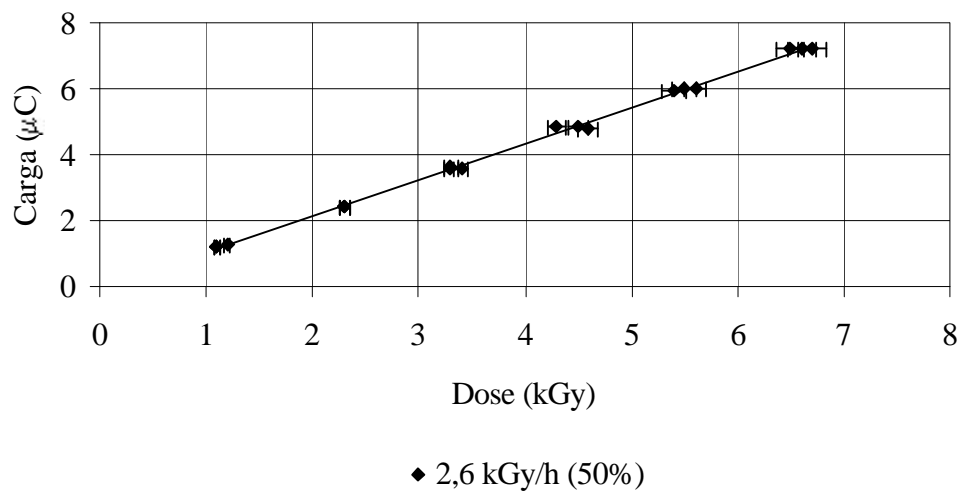


Figura 5.9: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.8 (câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 2,6 kGy/h, utilizando absorvedor de chumbo para 50%).

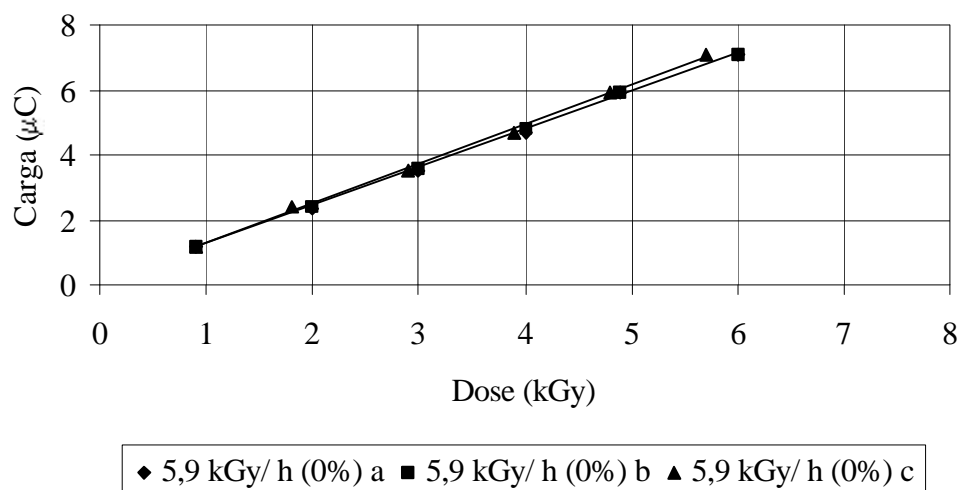


Figura 5.10: Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 5,9 kGy/h, obtidas sem a utilização dos absorvedores de chumbo.

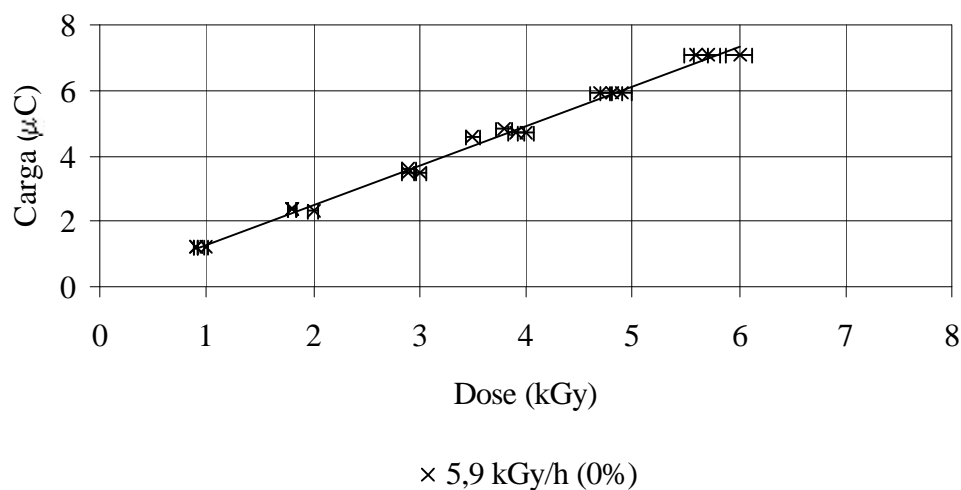


Figura 5.11: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.10 (câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 5,9 kGy/h, obtida sem a utilização dos absorvedores de chumbo).

Na Tabela 5.2 são apresentadas as equações polinomiais obtidas para cada curva resultante de carga por dose por meio do método dos mínimos quadrados, os parâmetros e a avaliação de cada ajuste. Por esta tabela pode-se verificar que as curvas entre si apresentaram doses com desvio padrão de $\pm 2\%$ para o absorvedor de 90%; $\pm 2,5\%$ para o absorvedor de 70%; $\pm 2\%$ para o absorvedor de 50% e $\pm 2,5\%$ quando não é usado absorvedor. O recomendado é estar dentro de um desvio padrão de $\pm 5\%$ (Fairand, 2002).

Tabela 5.2 Equações obtidas pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para cada uma das curvas resultantes de carga por dose, obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar).

Configuração	Equação f(y)	Parâmetros de Ajuste			Verificação do Ajuste	
		Nº de Pontos	Graus de Liberdade	Incerteza estimada	χ^2	χ^2 reduzido
Absorvedor de 90% (0,6 kGy/h)	$0,20 + 0,93y$	14	12	2 %	12,34	1,03
Absorvedor de 70% (1,8 kGy/h)	$0,28 + 0,90y$	18	16	2,5 %	14,60	0,91
Absorvedor de 50% (2,6 kGy/h)	$0,02 + 0,92y$	18	16	2 %	17,67	1,10
Sem absorvedor (5,9 kGy/h)	$-0,07 + 0,82y$	20	18	2,5 %	18,88	1,05

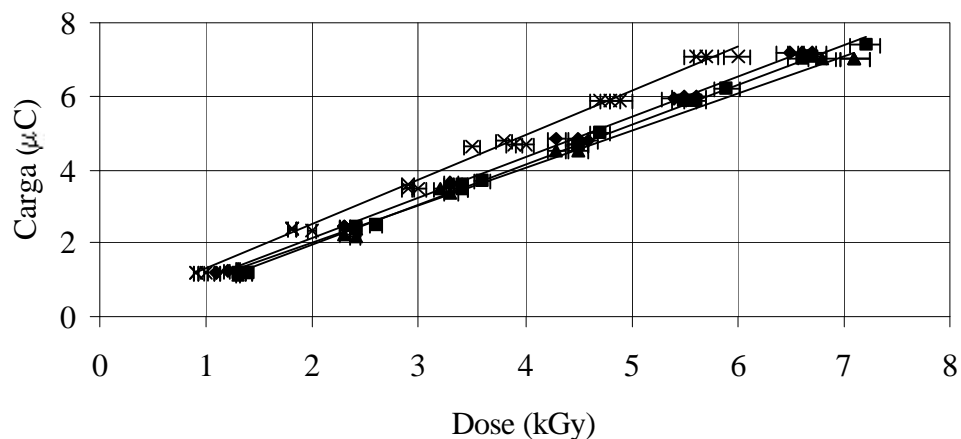
$f(y)$ = dose em kGy; y = carga acumulada em μC .

χ^2 = verifica se a distribuição dos pontos experimentais em relação à curva é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número de graus de liberdade.

χ^2_{reduzido} = verifica se a função ajustada é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número "1" (Helene e Vanin, 1981; Vuolo, 1992).

Para as curvas obtidas sem absorvedor é observada uma diferença significativa de, aproximadamente, 17 % em comparação com as curvas obtidas com absorvedores, em razão do grande número de fótons primários. Esta condição significa que não há material passando entre a amostra na posição de irradiação estática e a fonte, entretanto esta é uma situação extremamente rara de acontecer em irradiador comercial de grande porte.

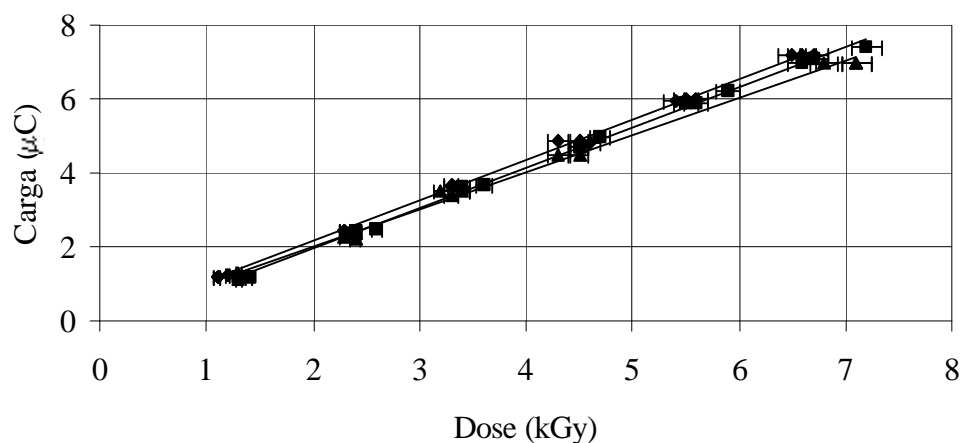
Na Figura 5.12 são mostradas todas as curvas resultantes reunidas em um único gráfico. Pode-se observar que há uma pequena diferença entre as curvas obtidas com os absorvedores de 90, 70 e 50 %, que pode ser atribuído à degradação do espectro do ^{60}Co pelos absorvedores de chumbo. Quanto mais espesso o absorvedor, maior a degradação do espectro (Attix, 1986; Holm e Berry, 1970; Knoll, 1989).



▲ 0,6 kGy/h (90%) ■ 1,8 kGy/h (70%) ◆ 2,6 kGy/h (50%) × 5,9 kGy/h (0%)

Figura 5.12: Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10⁵ Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I em diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50% e sem a utilização de absorvedores.

Considerando apenas as curvas obtidas utilizando-se os absorvedores obtém-se o gráfico mostrado na Figura 5.13.



▲ 0,6 kGy/h (90%) ■ 1,8 kGy/h (70%) ◆ 2,6 kGy/h (50%)

Figura 5.13: Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10⁵ Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I em diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%.

Colocando-se todos os pontos das curvas resultantes em uma única figura, com exceção da curva sem absorvedor, obtém-se uma curva de calibração média para todos os absorvedores e, conseqüentemente, para todas as taxas de dose, como é mostrada na Figura 5.14.

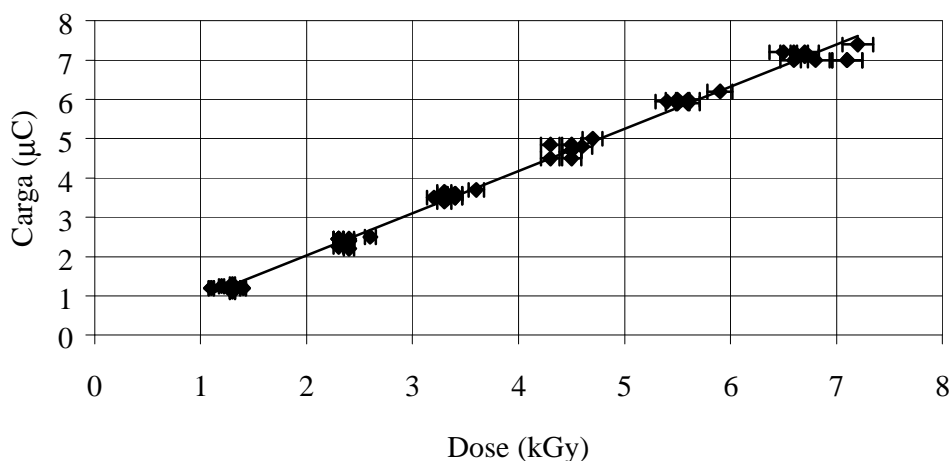


Figura 5.14: Curva de calibração de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I, para taxas de dose de 0,6; 1,8 e 2,6 kGy/h, obtida utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%, respectivamente.

Na Tabela 5.3 é apresentada a equação polinomial para a curva de calibração de carga por dose utilizando-se os absorvedores, mostrada na Figura 5.14, obtida por meio do método dos mínimos quadrados, os parâmetros e a avaliação do ajuste. O desvio padrão estimado para esta curva foi de $\pm 3\%$, o que está dentro do desvio padrão de $\pm 5\%$ recomendado, para um sistema dosimétrico de rotina (Fairand, 2002). Portanto o desvio apresentado pela degradação do espectro, na faixa dos absorvedores utilizados, é desprezível para a aplicação proposta.

Tabela 5.3 Equação obtida pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para a curva de calibração de carga por dose, obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), utilizando-se os absorvedores de chumbo entre 50 e 90%.

Configuração	Equação f(y)	Parâmetros de Ajuste			Verificação do Ajuste	
		N.º de Pontos	Graus de liberdade	Incerteza estimada	χ^2	χ^2_{reduzido}
Absorvedores de 90 a 50% (0,6 a 2,6 kGy/h)	$0,16 + 0,92y$	50	48	3 %	48,34	1,01

f(y) = dose em kGy; y = carga acumulada em μC .

χ^2 = verifica se a distribuição dos pontos experimentais em relação à curva é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número de graus de liberdade.

χ^2_{reduzido} = verifica se a função ajustada é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número "1" (Helene e Vanin, 1981; Vuolo, 1992).

5.3 Câmara preenchida com argônio e irradiada no irradiador gama de categoria I

A maior parte destas medidas foi realizada no primeiro semestre de 2004, quando o irradiador gama de categoria I, fornecia uma taxa de dose máxima de, aproximadamente, 4,8 kGy/h. Foram repetidos os mesmos procedimentos e análises feitas para a câmara preenchida com nitrogênio. Na Figura 5.15 são mostradas as correntes de saturação obtidas com a câmara de ionização preenchida com argônio em pressões de 1 a 2×10^5 Pa (1 a 2 bar), exposta no irradiador gama de categoria I sem a utilização de absorvedores. Por meio desta figura podemos observar que a corrente de saturação, para a maior pressão (2×10^5 Pa ou 2 bar) é cerca de 3,20 nA e para a menor pressão (10^5 Pa ou 1 bar ou atmosférica) é cerca de 1,56 nA, ambas obtidas com a tensão de cerca de 400 V. Todas as correntes apresentam a mesma grandeza, da ordem de nA. Para avaliar a reprodutibilidade das medidas, foram realizados, pelo menos, três experimentos nas mesmas condições, para cada pressão. As três curvas obtidas, para cada pressão, apresentaram diferenças entre si menores do que 1 %.

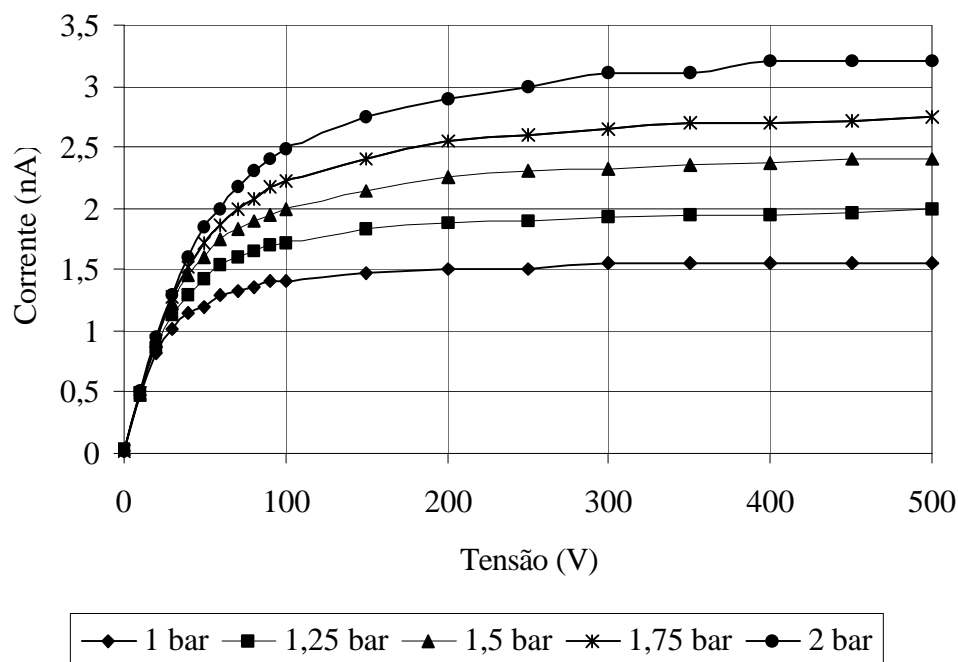


Figura 5.15: Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com argônio a várias pressões, irradiada no irradiador gama de categoria I sem absorvedores (1 bar = 10^5 Pa).

As correntes de saturação da câmara preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar) e exposta no irradiador gama de categoria I com os absorvedores de 90, 70, 50% e sem absorvedor são mostradas na Figura 5.16 e na Tabela 5.4. Assim como no caso da câmara preenchida com nitrogênio, todas as correntes foram facilmente medidas pelo equipamento utilizado, o que demonstra a viabilidade de se trabalhar com a pressão de 10^5 Pa (1 bar). Para avaliar a reprodutibilidade das medidas, foram realizados, pelo menos, três experimentos nas mesmas condições, para cada taxa de dose. As três curvas obtidas, para cada taxa de dose, apresentaram diferenças entre si menores do que 1 %.

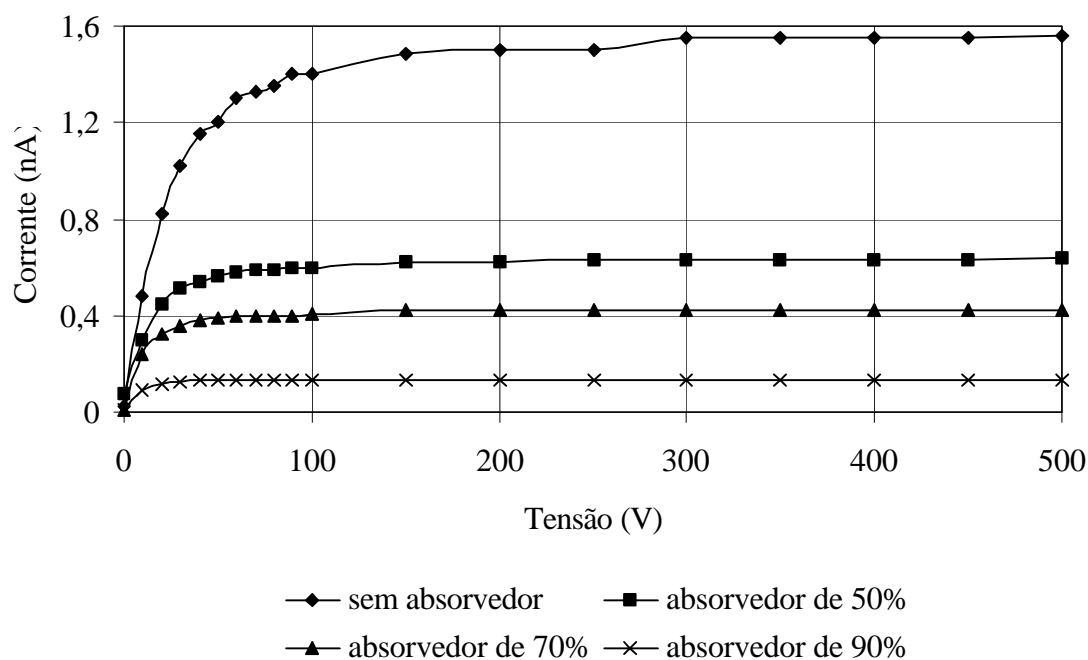


Figura 5.16: Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I sem e com absorvedores.

Tabela 5.4: Resultados da corrente de saturação da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), a tensão mínima necessária para estabelecê-la e a taxa de dose obtida, para os diferentes absorvedores e sem absorvedor de chumbo no irradiador gama de categoria I.

Absorvedor de chumbo	Corrente de saturação	Tensão mínima	Taxa de dose
90 %	0,135 nA	60 V	0,5 kGy/h
70 %	0,420 nA	150 V	1,6 kGy/h
50 %	0,630 nA	250 V	2,3 kGy/h
Sem absorvedor	1,550 nA	300 V	4,8 kGy/h

Pela Figura 5.15 e pela Tabela 5.4 pode-se constatar, assim como ocorreu com a câmara preenchida com nitrogênio, que quanto maior a taxa de dose, maior a corrente de saturação e maior a tensão mínima requerida. Por causa destes resultados foi utilizada a tensão de 400 V durante todas as medidas de carga por dose, para garantir que a câmara de

ionização trabalhasse na faixa da corrente de saturação, em qualquer uma das taxas de dose fornecidas pelo irradiador gama de categoria I.

Nas Figuras 5.17, 5.19, 5.21 e 5.23 são mostradas as curvas obtidas de carga por dose em tempos diferentes, utilizando-se cada um dos absorvedores e sem a utilização destes. As respectivas curvas resultantes são mostradas nas Figuras 5.18, 5.20, 5.22 e 5.24, que reúnem em cada figura todos os pontos para cada caso. A exemplo do que ocorreu com a câmara preenchida com nitrogênio, todas as curvas exibiram linearidade crescente entre as cargas coletadas e as doses medidas. Por causa de uma disponibilidade parcial de fornecimento de dosímetros o número de pontos, para a obtenção das curvas de carga por dose, foram diminuídos de 6 para 3, nesta etapa do trabalho.

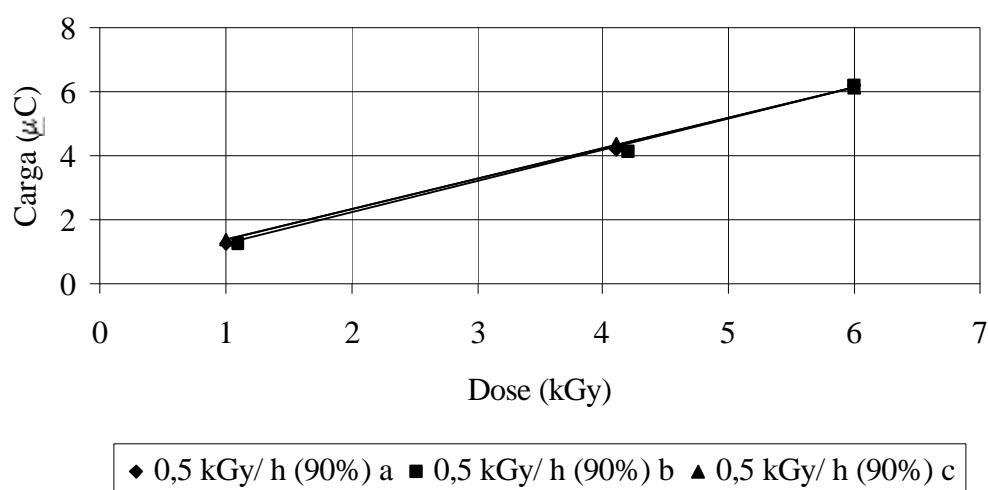


Figura 5.17: Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 0,5 kGy/h, obtidas utilizando absorvedor de chumbo para 90%.

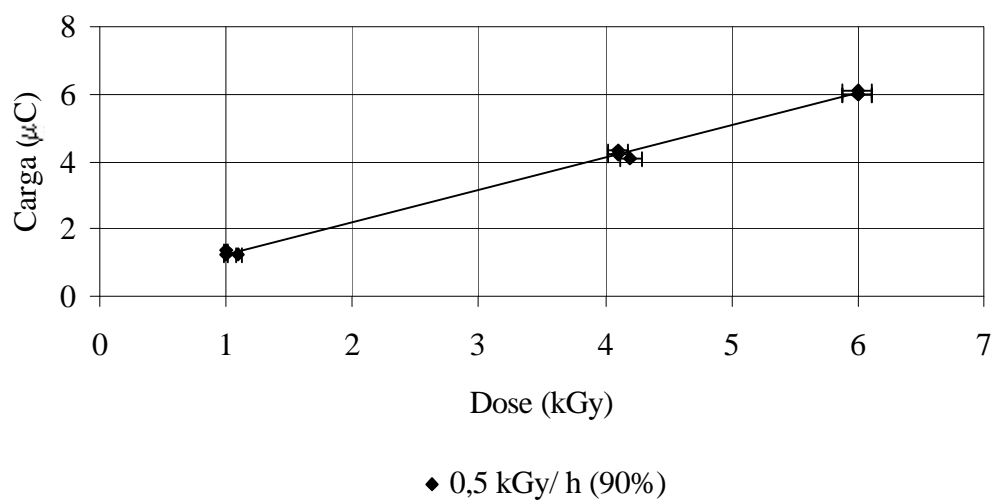


Figura 5.18: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.17 (câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 0,5 kGy/h, utilizando absorvedor de chumbo para 90%).

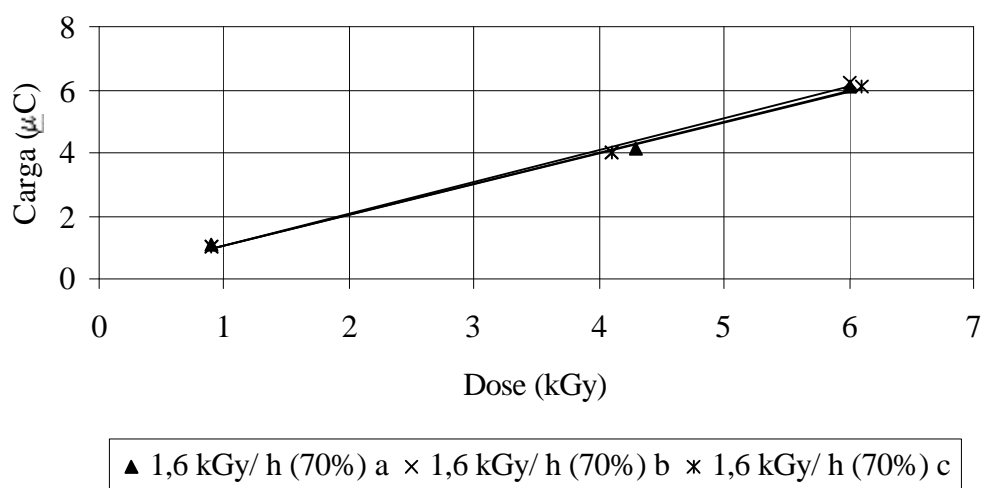


Figura 5.19: Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 1,6 kGy/h, obtidas utilizando absorvedor de chumbo para 70%.

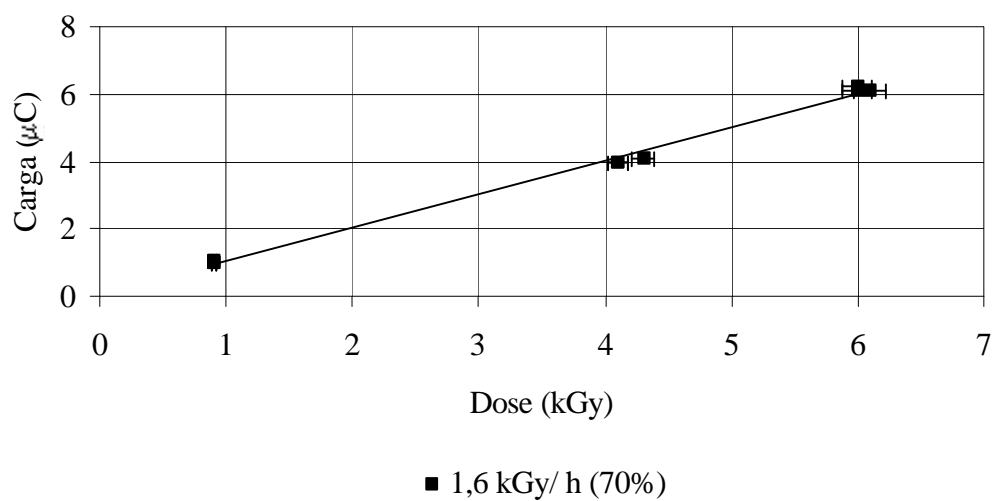


Figura 5.20: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.19 (câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 1,6 kGy/h, utilizando absorvedor de chumbo para 70%).

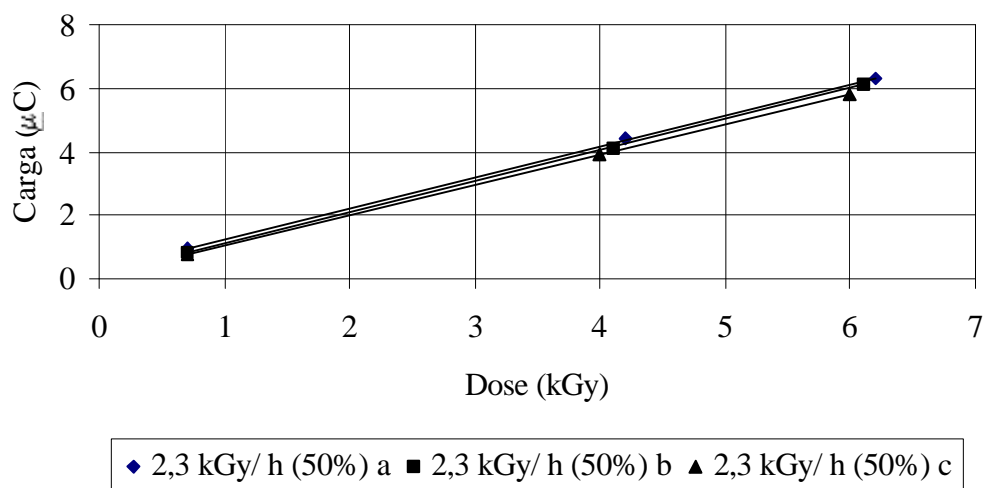


Figura 5.21: Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 2,3 kGy/h, obtidas utilizando absorvedor de chumbo para 50%.

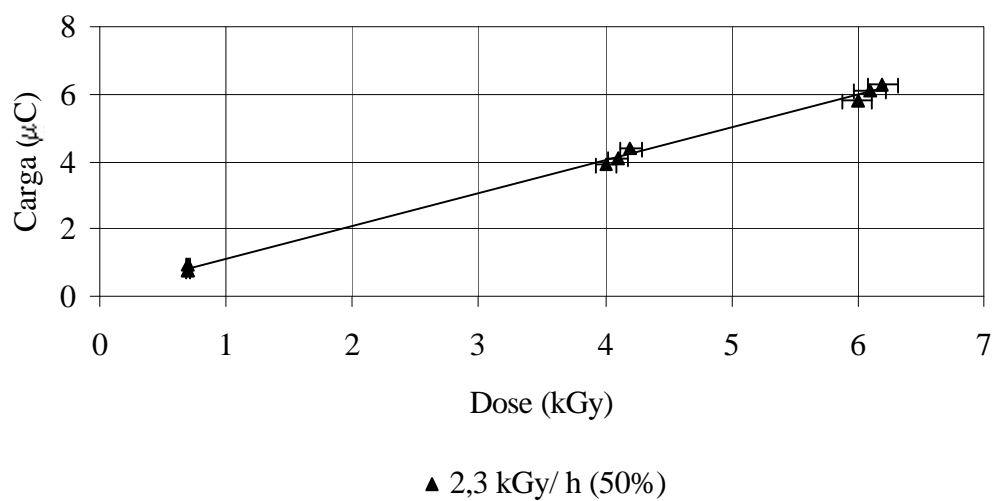


Figura 5.22: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.21 (câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 2,3 kGy/h, utilizando absorvedor de chumbo para 50%).

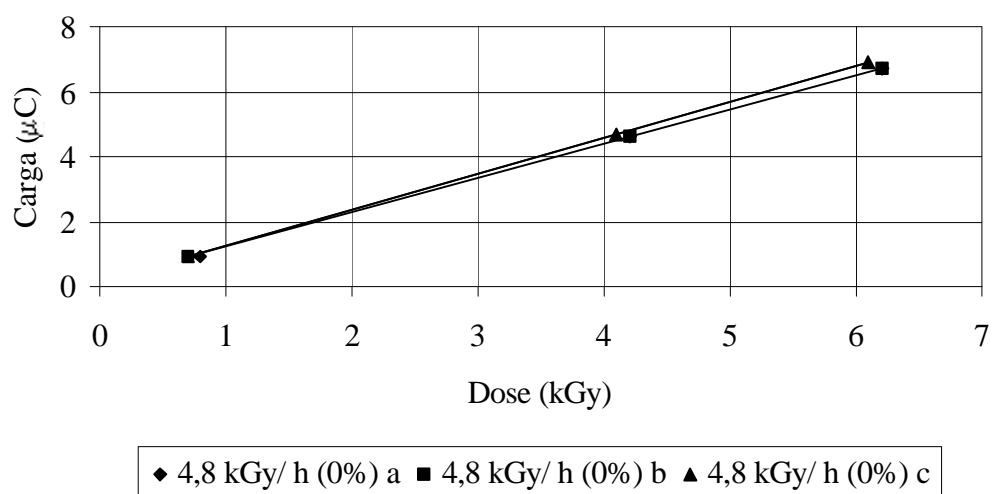


Figura 5.23: Três curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 4,8 kGy/h, obtidas sem a utilização dos absorvedores de chumbo.

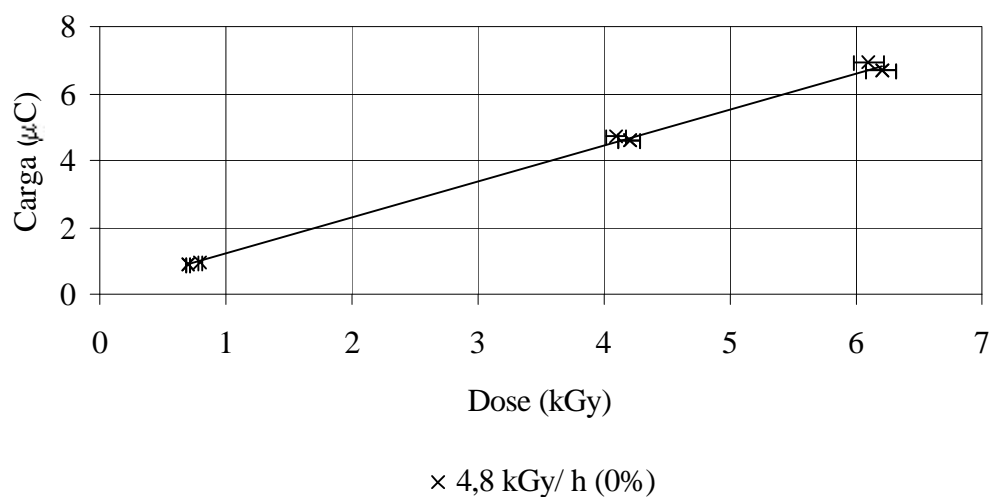


Figura 5.24: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.23 (câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I com a taxa de dose de 4,8 kGy/h, obtida sem a utilização dos absorvedores de chumbo).

Na Tabela 5.5 são apresentadas às equações polinomiais obtidas para cada curva resultante de carga por dose por meio do método dos mínimos quadrados, os parâmetros e a avaliação de cada ajuste. Por esta tabela pode-se verificar que as curvas entre si apresentaram doses com desvio padrão de $\pm 3,5$ % para o absorvedor de 90 %; ± 3 % para o absorvedor de 70 %; $\pm 3,5$ % para o absorvedor de 50 % e ± 3 % quando não é usado absorvedor. O recomendado é estar dentro de um desvio padrão de ± 5 % (Fairand, 2002).

Tabela 5.5 Equações obtidas pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para cada uma das curvas resultantes de carga por dose, obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar).

Configuração	Equação F(y)	Parâmetros de Ajuste			Verificação do Ajuste	
		Nº de Pontos	Graus de liberdade	Incerteza estimada	χ^2	χ^2_{reduzido}
Absorvedor de 90% (0,5 kGy/h)	- 0,32 + 1,05y	9	7	3,5 %	6,40	0,92
Absorvedor de 70% (1,6 kGy/h)	- 0,15 + 1,04y	9	7	3 %	7,18	1,03
Absorvedor de 50% (2,3 kGy/h)	- 0,15 + 1,02y	9	7	3,5 %	7,26	1,04
Sem absorvedor (4,8 kGy/h)	-0,11 + 0,93y	9	7	3 %	7,20	1,03

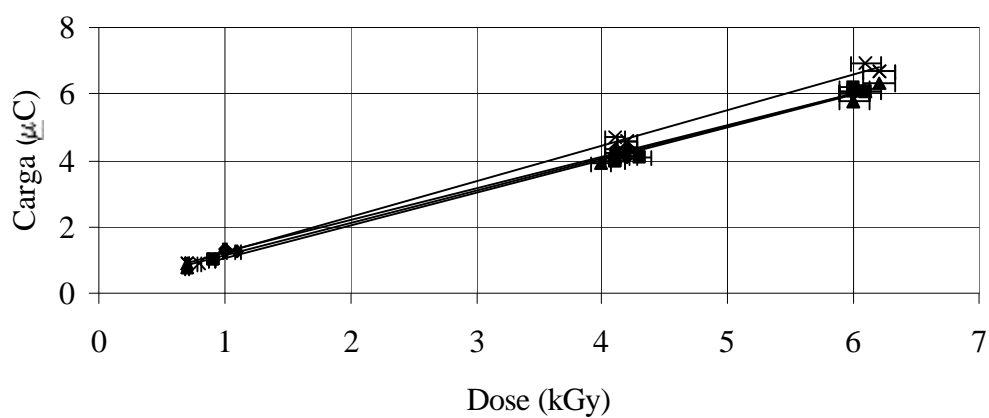
f(y) = dose em kGy; y = carga acumulada em μC .

χ^2 = verifica se a distribuição dos pontos experimentais em relação à curva é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número de graus de liberdade.

χ^2_{reduzido} = verifica se a função ajustada é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número "1" (Helene e Vanin, 1981; Vuolo,1992).

Para as curvas obtidas sem absorvedor é observada uma diferença significativa de, aproximadamente, 10 % em comparação com as curvas obtidas com absorvedores, em razão do grande número de fótons primários.

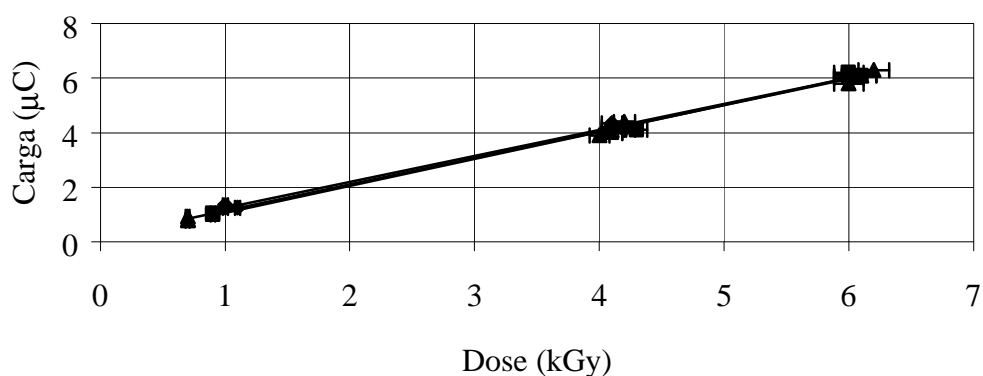
Na Figura 5.25 são mostradas todas as curvas resultantes reunidas em um único gráfico. Pode-se observar, como ocorreu para os experimentos realizados com nitrogênio, que há uma pequena diferença entre as curvas obtidas com os absorvedores de 90, 70 e 50%, por causa da degradação do espectro do ^{60}Co pelos absorvedores de chumbo.



◆ 0,5 kGy/ h (90%) ■ 1,6 kGy/ h (70%) ▲ 2,3 kGy/ h (50%) × 4,8 kGy/ h (0%)

Figura 5.25: Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I em diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50% e sem a utilização de absorvedores.

Considerando apenas as curvas obtidas utilizando-se os absorvedores, obtém-se o gráfico mostrado na Figura 5.26.



◆ 0,5 kGy/ h (90%) ■ 1,6 kGy/ h (70%) ▲ 2,3 kGy/ h (50%)

Figura 5.26: Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador gama de categoria I em diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%.

Colocando-se todos os pontos das curvas resultantes em uma única figura, com exceção da curva sem absorvedor, obtém-se uma curva de calibração média para todos os absorvedores e, conseqüentemente, para todas as taxas de dose, como é mostrada na Figura 5.27.

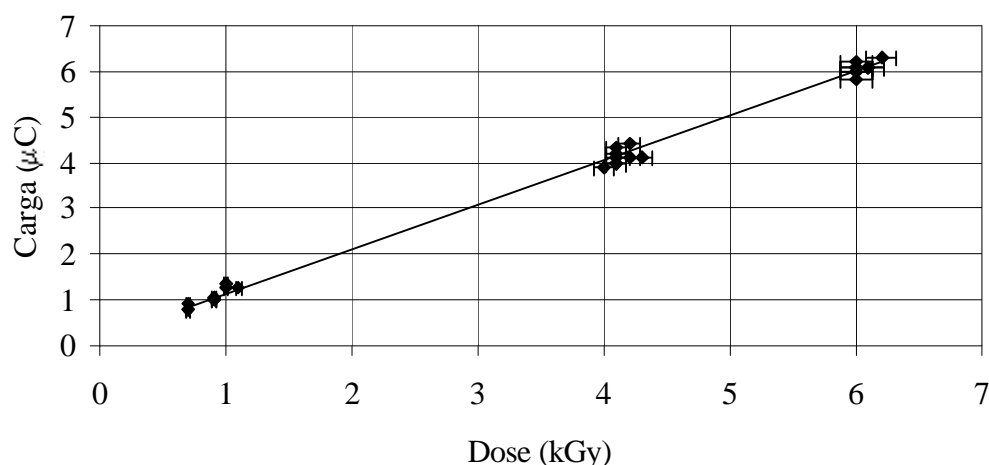


Figura 5.27: Curva de calibração de carga por dose da câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I, para taxas de dose de 0,5; 1,6 e 2,3 kGy/h, obtida utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%, respectivamente.

Na Tabela 5.6 é apresentada a equação polinomial para a curva de calibração de carga por dose utilizando-se os absorvedores, mostrada na Figura 5.14, obtida por meio do método dos mínimos quadrados, os parâmetros e a avaliação do ajuste. O desvio padrão estimado para esta curva foi de $\pm 4\%$, o que está dentro do desvio padrão de $\pm 5\%$ recomendado, para um sistema dosimétrico de rotina (Fairand, 2002). Portanto o desvio apresentado pela degradação do espectro, na faixa dos absorvedores utilizados, é desprezível para a aplicação proposta.

Tabela 5.6 Equação obtida pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para a curva de calibração de carga por dose, obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), utilizando-se os absorvedores de chumbo entre 50 e 90%.

Configuração	Equação F(y)	Parâmetros de Ajuste			Verificação do Ajuste	
		N.º de Pontos	Graus de liberdade	Incerteza estimada	χ^2	χ^2 reduzido
Absorvedores de 90 a 50% (0,5 a 2,3 kGy/h)	- 0,17 + 1,02y	27	25	4 %	26,55	1,06

$f(y)$ = dose em kGy; y = carga acumulada em μC .

χ^2 = verifica se a distribuição dos pontos experimentais em relação à curva é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número de graus de liberdade.

χ^2_{reduzido} = verifica se a função ajustada é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número "1" (Helene e Vanin, 1981; Vuolo, 1992).

5.4 Comparação entre as curvas de calibração obtidas no irradiador gama de categoria I, com a câmara preenchida com nitrogênio e argônio, separadamente

Na Figura 5.28 são mostradas as curvas de calibração resultantes quando se utiliza os absorvedores de chumbo para a câmara de ionização preenchida com nitrogênio ou argônio. Como se pode observar o comportamento das curvas foi similar. Tomando-se a carga de $6 \mu\text{C}$ obtém-se para o nitrogênio e o argônio uma dose de, respectivamente, 5,7 e 6,0 kGy, ou seja, uma diferença de 0,3 kGy e para a carga de $1,3 \mu\text{C}$ obtém-se, respectivamente: 1,3 e 1,2 kGy, uma diferença de 0,1 kGy.

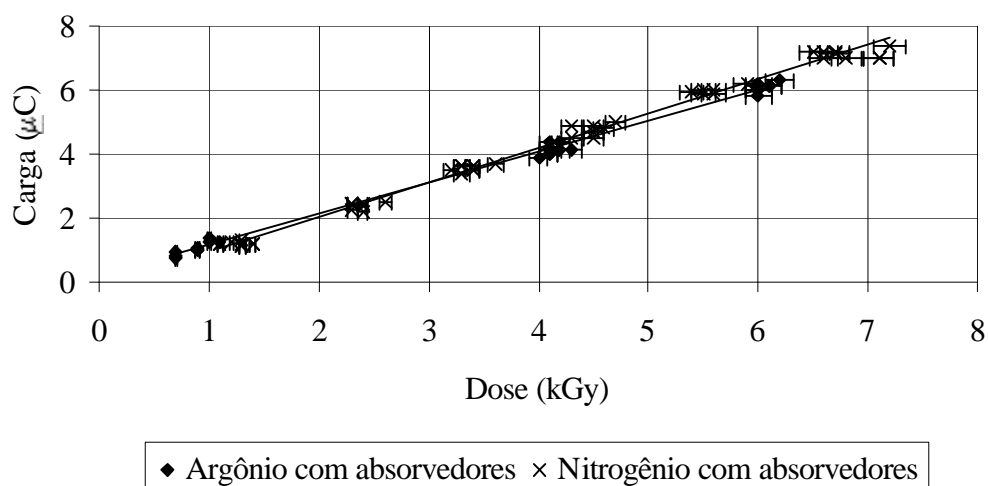


Figura 5.28: Superposição das curvas de calibração obtidas com a câmara de ionização preenchida em um caso com argônio e em outro caso com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I, para diferentes taxas de dose, obtidas utilizando absorvedores de chumbo para 90, 70 e 50%.

Na Figura 5.29 é mostrada a superposição das curvas de calibração sem absorvedores, tomando-se como referência a carga de $6 \mu\text{C}$ a dose fornecida pela curva do nitrogênio e do argônio são, respectivamente de 4,9 e 5,4 kGy, ou seja uma diferença de 0,5 kGy.

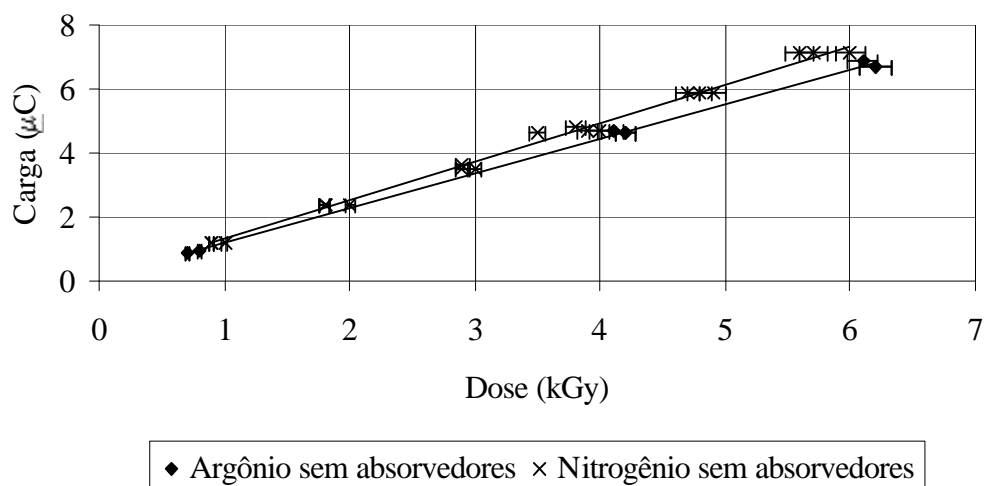


Figura 5.29: Superposição das curvas de calibração obtidas com a câmara de ionização preenchida em um caso com argônio e em outro caso com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I, sem a utilização de absorvedores, para as taxas de dose de, respectivamente: 4,8 e 5,9 kGy/h.

Os dois gases apresentaram resultados adequados para serem utilizados no preenchimento da câmara de ionização, para medidas de altas taxas de dose. Dessa forma o gás nitrogênio foi selecionado para estudos no irradiador de grande porte, por apresentar menor preço, sem comprometer a qualidade dos resultados.

5.5 Independência direcional da câmara de ionização

Durante a análise de projeto da câmara de ionização optou-se pela do tipo de eletrodo central, em razão desta não apresentar dependência direcional (Attix, 1986; Attix e Roesch, 1968; Holm e Berry, 1970; Knoll, 1989; McLaughlin et al., 1989; Price, 1958). Para confirmar esta característica a câmara foi testada no Laboratório de Calibração de Instrumentos IPEN/CNEN-SP, mas em virtude da taxa de dose da fonte de ^{60}Co deste laboratório ser da ordem de Gy/h, e o detector ter sido projetado para responder em taxas de dose da ordem de kGy/h, o sinal obtido foi da mesma ordem do ruído de fundo da câmara de ionização, o que impossibilitou a obtenção de resultados conclusivos.

Um teste similar foi realizado na posição de irradiação estática, no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, considerando que na região ocupada pela câmara neste local e sem obstáculos entre a fonte e esta posição o campo de radiação seja homogêneo. O teste consistiu em medir a corrente de saturação da câmara na posição de irradiação estática em três orientações em relação à fonte, a saber: 0° ; 90° e 180° , como são mostradas na Figura 5.30, tomando-se o cuidado de sempre manter a câmara de ionização ocupando o mesmo espaço nas três orientações.

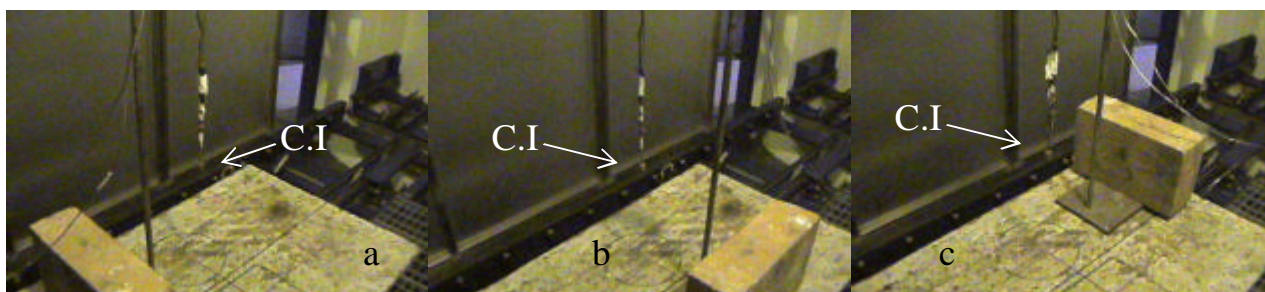


Figura 5.30 Teste de avaliação da dependência direcional da câmara de ionização na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte:
a) 0° em relação à fonte ; b) 90° em relação à fonte ; c) 180° em relação à fonte ; C.I : câmara de ionização.

O teste foi repetido três vezes e em todas elas as correntes de saturação medidas foram de $(0,327 \pm 0,005)$ nA, como são apresentadas na Tabela 5.7. O que indica a independência direcional da câmara de ionização.

Tabela 5.7 Valores das correntes de saturação da câmara de ionização na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, medidas nas orientações 0° , 90° e 180° em relação à fonte.

Posição:	0°	90°	180°
Medida:			
1 ^a	0,327 nA	0,327 nA	0,326 nA
2 ^a	0,327 nA	0,328 nA	0,327 nA
3 ^a	0,327 nA	0,327 nA	0,327 nA

5.6 Câmara preenchida com nitrogênio e irradiada no irradiador de grande porte

As correntes de saturação da câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e exposta no irradiador em cada uma das quatro configurações (câmara exposta ao ar; dentro do tarugo de polietileno; exposta ao ar e com a parede de chumbo; dentro do tarugo de polietileno e com a parede de chumbo) são mostradas na Figura 5.31 e na Tabela 5.8. Para avaliar a reprodutibilidade das medidas, foram realizados, pelo menos, três experimentos nas mesmas condições, para cada taxa de dose. As três curvas obtidas, para cada taxa de dose, apresentaram diferenças entre si menores do que 1 %.

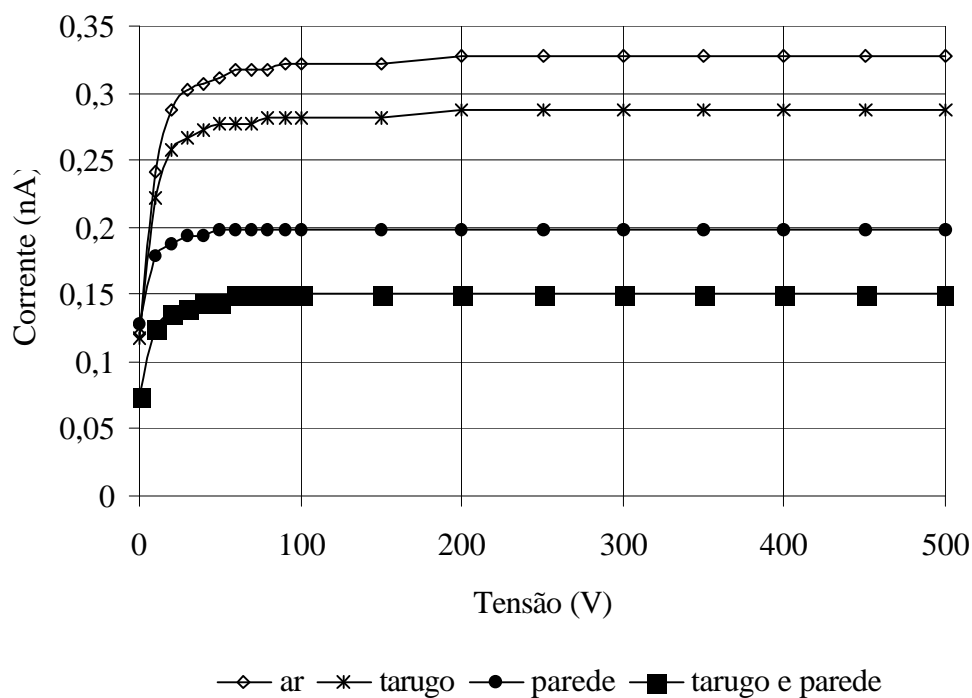


Figura 5.31: Curvas de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP.

Tabela 5.8: Corrente de saturação da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), a tensão mínima necessária para estabelecê-la e a taxa de dose obtida, para cada uma das quatro configurações expostas na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP.

Configuração	Corrente de saturação	Tensão mínima	Taxa de dose
Parede e tarugo	0,150 nA	50 V	0,3 kGy/h
Parede de chumbo	0,198 nA	60 V	0,3 kGy/h
Tarugo de polietileno	0,287 nA	200 V	0,6 kGy/h
Ar	0,327 nA	200 V	0,9 kGy/h

Pela Figura 5.31 e pela Tabela 5.8 pode-se constatar que quanto maior a taxa de dose maior a corrente de saturação e maior a tensão mínima requerida. Por causa destes resultados foi utilizada a tensão de 400 V durante todas as medidas de carga por dose, para garantir que a câmara de ionização trabalhasse na faixa da corrente de saturação, em qualquer uma das taxas de dose fornecidas pelo irradiador de grande porte.

Nas Figuras 5.32, 5.34, 5.36 e 5.38 são mostradas as curvas obtidas de carga por dose em tempos diferentes, utilizando-se cada uma das quatro configurações. As respectivas curvas resultantes são mostradas nas Figuras 5.33, 5.35, 5.37 e 5.39, que reúnem em cada figura todos os pontos para cada caso. Todas as curvas exibiram linearidade crescente entre as cargas coletadas e as doses medidas.

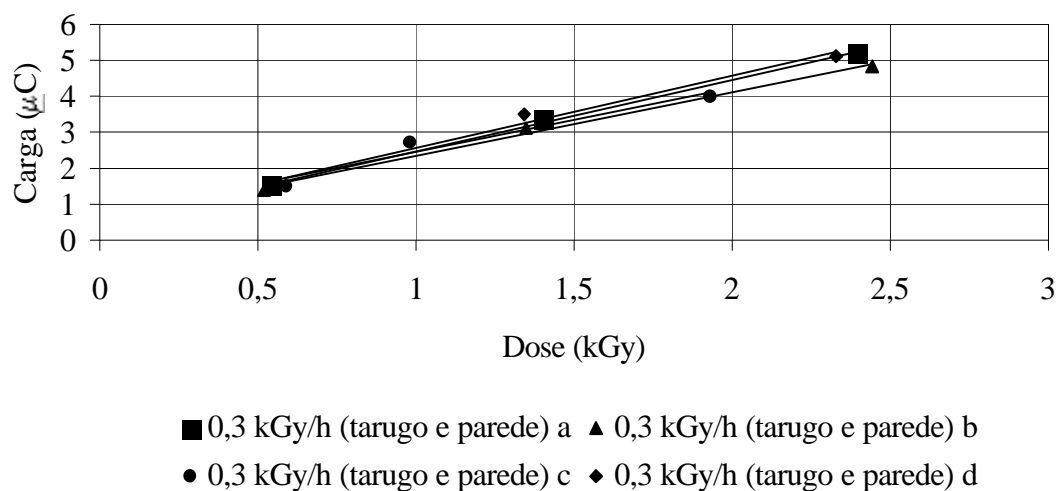


Figura 5.32: Quatro curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,3 kGy/h, obtidas utilizando a configuração: tarugo de polietileno e parede de chumbo.

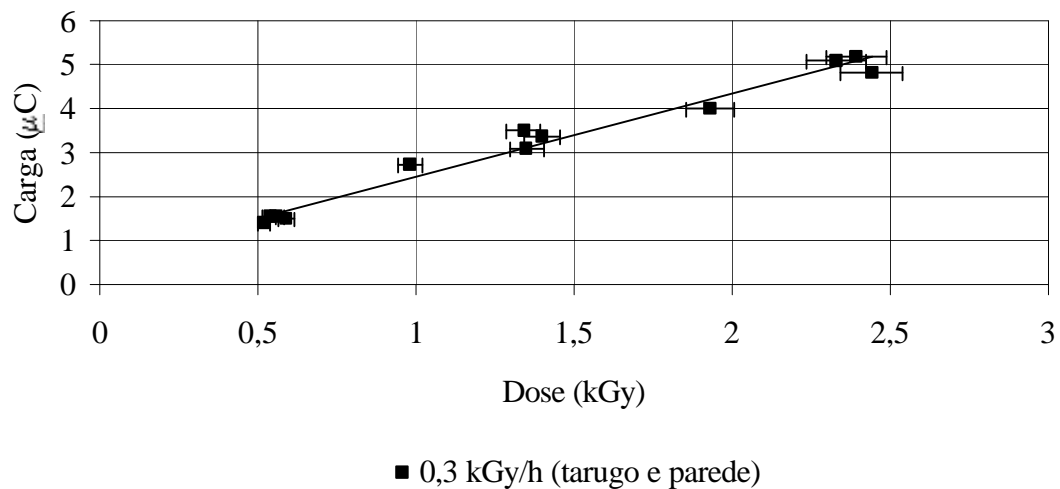


Figura 5.33: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.32 (câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,3 kGy/h, obtida utilizando a configuração: tarugo de polietileno e parede de chumbo).

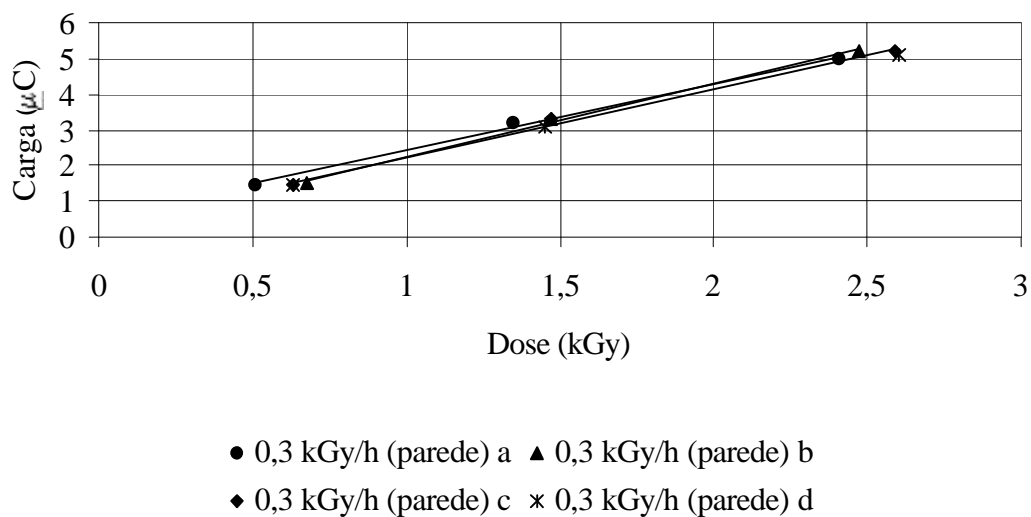


Figura 5.34: Quatro curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,3 kGy/h, obtidas utilizando a configuração: parede de chumbo.

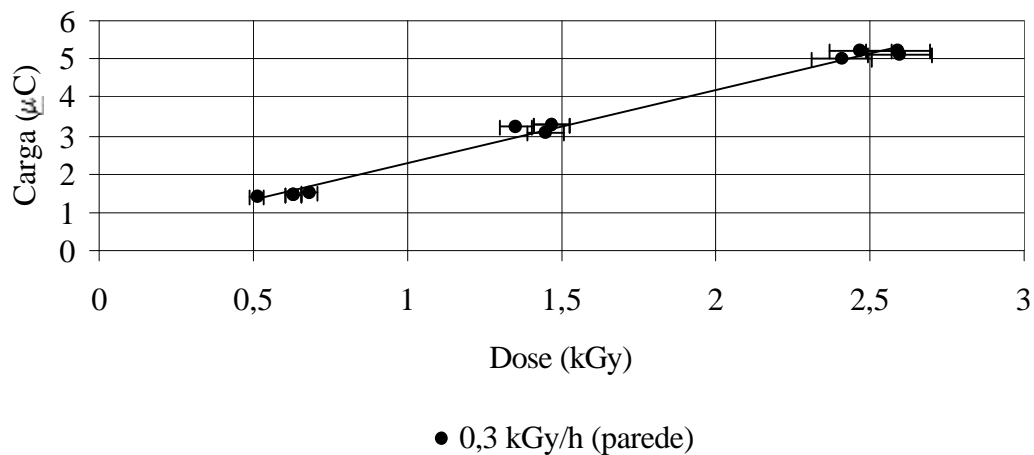


Figura 5.35: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.34 (câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,3 kGy/h, obtida utilizando a configuração: parede de chumbo).

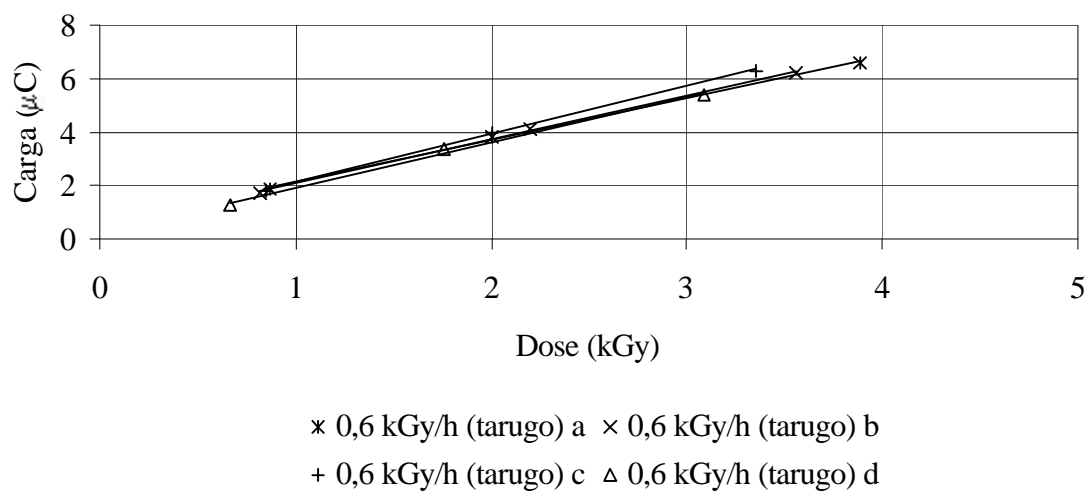


Figura 5.36: Quatro curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,6 kGy/h, obtidas utilizando a configuração: tarugo de polietileno.

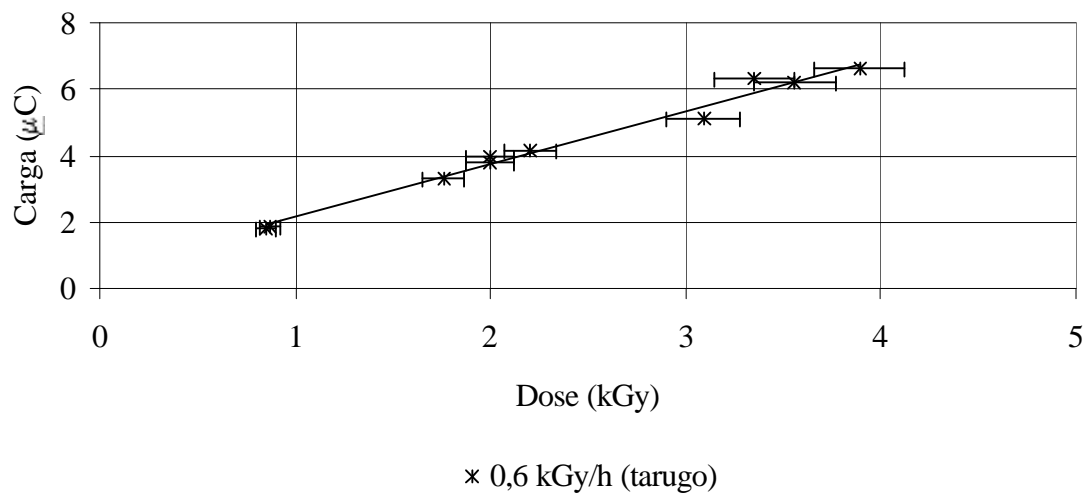


Figura 5.37: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.36 (câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,6 kGy/h, obtida utilizando a configuração: tarugo).

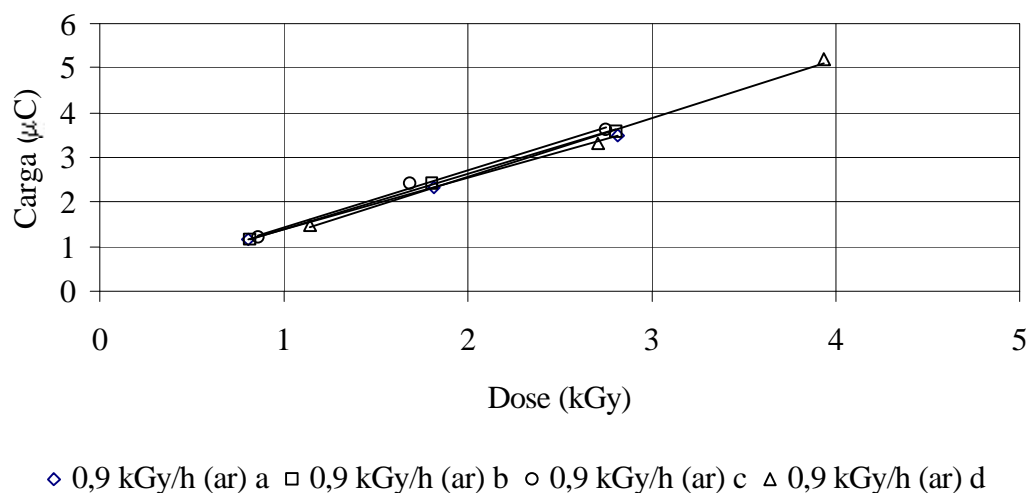


Figura 5.38: Quatro curvas de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,9 kGy/h, obtidas utilizando a configuração: exposta ao ar.

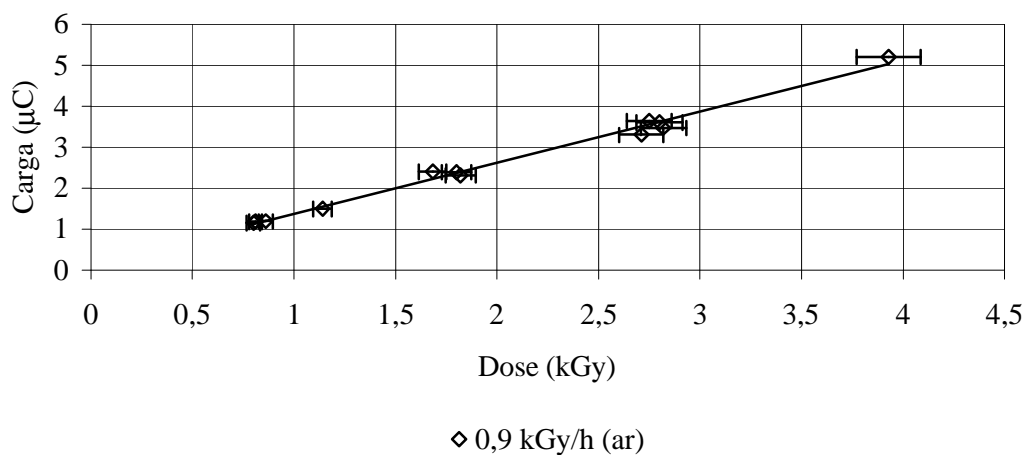


Figura 5.39: Curva resultante de carga por dose obtida utilizando-se todos os pontos da Figura 5.38 (câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), irradiada no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a taxa de dose de 0,9 kGy/h, obtida utilizando a configuração tarugo: ar).

Na Tabela 5.9 são apresentadas às equações polinomiais obtidas para cada curva resultante de carga por dose por meio do método dos mínimos quadrados, os parâmetros e a avaliação de cada ajuste. Por esta tabela pode-se verificar que as curvas entre si apresentaram doses com desvio padrão de $\pm 3,5$ % para a configuração tarugo e “parede de chumbo e tarugo”; $\pm 3,5$ % para a configuração “parede”; ± 3 % para a configuração “tarugo” e ± 3 % para a configuração “ar”. O recomendado é estar dentro de um desvio padrão de ± 5 % (Fairand, 2002).

Tabela 5.9 Equações obtidas pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para cada uma das curvas resultantes de carga por dose, obtidas no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar).

Configuração	Equação $f(y)$	Parâmetros de Ajuste			Verificação do Ajuste	
		Nº de Pontos	Graus de liberdade	Incerteza estimada	χ^2	χ^2_{reduzido}
Parede de chumbo e tarugo (0,3 kGy/h)	$-0,15 + 0,47y$	12	10	3,5 %	10,20	1,02
Parede de chumbo (0,3 kGy/h)	$-0,14 + 0,50y$	12	10	3,5 %	10,03	1,00
Tarugo (0,6 kGy/h)	$-0,13 + 0,57y$	12	10	3 %	9,74	0,97
Ar (0,9 kGy/h)	$-0,13 + 0,81y$	12	10	3 %	9,77	0,98

$f(y)$ = dose em kGy; y = carga acumulada em μC .

χ^2 = verifica se a distribuição dos pontos experimentais em relação à curva é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número de graus de liberdade.

χ^2_{reduzido} = verifica se a função ajustada é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número "1" (Helene e Vanin, 1981; Vuolo, 1992).

Para as curvas obtidas na configuração "ar" é observada uma diferença significativa de, aproximadamente + 44 % ($\approx 0,8$ kGy) em relação à configuração: "tarugo" e de, aproximadamente + 74 % (1,2 kGy) em relação às configurações: "tarugo e parede" e "parede". Esta condição significa que não há material passando entre a amostra na posição de irradiação estática e a fonte, entretanto está é uma situação extremamente rara de acontecer em irradiador comercial de grande porte.

Na Figura 5.40 são mostradas todas as curvas resultantes reunidas em um único gráfico. Pode-se observar que, praticamente, não há diferença entre as curvas para as configurações: "tarugo e parede" e "parede" e há diferenças entre as curvas obtidas para as demais configurações.

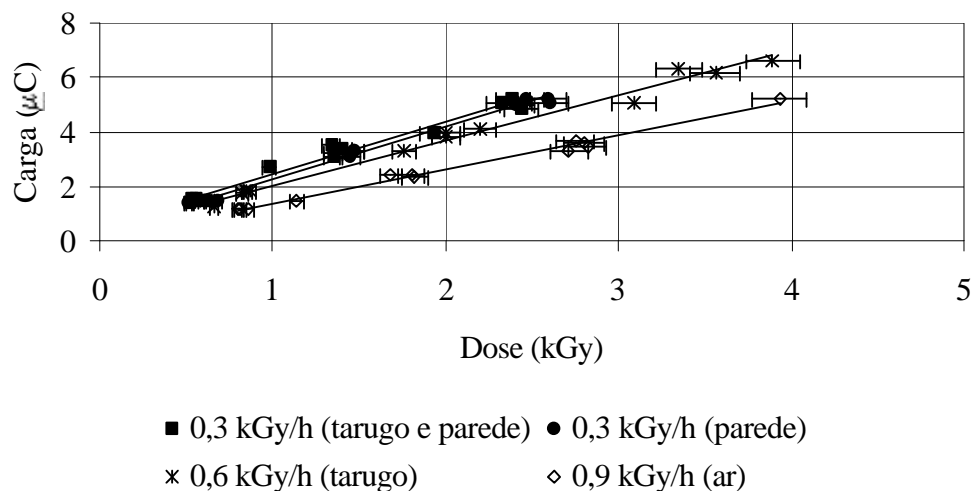


Figura 5.40: Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), para cada uma das quatro configurações expostas na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP.

Considerando apenas as curvas obtidas para as configurações: “tarugo”, “parede” e “tarugo e parede” obtém-se o gráfico mostrado na Figura 5.41.

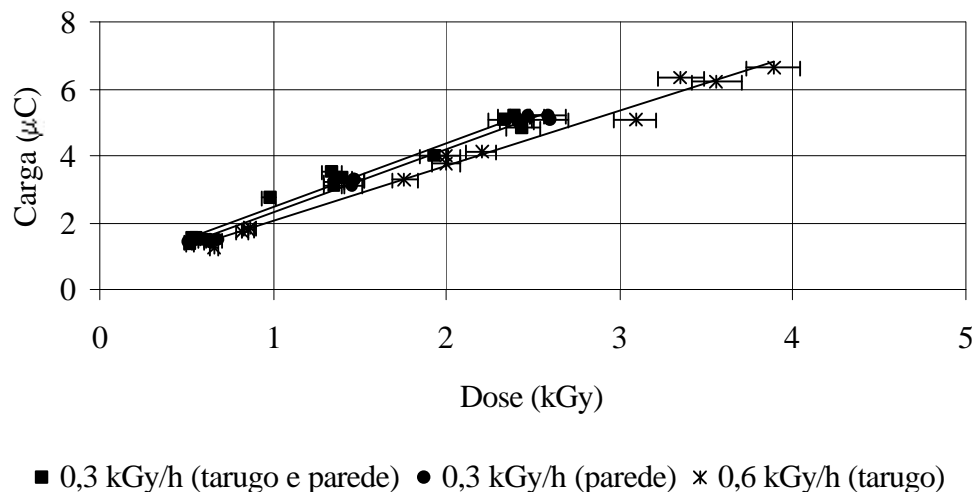


Figura 5.41: Curvas resultantes de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), para três configurações expostas na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP: “tarugo de polietileno e parede de chumbo”, “parede de chumbo” e “tarugo de polietileno”.

Colocando-se todos os pontos das curvas resultantes em uma única figura, com exceção da curva na configuração: “ar”, obtém-se uma curva de calibração média para todos as outras configurações e, conseqüentemente, para todas as taxas de dose, como é mostrado na Figura 5.42.

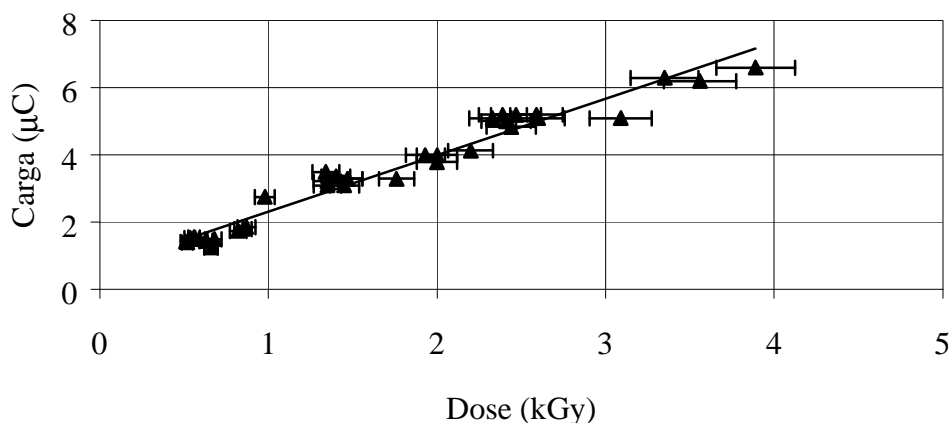


Figura 5.42: Curva de calibração de carga por dose da câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e para três configurações expostas na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP: “tarugo de polietileno e parede de chumbo”, “parede de chumbo” e “tarugo de polietileno”.

Na Tabela 5.10 é apresentada a equação polinomial para a curva de calibração de carga por dose utilizando-se as configurações: “tarugo”, “parede” e “tarugo e parede”, mostrada na Figura 5.42, obtida por meio do método dos mínimos quadrados, os parâmetros e a avaliação do ajuste. O desvio padrão estimado para esta curva foi de $\pm 4,5\%$, o que está dentro do recomendado para um sistema dosimétrico de rotina (Fairand, 2002).

Tabela 5.10 Equação obtida pelo método dos mínimos quadrados e os respectivos parâmetros de ajuste e da verificação do ajuste, para a curva de calibração de carga por dose, obtidas no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), utilizando-se as configurações: tarugo, parede de chumbo e tarugo e parede de chumbo.

Configuração	Equação $f(y)$	Parâmetros de Ajuste			Verificação do Ajuste	
		Nº de Pontos	Graus de liberdade	Incerteza estimada	χ^2	χ^2 reduzido
Tarugo, parede de chumbo, tarugo e parede de chumbo (0,3 a 0,6 kGy/h)	$- 0,17 + 0,51y$	36	34	4,5 %	34,72	1,02

$f(y)$ = dose em kGy; y = carga acumulada em μC .

χ^2 = verifica se a distribuição dos pontos experimentais em relação à curva é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número de graus de liberdade.

χ^2_{reduzido} = verifica se a função ajustada é verossímil; seu valor deve ser próximo ao número "1" (Helene e Vanin, 1981; Vuolo,1992).

5.7 Comparação dos dados da câmara preenchida com nitrogênio e irradiada no irradiador gama de categoria I e no irradiador de grande porte

Na Figura 5.43 é mostrada a superposição das curvas resultantes de carga por dose obtidas para a irradiação da câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) no irradiador gama de categoria I (linhas cheias) e no irradiador de grande porte (linhas tracejadas). Pode-se observar que no sentido crescente da dose:

- A primeira curva “A” é a obtida no irradiador de grande porte na configuração “tarugo e parede”, ou seja, a de máxima absorção para aquele irradiador.
- As curvas do meio “B e C” são as únicas coincidentes e são as obtidas nos dois tipos de irradiador sem a utilização de absorvedores.
- A ultima curva “D” é a obtida no irradiador gama de categoria I para o absorvedor de 90%, ou seja, a de máxima absorção para aquele irradiador.

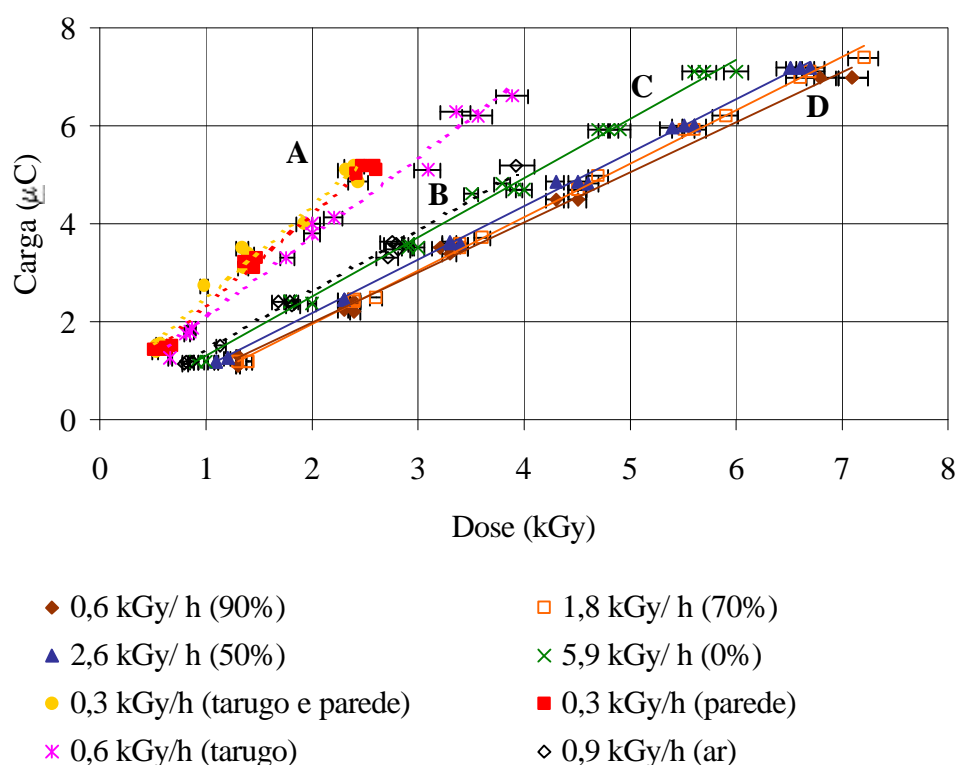


Figura 5.43 Superposição das curvas de calibração obtidas com a câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e irradiada no irradiador gama de categoria I (linhas cheias) e no irradiador de grande porte (linhas tracejadas).

Estas diferenças se devem a intensidade de fótons secundários que contribuem com a dose nos dosímetros de polimetacrilato de metila da Harwell, que é diferente nos dois tipos de irradiadores, em razão da diferença de tamanho da câmara de irradiação do irradiador gama de categoria I, da ordem de 10^{-3} m³ (alguns litros), e do irradiador de grande porte, da ordem de 10^3 m³. Na primeira, além dos fótons secundários gerados pela

degradação do espectro, há uma quantidade de fótons retroespalhados que contribui significativamente para a dose (curvas entre “C” e “D”) e na segunda a contribuição do retroespalhamento é desprezível (curvas entre “A” e “B”).

O projeto da câmara de ionização seguiu o padrão descrito na literatura consultada, ou seja, o de projetar a espessura das paredes para estabelecer o equilíbrio eletrônico, com relação à radiação emitida pela fonte a que ela seria exposta, no caso ^{60}Co . Portanto, para fótons com energia abaixo de 1,25 MeV (que é a energia média dos fótons emitidos por uma fonte de ^{60}Co), a parede da câmara atuará absorvendo parte desta energia e, conseqüentemente, a sensibilidade desta câmara é menor para fótons abaixo deste limiar, o que não ocorre com os dosímetros de polimetacrilato de metila (PMMA).

No irradiador gama de categoria I (linhas cheias, na Figura 5.43) além dos fótons primários e secundários, gerados quando há absorvedores, há um grande número de fótons retroespalhados, que são transformados em dose pelos dosímetros de PMMA, mas a câmara de ionização é menos sensível para fótons secundários e retroespalhados. Por isto ela terá que acumular mais carga para uma mesma dose medida pelos dosímetros de PMMA, quando se utiliza absorvedor de chumbo. Ou seja, para uma mesma carga, a dose correspondente aumenta da esquerda para a direita, ou seja, no sentido da curva que não utiliza absorvedor de chumbo para a curva que utiliza absorvedor de chumbo de 90% (linhas cheias de “C” para “D” na Figura 5.43).

No irradiador de grande porte (linhas tracejadas, na Figura 5.43) a contribuição dos fótons retroespalhados, em relação ao irradiador gama de categoria I, será muito menor, ou seja, a dose nos dosímetros de PMMA será devida apenas aos fótons primários e secundários, gerados quando há absorção. Mas a câmara de ionização continuará com a mesma sensibilidade, então, em relação ao irradiador gama de categoria I, a câmara de ionização terá que acumular mais carga para uma mesma dose medida, pelos dosímetros de PMMA, quando há degradação do espectro da fonte de ^{60}Co . Conseqüentemente, para uma mesma carga, a dose correspondente aumenta da esquerda para a direita, ou seja, no sentido da curva de maior para menor degradação do espectro (linhas tracejadas de “A” para “B” na Figura 5.43).

Em condições em que a quantidade de fótons primários é predominante a câmara apresenta a mesma resposta, ou seja, na condição sem absorvedor no irradiador gama de categoria I (curva “C”) e na configuração “ar” no irradiador de grande porte (curva “B”).

5.8 Estimativa de custo

Para esta análise foi levado em conta o aço inoxidável utilizado para a confecção da câmara, o preço do metro do cabo de isolamento mineral com isolante de alumina (Al_2O_3), o preço do vidro para a selagem dos mesmos e o custo aproximado da mão de obra.

O preço por metro do cabo de isolamento mineral com isolante de alumina é de, aproximadamente: R\$ 100,00/ metro (cabo nacional da Ecil Ind. com. Ltda). A câmara utiliza dois cabos: uma para a tensão e uma para a corrente. Os cabos devem ter um comprimento suficiente para chegar a um ponto em que a taxa de dose seja baixa o suficiente, para permitir a utilização de cabos coaxiais comuns de isolamento polimérica, que não apresentam resistência ao acúmulo de altas doses de radiação. Um comprimento estimado seria da ordem de 10 metros, portanto seriam necessários cerca de 20 metros de cabo de isolamento mineral, ou seja, aproximadamente: R\$ 2000 em cabos de isolamento mineral.

A carcaça da câmara de ionização seria obtido de um tarugo único de aço inoxidável AISI 304 de, pelo menos, 11 mm de diâmetro por 12 mm de altura, que seria torneado e cortado para se obter o corpo cilíndrico e a tampa inferior e superior. Este tarugo, por ter dimensões tão pequenas, pode ser obtido até como amostra grátis, mas, para esta análise, pode-se estimar o seu custo em R\$ 10.

O vidro com elevado grau de pureza e coeficiente de dilatação entre 7 e $9,5 \times 10^6/K$, da marca Schott Glaswerke, para selagem dos cabos de isolamento mineral custa, aproximadamente, R\$ 250 o frasco com 200 g, e algo em torno de 4 g foram usados para a selagem dos 2 cabos utilizados.

A mão de obra para preparar os cabos, torneare o tarugo de aço inoxidável e de soldagem e montagem da câmara de ionização ficaria em torno de R\$ 2000.

Portanto, o custo total seria de, aproximadamente: R\$ 5260. O detalhamento do custo é apresentado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 Detalhamento da estimativa do custo de confecção da câmara de ionização desenvolvida neste trabalho.

Item	Custo (R\$)
20 m de cabos de isolamento mineral de alumina (Al_2O_3)	2000
Tarugo de aço inoxidável AISI 304 (de pelo menos 11mm de diâmetro por 12 mm de altura)	10
Vidro com elevado grau de pureza e coeficiente de dilatação entre 7 e 9,5 $\times 10^6/\text{K}$ (frasco com 200g)	250
Mão de obra	2000
Total:	5260

Um detector análogo ao desenvolvido seria um detector SPGD, como já descrito na introdução, mas o sinal de saída é cerca de 100 vezes menor comparado ao da câmara de ionização. Um SPGD importado custaria cerca de U\$ 10.000, enquanto pelo levantamento realizado, o custo da confecção de um SPGD no CTR/IPEN seria ao redor de R\$ 20000.

6 DISCUSSÃO

A finalidade principal do detector proposto neste trabalho é a de monitorar a dose recebida por amostras, na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte, em tempo real. A proposição consistiu em desenvolver uma metodologia alternativa daquela empregada atualmente, em que o tempo de irradiação é estimado em função de uma taxa de dose média e a monitoração da dose é feita por dosímetros que são lidos posteriormente à irradiação. Deste modo a dose alvo pode ser ultrapassada, por causa da variação da taxa de dose provocada pelos materiais de diferentes densidades, que são irradiadas de forma dinâmica e atravessam entre a fonte de ^{60}Co e a posição de irradiação estática. Um detector adequado para a aplicação dessa metodologia alternativa, ou seja, monitorar a dose em tempo real, não está disponível comercialmente e na literatura não foram encontrados estudos de detectores que atendessem aos requisitos para essa finalidade. Portanto, foi necessário desenvolver um detector, que preenchesse os requisitos exigidos para esta aplicação específica.

Três tipos de detectores possuem características viáveis para esta aplicação, a saber, câmara de ionização, SPGD e semicondutores de silício. No entanto, os semicondutores de silício comercialmente disponíveis tem baixa resistência à radiação, tornando-o inadequado para ser utilizado como monitor para altas taxas de doses (Knoll, 1989; McLaughlin et al, 1989). O detector SPGD e a câmara de ionização atendem os requisitos para aplicação proposta. A câmara de ionização foi escolhida para este trabalho, por apresentar maior sensibilidade e custo de fabricação menor comparada ao SPGD. O custo para a fabricação da câmara de ionização foi estimado no valor de R\$ 5260, enquanto pelo levantamento realizado para a confecção do detector tipo SPGD o custo seria ao redor de R\$ 20000.

O tamanho final da câmara de ionização desenvolvida foi de $0,9 \text{ cm}^3$. Geralmente, as irradiações estáticas são realizadas em amostras de volume pequeno, requerendo detectores de dimensões reduzidas. Dessa forma, o primeiro requisito a ser avaliado foi o tamanho total deste detector, ou seja, o corpo da câmara de ionização e não somente o seu volume ativo, que deveria ser pequeno o suficiente para interferir o menos possível com o equilíbrio eletrônico do meio e possibilitasse, se fosse necessário, monitorar a dose dentro das amostras. As menores câmaras de ionização encontradas comercialmente são as utilizadas em aplicações médicas, estas câmaras possuem o volume ativo reduzido, no

entanto o tamanho total desses detectores apresenta dimensões maiores do que alguns cm^3 (Sephton et al 2002, Santos et al., 2005). Na avaliação realizada, conhecendo o volume das amostras normalmente irradiadas na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte comercial, concluiu-se que o detector deveria ter o tamanho final menor do que 1 cm^3 .

Outro parâmetro avaliado foi a escolha do material a ser utilizado para a confecção da câmara em virtude da taxa de dose na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte ser da ordem de kGy/h , a câmara deve ser resistente a estas taxas de dose e a doses acumuladas da ordem de MGy ou mais. Dessa forma, o detector pode ser utilizado permanentemente para a finalidade proposta, não necessitando ser substituído periodicamente, em razão dos danos provocados pelas altas doses de radiação. O material escolhido para a confecção do corpo da câmara foi o aço inoxidável, por ser um metal que conserva suas características com o tempo e apresenta uma densidade alta, mantendo o equilíbrio eletrônico com uma parede relativamente fina, e assim contribui para o desenvolvimento de uma câmara de ionização com cerca de 1 cm^3 . A espessura de parede de 1 mm do aço inoxidável é suficiente para garantir a condição de equilíbrio eletrônico do detector, para exposições com fontes de ^{60}Co , que é o material radioativo mais utilizado em irradiadores de grande porte (IAEA, 1992; Fairand, 2002; McLaughlin et al., 1989).

Além do material do corpo da câmara, especial atenção foi dada aos cabos de sinal e de tensão desta no tocante a sua degradação, quando estes são submetidos a altas taxas de dose e altas doses. Os cabos normalmente utilizados são coaxiais comuns de isolamento polimérica, que além de se degradarem com o nível da taxa de dose requerido apresentam um diâmetro da ordem de 5 mm , o que dificulta a sua conexão à câmara de ionização de tamanho pequeno como desta proposta, cujo diâmetro é de cerca de 10 mm . Para contornar essas limitações, a utilização destes cabos foi substituída por cabos de isolamento mineral, que tem como isolante elétrico a alumina (Al_2O_3), um material que não se degrada com a radiação, e apresenta um diâmetro de $1,5 \text{ mm}$. Outra vantagem do cabo de isolamento mineral é que ele pôde ser soldado diretamente ao corpo da câmara de ionização, dispensando a utilização de conectores entre os cabos e o detector, possibilitando a confecção deste com tamanho reduzido. Deve ser enfatizado, que a utilização de cabos de isolamento mineral para transmissão do sinal proveniente da câmara de ionização não é encontrada na literatura. Nas aplicações similares, os outros autores utilizaram cabos coaxiais de isolamento

polimérica, necessitando a substituição destes periodicamente, em virtude de sua baixa resistência a altas taxas de dose, conduzindo à degradação do cabo coaxial. Outro fator relevante observado é que não houve degradação da câmara de ionização e dos cabos de isolamento mineral ao longo deste trabalho, ou seja, não apresentaram danos ou a necessidade da substituição de componentes, por, aproximadamente, quatro anos. Neste período não foram verificados danos e não foi requerida a substituição de componentes por causa da exposição à radiação.

Para o preenchimento da câmara foram escolhidos gases com valores altos de W (energia média despendida dentro de um gás para formar um par de íons). Geralmente, os gases com baixos valores de W são utilizados, pois a maioria das aplicações dadas às câmaras de ionização é para taxas de dose baixas, requerendo alta sensibilidade para gerar correntes de saturação minimamente mensuráveis (Attix e Roesch, 1968; Holm e Berry, 1970; Knoll, 1989; McLaughlin et al., 1989; Price, 1958). Para a aplicação proposta neste trabalho as taxas de dose eram da ordem de kGy/h, em que puderam ser utilizados gases com alto W e ainda obter correntes de saturação da ordem de 10^{-9} A.

Os gases: nitrogênio e argônio, separadamente, foram testados como gases de preenchimento da câmara no irradiador gama de categoria I. Ambos se mostraram adequados para a finalidade proposta, independente da pressão utilizada para o preenchimento da câmara, na faixa de 1 a 2×10^5 Pa (1 a 2 bar). As correntes de saturação medidas não apresentaram diferenças significativas, optando-se, assim, utilizar uma pressão de 10^5 Pa (1 bar ou 1 atmosfera), por ser a pressão mais fácil de ser reproduzida.

As correntes de saturação obtida foram cerca de 100 vezes maior do que o ruído de fundo, para a câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) e testada no irradiador gama de categoria I, utilizando absorvedores e cerca de 1000 vezes maior para medidas sem a utilização de absorvedores. A corrente de saturação obtida foi de 0,165 nA quando se utilizou o absorvedor de chumbo para 90 % (condição de taxa de dose mínima de 0,6 kGy/h) com uma tensão mínima de 50 V, enquanto a não utilização do absorvedor de chumbo (condição de taxa de dose máxima: 5,9 kGy/h) a corrente de saturação foi de 1,900 nA, com uma tensão mínima de 350V, como mostra a Tabela 5.1. Portanto, para assegurar a saturação da corrente se escolheu a tensão de 400 V para ser aplicada à câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), durante os experimentos neste

irradiador, independente da taxa de dose. Resultados similares foram obtidos para a câmara preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), como mostra a Tabela 5.4 e, conseqüentemente, também se escolheu a tensão de 400 V para ser aplicada ao detector.

Como as curvas de carga por dose obtidas, no irradiador gama de categoria I, para os dois tipos de gases apresentaram resultados similares, o nitrogênio foi escolhido como gás de preenchimento para os testes no irradiador de grande porte, por apresentar menor preço, sem comprometer a qualidade dos resultados.

Para a câmara de ionização preenchida com nitrogênio e testada na posição de irradiação estática no irradiador de grande porte, as correntes de saturação medidas pela eletrônica associada no ponto de acompanhamento foi cerca de 100 vezes maior do que o ruído de fundo e variaram de 0,150 a 0,327 nA, respectivamente, quando se utilizou a configuração “tarugo de polietileno e parede de chumbo” (condição de taxa de dose mínima: 0,3 kGy/h) com uma tensão mínima de 50 V e a configuração “ar” (condição de taxa de dose máxima: 0,9 kGy/h) com uma tensão mínima de 200V, como mostra a Tabela 5.8. Portanto, a tensão selecionada foi também de 400 V para ser aplicada à câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), durante os experimentos neste irradiador, independente da taxa de dose. Similar ao obtido nos testes realizados no irradiador gama de categoria I, o sinal gerado na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte possui uma amplitude suficiente para ser medido e analisado com a eletrônica associada no ponto de acompanhamento (Figuras 4.10 e 4.13).

Geralmente, a distância entre a posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte e um ponto de acompanhamento qualquer do lado externo do irradiador é de cerca de duas dezenas de metros, portanto o sinal gerado pelo detector deve ter amplitude suficiente para ser transmitido via cabo por uma distância desta ordem. Nos testes realizados com a câmara de ionização, na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte, o sinal foi enviado por cerca de 20 m de cabo até a eletrônica associada, que foi capaz de medir correntes da ordem de 10^{-9} A (cerca de 100 vezes maior do que o ruído de fundo) e realizar todas as medidas de calibração do detector em termos de carga por dose nas diferentes configurações testadas.

A câmara de ionização com configuração de eletrodo central foi selecionada para este trabalho, por este não apresentar dependência direcional ao contrário da de placas paralelas. Os testes realizados, na posição de irradiação estática, no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, indicaram a independência direcional da câmara de ionização. No IPEN, existe o Laboratório de Calibração de Instrumentos, que rotineiramente oferece o serviço de calibração de detectores de radiação. No entanto, os testes de dependência direcional realizados naquele laboratório, para a câmara de ionização desenvolvida, o sinal obtido foi da mesma ordem do ruído de fundo do detector, impossibilitando resultados conclusivos. Este fato deve-se a taxa de dose da fonte de ^{60}Co daquele laboratório ser da ordem de Gy/h, e o detector ter sido projetado para responder em taxas de dose da ordem de kGy/h.

Um requisito básico de qualquer detector é ser passível de calibração. Ou seja, se o mesmo apresenta uma curva de resposta proporcional à dose e se a mesma é reproduzível dentro de um determinado desvio padrão. A câmara de ionização foi calibrada no irradiador gama de categoria I e no irradiador de grande porte do IPEN/CNEN-SP, em ambos foi possível obter curvas de calibração reproduzíveis nas várias configurações testadas.

A reprodutibilidade das curvas de calibração, para a aplicação proposta, deve estar dentro da faixa recomendada para um sistema dosimétrico de rotina, ou seja, dentro de um desvio padrão de $\pm 5\%$ (Fairand, 2002). No tratamento estatístico, pelo método dos mínimos quadrados, todas as curvas de calibração obtidas no irradiador gama de categoria I e no irradiador de grande porte apresentaram desvios padrões menores do que os $\pm 5\%$ recomendados.

O único objetivo parcialmente alcançado foi a independência com a taxa de dose, pois a construção da câmara seguiu o padrão descrito na literatura consultada, ou seja, o de projetar a espessura das paredes para estabelecer o equilíbrio eletrônico, com relação a radiação emitida pela fonte a que ela seria exposta, no caso ^{60}Co . No entanto, na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte a variação da taxa de dose se deve a degradação do espectro de radiação emitido pela fonte, devido à passagem da radiação através do material que está sendo irradiado dinamicamente. Portanto a espessura da parede da câmara de ionização, cuja função seria garantir o equilíbrio eletrônico, atuará

absorvendo parte da energia deste espectro degradado e, conseqüentemente, provocará uma dependência da resposta da câmara com a variação da taxa de dose, provocada por esta degradação.

Quando há variação da taxa de dose, sem ser causada pela degradação do espectro da fonte de ^{60}Co , a câmara não apresenta dependência com a taxa de dose, como pode ser visto pelas curvas coincidentes “B” e “C” da Figura 5.42, que foram obtidas com as taxas de dose respectivas de: 0,9 e 5,9 kGy/h. No entanto, quando a variação da taxa de dose é causada pela degradação do espectro da fonte de ^{60}Co é necessário levantar curvas de calibração, que dependerão do nível da degradação do espectro, da quantidade de fótons secundários e retroespalhados, gerados pela geometria do irradiador. Esta característica do detector deve ser observada para a sua correta utilização. Isto não é um demérito, pois todo sistema dosimétrico possui especificações de utilização, que devem ser observadas, pois fora destas o sistema não medirá com a precisão apropriada.

Estas especificações não oferecem dificuldades, pois a condição normal na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte comercial é ocorrer a degradação do espectro de radiação emitido pela fonte de ^{60}Co , pois isto significa que há contêineres preenchidos com material passando entre a posição de irradiação estática e a fonte de radiação. Para estes casos a incerteza da curva de calibração obtida entre as configurações “tarugo” ($5,1 \text{ g/cm}^2$) e “tarugo e parede de chumbo” ($27,8 \text{ g/cm}^2$), com a câmara preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar) foi de $\pm 4,5 \%$ (Tabela 5.9). Estes resultados estão dentro dos $\pm 5 \%$ de reprodutibilidade aceitos para um sistema dosimétrico de rotina (Fairand, 2002).

A incerteza das curvas de calibração obtidas no irradiador gama de categoria I, para a câmara de ionização preenchida com nitrogênio e argônio, separadamente, a 10^5 Pa (1bar) utilizando absorvedores de chumbo entre 90 e 50 % foi de, respectivamente: ± 3 e 4% , que também estão dentro dos $\pm 5 \%$ de reprodutibilidade aceitos para um sistema dosimétrico de rotina (Fairand, 2002).

Os valores da incerteza para as curvas de calibração obtidas para a câmara preenchida com argônio e exposta no irradiador gama de categoria I e preenchida com

nitrogênio e exposta no irradiador de grande porte poderiam ter sido ainda menores, apesar de estarem abaixo de $\pm 5\%$. Como é conhecido, um dos fatores que influenciam nas incertezas das medidas é o número de pontos distribuídos ao longo da curva de calibração (Helene e Vanin, 1981; Vuolo, 1992). Neste trabalho, as curvas de dose por carga absorvida foram obtidas com três pontos, quando o desejável seria obter estas mesmas curvas com pelo menos seis pontos, como as que foram obtidas com a câmara preenchida com nitrogênio e exposta no irradiador gama de categoria I. Este fato explica o valor da incerteza menor observada para a câmara nesta condição. A redução para três pontos para as outras duas análises deve-se ao fato da necessidade de diminuir o uso de dosímetros, em razão do atraso na importação destes, o que conduziu o Laboratório de Altas Doses do CTR/IPEN a limitar o fornecimento dos dosímetros de polimetacrilato de metila. No entanto, todas as medidas realizadas apresentaram valores de incerteza aceitáveis para um sistema dosimétrico de rotina.

A resposta da câmara de ionização, quando exposta a espectros degradados de ^{60}Co , pode ser aperfeiçoada. Uma sugestão seria desenvolver uma câmara para trabalhar na condição mais comum encontrada na posição de irradiação estática de um irradiador de grande porte comercial, ou seja, na de espectro degradado de ^{60}Co . Por exemplo, construir uma câmara de ionização cujas paredes apresentem espessura abaixo do equilíbrio eletrônico, otimizando a espessura ideal para essa finalidade.

A faixa de dose estudada no irradiador gama de categoria I foi de 1,5 a 7 kGy para a câmara preenchida com nitrogênio e de 0,8 a 6 kGy para a câmara preenchida com argônio. No irradiador de grande porte a faixa de dose estudada foi de 0,7 a 3,5 kGy. Estas faixas de dose não foram expandidas em razão da realização dos experimentos terem sido limitados ao horário comercial de funcionamento dos irradiadores do IPEN/CNEN-SP, que pelas normas de segurança, não permite a utilização dos irradiadores sem acompanhamento de operadores (funcionários credenciados). Por isto não foi possível avaliar completamente a utilização desta câmara para o processo de validação segundo a norma ISO 11137, que requer medidas de dose entre 1 e 9 kGy e entre 1 e 18 kGy, para os métodos 2B e 2A, respectivamente. Dentro das faixas de dose estudadas o detector desenvolvido mostrou ser adequado para ser utilizado neste processo de validação.

7 CONCLUSÕES

A câmara de ionização desenvolvida mostrou ser adequada para ser utilizada como um dosímetro de tempo real nas faixas de dose estudadas em irradiadores gama de categoria I e de grande porte, que utilizam fontes de ^{60}Co .

O tamanho total da câmara de ionização foi de $0,9\text{ cm}^3$, atingindo o objetivo de ser da ordem de 1 cm^3 .

A câmara de ionização e os cabos de isolamento mineral apresentaram resistência às altas taxas de dose e às altas doses a que foram submetidos.

O conceito original de utilizar cabos de isolamento mineral em uma câmara de ionização, no lugar de cabos coaxiais de isolamento polimérica, e dispensar a utilização de conectores entre os cabos e o detector, soldando-os diretamente ao corpo da câmara de ionização, mostrou-se adequado, permitindo o desenvolvimento da câmara com o volume total de $0,9\text{ cm}^3$.

No irradiador gama de categoria I, os testes realizados com a câmara de ionização preenchida com nitrogênio ou argônio a 10^5 Pa (1 bar) apresentaram correntes de saturação proporcionais e reproduzíveis, para taxas de dose entre cerca de 0,5 e 2,6 kGy/h, obtidas utilizando absorvedores de chumbo entre, respectivamente, 90 e 50 % e para a taxa de dose da ordem de 5 kGy/h, obtida sem a utilização de absorvedor de chumbo.

Todas as curvas de calibração de carga por dose obtidas em diferentes condições nos dois irradiadores apresentaram reprodutibilidade e linearidade crescente entre as cargas coletadas e as doses medidas. A incerteza de cada curva ficou abaixo de $\pm 5\%$, que é o recomendado para um sistema dosimétrico de rotina, o que mostra a adequação da câmara de ionização, para ser utilizada na aplicação proposta.

No irradiador gama de categoria I e com a câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), na faixa de dose investigada, entre 1,5 e 7 kGy, a incerteza de

cada curva ficou dentro de uma faixa de: ± 2 a 2,5 %. Para a curva de calibração obtida somente quando se utiliza os absorvedores de chumbo a incerteza foi de: ± 3 %.

No irradiador gama de categoria I e com a câmara de ionização preenchida com argônio a 10^5 Pa (1 bar), na faixa de dose investigada, entre 0,8 e 6 kGy, a incerteza de cada curva ficou dentro de uma faixa de: ± 3 a 3,5%. Para a curva de calibração obtida somente quando se utiliza os absorvedores de chumbo a incerteza foi de: ± 4 %.

No irradiador de grande porte e com a câmara de ionização preenchida com nitrogênio a 10^5 Pa (1 bar), na faixa de dose investigada, entre 0,7 e 3,5 kGy, a incerteza de cada curva ficou dentro de uma faixa de: ± 3 a 3,5 %. Para a curva de calibração obtida somente quando se utiliza às configurações de absorção a incerteza foi de: $\pm 4,5$ %.

Tanto o nitrogênio quanto o argônio se mostram adequados para a aplicação proposta.

O ruído de fundo da câmara de ionização preenchida com nitrogênio ou argônio a 10^5 Pa (1 bar) foi, pelo menos, 100 vezes menor, do que as correntes de saturação obtidas, quando ela foi exposta no irradiador gama de categoria I ou na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte.

Os testes realizados na posição de irradiação estática do irradiador de grande porte indicaram a independência direcional da câmara de ionização.

Similar aos resultados dos testes realizados no irradiador gama de categoria I, a câmara de ionização testada no irradiador de grande porte apresentou correntes de saturação proporcionais e reprodutíveis para taxas de dose entre 0,3 e 0,6 kGy/h, obtidas entre as configurações, respectivamente: “tarugo e parede de chumbo” e “tarugo” e para a taxa de dose de 0,9 kGy, obtida para a configuração “ar”.

Em um irradiador de grande porte comercial, a variação da taxa de dose na posição de irradiação estática é devido à degradação do espectro de radiação emitido pela fonte de ^{60}Co , ocasionada pelo material que está sendo irradiado dinamicamente e se interpõe entre

a fonte e a posição de irradiação estática. Nesta condição a incerteza associada às curvas de calibração obtidas no irradiador de grande porte (utilizando-se as configurações entre “tarugo”; $5,1 \text{ g/cm}^3$ e “tarugo e parede de chumbo”; $27,8 \text{ g/cm}^3$) foi menor do que $\pm 5 \%$, o que demonstra a aplicabilidade da câmara de ionização desenvolvida.

8 TRABALHOS FUTUROS

Otimização da espessura da parede da câmara de ionização para fótons secundários, tornando-a adequada para a sua utilização em irradiadores de ^{60}Co , em que ocorre a degradação do espectro.

Escolha de gases e otimização da pressão de preenchimento, para aumentar a sensibilidade e, deste modo, tornar o detector adequado para aplicações em taxas de dose baixas (menores do que Gy/h). Gases com baixos valores de “W” são os mais indicados (Attix e Roesch, 1968; Knoll, 1989)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, L. C.; CALDAS, L. V. E. Estabelecimento de campos padrões de radiação X de energias médias no IPEN, nível radioproteção. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 7., 28 ago - 2 set., 2005, Santos. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2005. 1 CD-ROM.
- ALVAREZ, O. T. B.; CALDAS, L. V. E. Avaliação do desempenho de dois modelos de câmaras. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 7., 28 ago - 2 set., 2005, Santos. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2005. 1 CD-ROM.
- AHMAD, N.; MIRZA, N. M.; MIRZA, S. M.; RASHID, T.; TUFAIL, M.; KHAN, L. A. Design and study of the characteristics of a three electrode experimental ionization chamber for gamma ray dosimetry of spent fuel. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.**, v. 321, p. 403-409, 1992.
- AHAMED, S. N.; BESCH, H. J.; WALENTA A. H.; PAVEL, N.; SCHENK, W. High-precision ionization chamber for relative intensity monitoring of synchrotron radiation. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A**, v. 449, p. 248-253, 2000.
- ALEX, M.; PRASAD, K.R. A gamma ionization chamber for on-line thickness gauging of materials. **J. Sci. Ind. Res.**, v. 56, p. 717-720, 1997.
- ATTIX, F. H. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. John Wiley & Sons, New York, 1986.
- ATTIX, F., H.; ROESCH, W., C. **Radiation dosimetry**. 3 ed. New York and London, Academic Press, 1968.
- BESSA, A. C. M.; CALDAS, L. V. E. Caracterização de câmaras de ionização para intercomparação em feixes de radiodiagnóstico. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 7., 28 ago - 2 set., 2005, Santos. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2005. 1 CD-ROM.
- BRANCACCIO, F.; DIAS, M. S. Sistema eletrônico para automatização de medidas de correntes produzidas por câmaras de ionização. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 6., 11-16 agosto, 2002, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.
- CALVO, W. A. P.; HESS JUNIOR, A.; MACIEL, R.; B. Desenvolvimento de cabos de isolamento mineral para instrumentação nuclear de reatores. In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 3., 22-27 abril, 1990, **Anais . . .**
- CALVO, W. A. P.; RELA, P. R.; SPRENGER, F. E.; COSTA, F. E.; OMI, N. M.; VIEIRA, J. M. A Small Size Continuous Industrial Gamma Irradiator. **Radiat. Phys. Chem**, v. 71, p. 563-565, 2004.

- CONTI, E.; MENEGUZZO, A. T.; ONOFRIO, R.; CARUGNO, G.; BRESSI, G.; CERDONIO, S.; ZANELLO D. Performace of a liquid xenon time projection chamber for low-energy gamma-rays detection. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.**, v. 356, p. 286-296, 1995.
- COSTA, A. M.; CALDAS, L. V. E. Desempenho de uma câmara de ionização especial para controle da qualidade em radioterapia. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 6., 11-16 agosto, 2002, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.
- COSTA, A. M. **Desenvolvimento de câmaras de ionização tandem para utilização em programas de controle de qualidade em radioterapia e radiodiagnóstico.** 2003. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, 2003.
- DEWERD, L. A.; WAGNER, L. K. Characteristics of radiation detectors for diagnostic radiology. **Applied Radiation and Isotopes**, v 50, p. 125-136, 1999.
- DMITRENKO, V.,V.; DVORNYAK, A., G.; GRATCHEV, V. M.; KONDAKOVA, O. N.; KRIOVOVA, K. V.; PAPCHENKO A. Y.; SOKOLOV, D., V.; ULIN, S., E.; UTESHEV, Z., M.; VLASIK, K., F. A thermostable high pressure xenon gamma-ray detector for monitoring concentration of KCl during fertilizer manufacturing. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.**, v. 442, p. 326-330, 1999.
- EMBRARAD EMPRESA BRASILEIRA DE RADIAÇÕES LTDA, **Plano de Radioproteção**, Cotia, Brasil, 1998.
- ENSAF, M. R.; SOLIMANIAN, A.; AFARIDEH, H. Design, construction and calibration of plane-parallel ionization chambers at the SSDL of Iran. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 6., 11-16 agosto, 2002, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.
- GOLÇALVES, J. A. C.; PASCHOLATI, P. R.; TRIDAPALLI, D.; RIDENTI, M. A.; BOTELHO, S.; BUENO, C. C. Uso de uma câmara de ionização de poço para medidas de atividade de fontes sólidas de ^{192}Ir . In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 7., 28 ago - 2 set., 2005, Santos. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2005. 1 CD-ROM.
- FIELD, C.; MAZAHARI, G.; HUGHES W.; JONES, G. M. An ion chamber system used at high instantaneous rates. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.**, v. 531, p. 569-576, 2004.
- FAIRAND, B. P. **Radiation sterilization for health care products.** New York, N. Y.: CRC Press, 2002
- HARWELL DOSIMETERS LTD. Disponível em: <www.harwell-dosimeters.co.uk>. Acesso em: 11 de março de 2004.

- HELENE, O. A. M.; VANIN, V. R. **Tratamento estatístico de dados em física experimental**, Edgar Blücher, São Paulo, 1981.
- HINO, Y.; KAWADA, Y.; NAZAROH. An improved leakage current compensation technique for a 4 pi gamma ionization chamber system. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.**, v. 369, p. 392-396, 1996.
- HOLM, N. W.; BERRY, R., J. **Manual on radiation dosimetry**. New York, N. Y.: Marcel Dekker Inc, 1970.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Radiation safety of gamma and electron irradiation facilities**, Safety Series 107, Vienna: IAEA, 1992.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Manual on panoramic gamma irradiators (categories II and IV)**, Practical Radiation Safety Manual, Vienna: IAEA, 1996.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **Sterilization of care products - requirements for validation and routine control - radiation sterilization**, 1. ed., Switzerland: ISO, 1995 (ISO 11137-1995).
- KOCHKIN, N. I.; CHIRKÉVITCH, M. G. **Prontuário de física elementar**. Ed. Mir, Moscou, 1986.
- KNOLL, G., F. **Radiation detection and measurement**. Ed. John Wiley & Sons, New York, 1989.
- LAITANO, R. F.; TONI, M. P.; PIMPINELLA, M.; BOVI, M. Determination of the K_{wall} correction factor for a cylindrical ionization chamber to measure air-kerma in ^{60}Co gamma beams. **Phys. Med. Biol.**, v.47, p. 2411-2431, 2002
- LOW, D. A.; MUTIC, S.; DEMPSEY, J. F.; GERBER, R. L.; BOSCH, W. R.; PEREZ C. A.; PURDY J. A. Quantitative dosimetric verification of an IMTR planning and delivery system. **Radiotherapy & Oncology**, v. 49, p. 305-316, 1998.
- MAIA, A. F.; CALDAS. L. V. E. Calibração de uma câmara tipo lápis em feixes padrões de raios-X. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 6., 11-16 agosto, 2002, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.
- MAIA, A. F.; CALDAS L. V. E. Projeto e construção de uma câmara de ionização especial de placas paralelas. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 7., 28 ago - 2 set., 2005, Santos. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2005. 1 CD-ROM.
- MCDONALD, J.; VELISSARIS, C.; VIREN, B.; DIWAN, M.; ERWIN, A. R.; NAPLES, D.; PING, H. Ionization chambers for monitoring in high-intensity charged particle beams. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Research A**, v. 496, p. 293-304, 2003.

- MCLAUGHLIN, W.L.; BOYD, A.W.; CHADWICK, K.H.; MCDONALD, J.C.; MILLER, A. **Dosimetry for Radiation Processing**, Taylor & Francis, London, 1989.
- MCMINN, K. W.; GOODINGS A. The development of mineral insulated cables for in-core neutron detectors. **J. British Nucl. Energy Society**, v. 10, p. 33-40, 1971.
- MUNCK AF ROSENSCHÖLD, P. M.; CEBERG, C. P.; GIUSTI, V.; ANDREO, P. Photon quality correction factors for ionization chambers in an epithermal neutron beam. **Phys. Med. Biol.**, v. 47, p. 2397-2409, 2002
- NEUHAUSER, W. D.; MYERS, K. D.; ROSENTHAL, S. Proton beam dosimetry for radiosurgery: implementation of the ICRU report 59 at Harvard Cyclotron Laboratory. **Phys. Med. Biol.**, v. 47, p. 1369-1389, 2002.
- NIEUWENHOVE, R. V.; VERMEEREN, L. Online gamma dose-rate measurements by means of a self-powered gamma detector. **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, v. 49, p. 1914-1918, 2002.
- OLIVEIRA, M., O.; CALDAS, L. V. E. Calibração de um aplicador dermatológico. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 6., 11-16 agosto, 2002, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.
- PANT, L. M.; BISWAS, D. C.; DINESH, B. V.; THOMAS, R. G.; SAXENA, A.; SAWANT, Y. S.; CHOUDHURY, R. K. A large area position-sensitive ionization chamber for heavy-ion-induced reaction studies. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Research A**, v. 495, p. 121-131, 2002.
- PARK, S. H.; KIM, H. S.; KIM, Y. K.; KANG, S. M.; KIM, J. C.; KIM J. K. Saturation characteristics of the ionization chamber at a low dose rate. **Rad. Phys. Chem.**, v.73, p. 248-253, 2005
- POTIENS, M. P. A.; CALDAS, L. V. E. Comportamento de monitores, nível radiodiagnóstico, em feixes padronizados de radiação X. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 6., 11-16 agosto, 2002, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.
- PRICE, W. J. **Nuclear radiation detection**, McGraw-Hill, New York, 1958.
- RELA, P. R.; CALVO, W. A. P.; SPRINGER, F. E.; OMI, N. M.; COSTA, F. E.; VIEIRA, J. M.; ANDRADE E SILVA, L. G. Desenvolvimento e implantação de um irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. **Rev. Bras. Pesq. Des.**, v. 4, n. 4, parte 1, p. 1710-1713, set 2002.
- ROCHA, F. D. G.; CALDAS L. V. E. Desempenho de um sistema padrão de intercomparação em feixes de raios X de energias baixas. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 6., 11-16 agosto, 2002, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.

- RODRIGUES JÚNIOR, A. A. **Vidro comercial como detector e medidor de radiação num irradiador de grande porte**. 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, 2000. Disponível no formato pdf em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/851131/tde-291022003-105733/>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2004.
- SAITO, N.; SUZUKI, I., H. Absolute fluence rates of soft X-rays using a double ion chamber. **Journal of Electron Spectroscopy**, v. 101-103, p. 33-37, 1999.
- SÁNCHEZ-DOBLADO, F.; CAPOTE, R.; LEAL, A.; ROSELLÓ, J. V.; LAGARES, J. I.; ARRÁNS, R.; HARTMANN, G. H. Microionization chamber for reference dosimetry in IMRT verification: clinical implications on OAR dosimetric erros. **Phys. Med. Biol**, v. 50, p. 959-970, 2005.
- SANTOS, L. A. P.; ARAUJO, E. S.; AMAZONAS, I. B.; AZEVEDO, W. M. An innovative ionization chamber based on conducting polymer. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 7., 28 ago - 2 set., 2005, Santos. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2005. 1 CD-ROM.
- SANTOS, P. O.; SILVA, T. A. Desempenho de uma câmara de ionização na medida de atividade de fontes para fins de armazenamento. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 7., 28 ago - 2 set., 2005, Santos. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2005. 1 CD-ROM.
- SCHRADER, H. Calibration and consistency of results of an ionization-chamber secondary standard measuring system for activity. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 52, p. 325-334, 2000.
- SEPHTON, J. P.; SHARPE, P. H. G.; CHU, R. D. H. The use of ionization chambers for dose rate measurements at industrial irradiations plants. **Radiat. Phys. Chem**, v. 63, p. 789-792, 2002.
- SHARPE, P. H. G.; SEPHTON, J. P.; CHU, R. D. H. Real time measurements at an industrial irradiation plant. **Radiat. Phys. Chem**, v. 57, p. 687-690, 2000.
- SHORTT, K. R.; BIELAJEW, A. F.; ROSS, C. K.; STEWART, K. J.; BURKE, J. T. The effect of wall thickness on the response of a spherical ionization chamber. **Phys. Med. Biol.**, v. 47, p. 1721-1731, 2002.
- SMITH, G. C.; MAHLER, G. J.; YU, B.; KANE, W. R.; MARKEY, J. K. **Gamma-ray spectrometer utilizing xenon at high pressure**. Brookhaven National Lab., Jul. 1994, (BNL 49994).
- TANAKA, R.; KANECO, H.; TAMURA, N.; KATOH, A.; MORIUCHI, Y. Standard measurement of processing level gamma ray dose rates with a parallel-plate ionization chamber. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH-DOSE DOSIMETRY, 1984, **Proceedings** ... Vienna: IAEA, 1985. p. 203-220.

- TEPPER, G.; LOSEE, J. High resolution room temperature ionization chamber xenon gamma radiation detector. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.**, v. 356, p. 339-346, 1995.
- TEPPER, G.; LOSEE, J. A compressed xenon ionization chamber X-ray/gamma-ray detector incorporating both charge and scintillation collection. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.**, v. 368, p. 862-864, 1996.
- TEPPER, G.; LOSEE, J.; PALMER, R. A cylindrical xenon ionization chamber detector for high resolution, room temperature gamma radiation spectroscopy. **Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A.**, v. 413, p. 467-470, 1998.
- VAN DER MERWE, D. G.; KEDDY, R. J. Relative electron dosimetry using a synthetic diamond probe. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 54, p. 325-334, 1999.
- VELISSARIS, C. A time-dependent solution for the operation of ion chambers in a high-ionization background. **Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A.**, v. 547, p. 511-516, 2005.
- VIVOLO, V.; CALDAS, L. V. E. Curvas de saturação de câmaras de ionização tandem para medidas de Hp(10). In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 7., 28 ago - 2 set., 2005, Santos. **Anais . . .** Rio de Janeiro: ABEN, 2005. 1 CD-ROM.
- VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**, Edgar Blücher, São Paulo, 1992.
- ZWASKA, R. M.; HALL, J.; KOPP, S. E.; PROGA, M.; ERWIN, A. R.; PING, H.; VELISSARIS, C.; HARRIS, D. A.; NAPLES, D.; MACDONALD, J.; NORTHACKER, D.; DIWAN, M.; VIREN, B. Beam tests of ionization chambers for NuMI neutrino beam. **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, v.50, n. 4, p. 1129-1135, 2003