

PROGRAMA DE QUALIFICAÇÃO DE UM IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO

Paulo Roberto Rela, Wilson Aparecido Parejo Calvo, Célia Marina Napolitano, Yasko Kodama, Nelson Minoru Omi, Fábio Eduardo da Costa, Danilo Cardenuto Ferreira e Leonardo Gondim de Andrade e Silva

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP)
Centro de Tecnologia das Radiações (CTR)
Av. Professor Lineu Prestes, 2.242
05508-000, São Paulo – SP, Brasil
prela@ipen.br, wapcalvo@ipen.br, lgasilva@ipen.br

RESUMO

O Centro de Tecnologia das Radiações (CTR), do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) iniciou a implantação do programa de qualificação do Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, do qual faz parte o controle da documentação, testes e calibração dos equipamentos e o mapeamento de dose do irradiador e dos produtos. Com capacidade máxima para 37PBq, realizou-se o primeiro carregamento do Irradiador Multipropósito com 3,4PBq de Cobalto-60, utilizado-se o software *Cadgamma*, desenvolvido como contribuição de uma Dissertação de Mestrado no Centro. No mapeamento de dose do irradiador e dos produtos serão utilizados dosímetros de rotina comerciais de polimetilmetacrilato, avaliando-se a uniformidade de dose dos produtos com diferentes densidades. Ao final do trabalho será calculado o fator de eficiência do Irradiador Multipropósito, comparando-o com os valores apresentados pelos tradicionais fabricantes mundiais de irradiadores de grande porte. Construído com tecnologia totalmente nacional e apoio financeiro da FAPESP, esse irradiador servirá de planta de demonstração e permitirá a comunidade científica brasileira desenvolver novos produtos e processos, os quais utilizam a radiação ionizante.

1. INTRODUÇÃO

Na otimização do *design*, operação e manutenção de uma planta de irradiação gama, objetivando-se uma análise de custo e a segurança da instalação, as seguintes decisões devem ser tomadas antes da construção do irradiador, pois a análise criteriosa destes parâmetros são fundamentais no desenvolvimento do sistema de irradiação [1-3]:

- definir a capacidade da planta;
- calcular o desempenho da instalação radiativa (custo do produto processado por quilograma);
- definir a forma de armazenamento das fontes radioativas - seca (*dry*) ou úmida (*wet*);
- definir a geometria do *rack* de fontes em relação aos produtos a serem processados (*product overlap source* ou *source overlap product*);
- definir a rota de passagem dos produtos pelas fontes radioativas (número de passes); e
- definir o sistema de transporte de produtos (*carrier*, *pallet* ou *tote box*).

Atualmente, a tendência mundial na construção de irradiadores industriais de Cobalto-60 segue duas linhas: a de irradiadores de grande porte, com capacidade para 111PBq (3MCi), podendo chegar a 444PBq (12MCi) e de irradiadores compactos ou dedicados, com capacidade de até 37PBq (1MCi). Os irradiadores compactos foram desenvolvidos com o

propósito de serem instalados de forma integrada às unidades produtivas, tendo como principal característica o processamento em batelada (*batch*) [4-6].

Os mais recentes modelos de irradiadores de Cobalto-60 tipo compacto são o *BREVISION™*, desenvolvido pela empresa canadense *MDS Nordion Ion Technologies*, o *MICROCELL™* e o *MINICELL™*, ambos desenvolvidos pela empresa americana *SteriGenics International, Inc.* e o *BPI PALLET IRRADIATOR™*, desenvolvido pela empresa francesa *Picowave Technology*. O Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, no qual implantou-se o programa de qualificação proposto nesse trabalho, segue a mesma tendência desses modelos de irradiadores, no que se refere ao tamanho da câmara de irradiação e a atividade do material radioativo. Mas, apresenta sistemas inéditos de porta giratória e de irradiação de produtos.

Com o Irradiador Multipropósito, vários projetos de P&D serão beneficiados no IPEN e nas comunidades acadêmicas nacional e internacional. Permitirá desenvolver tecnologia de processamento contínuo, validar sistemas dosimétricos e códigos computacionais de mapeamento de dose, viabilizando-se as aplicações das radiações em processos industriais, contribuindo-se para a otimização dos processos produtivos, aumentando-se a competitividade dos produtos nacionais no País.

1.1. Objetivo

Implantar o programa de qualificação do Irradiador Multipropósito de ^{60}Co tipo Compacto, desenvolvido com tecnologia nacional no Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN, baseado nas Normas CE-EN-522, ISO 11137 e *Safety Series n.º 539 – IAEA*, além de avaliar a uniformidade de dose e o fator de eficiência da instalação radiativa, para produtos com diferentes densidades.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sob o aspecto de segurança, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), classifica os irradiadores gama nas Categorias I, II, III e IV, de acordo com o *design* da instalação, a acessibilidade e a blindagem das fontes radioativas. O Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, adota todos os sistemas elétricos e mecânicos de intertravamento, alarmes e dispositivos de emergência e é classificado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) como sendo do GRUPO I e pela AIEA um IRRADIADOR CATEGORIA IV [3,7].

No cálculo do fator de uniformidade de dose no produto, para o Irradiador Multipropósito de Cobalto-60, utiliza-se a equação (1):

$$f = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \quad (1)$$

Na qual,

- f : fator de uniformidade de dose;
- D_{\max} : dose máxima no produto, após irradiação (kGy); e
- D_{\min} : dose mínima no produto, após irradiação (kGy).

O fator de eficiência é obtido utilizando-se a equação (2):

$$F = 18,7 \frac{X \cdot D}{A^{60}\text{Co}} \quad (2)$$

Na qual,

- F: Fator de eficiência do irradiador;
- X: *Throughput* (kg/h);
- D: Dose absorvida (kGy); e
- $A^{60}\text{Co}$: Atividade em ^{60}Co (Ci, 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq).

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Aquisição, Transporte e Inspeção das Fontes Radioativas

Adquiriram-se 13 fontes radioativas seladas de ^{60}Co , modelo C-188, com atividade total de 3.407,7TBq (92.099Ci) em 26/11/04, da empresa canadense *MDS Nordion Ion Technologies*, maior fabricante internacional de fontes industriais de ^{60}Co e Irradiadores Gama. As fontes de ^{60}Co , modelo C-188 foram duplamente encapsuladas em aço inoxidável AISI 316L, com comprimento de 452mm e 11,2mm de diâmetro.

As 13 fontes de ^{60}Co foram transportadas da *MDS Nordion Ion Technologies* (Ottawa/Canadá) ao IPEN (São Paulo/Brasil), em um Embalado de Transporte tipo B, modelo F-168, confeccionado em chumbo, aço carbono e aço inoxidável AISI 304, massa total de 5.445kg, certificado pela *Atomic Energy Control Board* no Canadá, sob n.º CDN/2063/B(U)-85 e fixado em um contêiner marítimo de 6,1m (20 pés) de comprimento e volume de 30m³.

Submeteu-se o Embalado de Transporte tipo B, modelo F-168 ao Teste de Esfregação, para se determinar à existência ou não de contaminação radioativa superficial. Verificou-se também a integridade e estanqueidade das 13 fontes seladas de ^{60}Co por meio do Teste de Fuga (*Flushing Test*). Os filtros de papel e plásticos, mangueiras, conexões e água de lavagem das fontes de ^{60}Co foram monitorados, utilizando-se um detector de radiação Geiger-Müller tipo *pancake*, modelo MIP-10, da marca *Eurisys Mesures*, calibrado no IPEN em dezembro/2004.

3.2. Planejamento e Distribuição das Fontes Radioativas

No planejamento e distribuição das 13 fontes radioativas de ^{60}Co nos magazines dos 2 *racks* do Irradiador Multipropósito, utilizou-se o aplicativo para a simulação das doses absorvidas em sistemas de irradiação com raios gama - *Cadgamma*, desenvolvido como contribuição de uma Dissertação de Mestrado, no Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN [8].

Após se comprovar a não existência de contaminação superficial, no Teste de Esfregação e a integridade e estanqueidade das 13 fontes seladas de ^{60}Co , no Teste de Fuga (*Flushing Test*),

iniciou-se a instalação das 13 fontes radioativas de ^{60}Co em 6 magazines e 2 *racks* de fontes, do Irradiador Multipropósito. Com auxílio de ferramentas especiais e da mesa posicionada dentro da piscina, os magazines foram montados individualmente, com fontes de ^{60}Co modelo C-188 e lápis frios de aço inoxidável AISI 316L (*dummies*), ou seja, sem ^{60}Co sendo, em seguida, transferidos para os seus respectivos *racks* de fontes.

3.3. Programa de Qualificação do Irradiador Multipropósito

Realizou-se o programa de qualificação do Irradiador Multipropósito de ^{60}Co tipo Compacto, do qual faz parte o controle da documentação, testes e calibração dos equipamentos e o mapeamento de dose do irradiador e dos produtos, baseado nas Normas CE-EN-522, ISO 11137 e *Safety Series n.º 539 – IAEA* [9,10].

No mapeamento de dose do Irradiador Multipropósito e dos produtos foram utilizados dosímetros de rotina comerciais de polimetilmetacrilato (PMMA), do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), fabricados pela empresa inglesa *Harwell Dosimeters Limited*, avaliando-se a uniformidade de dose dos produtos com diferentes densidades [11].

Na qualificação do Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto foram utilizados os próprios produtos, disponibilizados pelo Centro de Radiofarmácia (tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$) e pelo Centro de Biologia Molecular (ração animal para biotério) do IPEN. As doses absorvidas solicitadas pelos Centros de P&D nos produtos foram de 20kGy e 10kGy, respectivamente.

3.4. Mapeamento de Dose dos Produtos

As caixas em papelão com as tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, densidade aparente de $0,09\text{g/cm}^3$ foram posicionadas nas caixas de alumínio do sistema de transporte tipo *tote box* do Irradiador Multipropósito. No mapeamento de dose dos produtos, foram utilizados 80 dosímetros de rotina do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), 20 dosímetros por plano, posicionados em uma das caixas de alumínio preenchidas com os produtos a serem esterilizados por radiação. Adotou-se o mesmo procedimento, para os sacos de ração animal para biotério, densidade aparente de $0,49\text{g/cm}^3$, conforme mostrado na Fig. 1.

Na Fig. 2 é mostrado o desenho esquemático de distribuição dos 80 dosímetros de rotina, posicionados em 4 planos distintos (0, 1, 2 e 3), no mapeamento de dose dos produtos para geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Os dosímetros dos planos centrais 1 e 2 foram posicionados a 1/3 e 2/3, respectivamente, da altura total de empilhamento de 1,03m, das caixas de papelão com produtos, por caixa de alumínio. Fixou-se ainda um dosímetro de referência do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), na região central da face externa, da caixa monitorada com os 80 dosímetros e nas duas caixas de alumínio adjacentes.

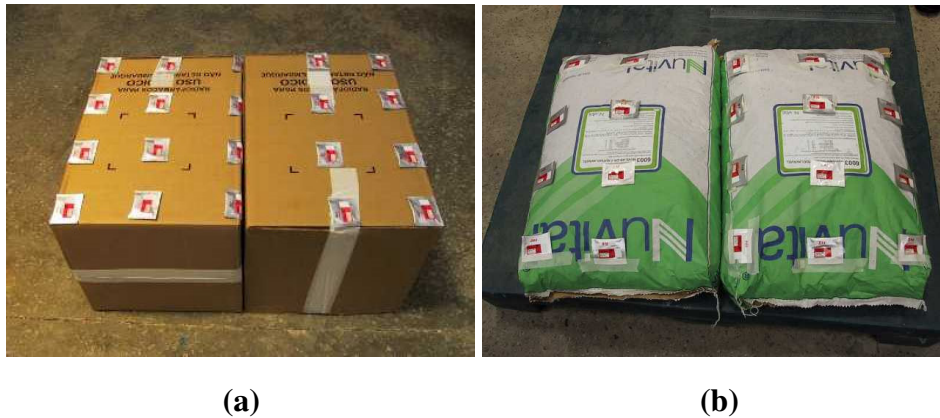


Figura 1. Posicionamento dos 20 dosímetros de rotina do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD) por plano, utilizados no mapeamento de dose dos produtos: a) tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc e b) ração animal para biotério.

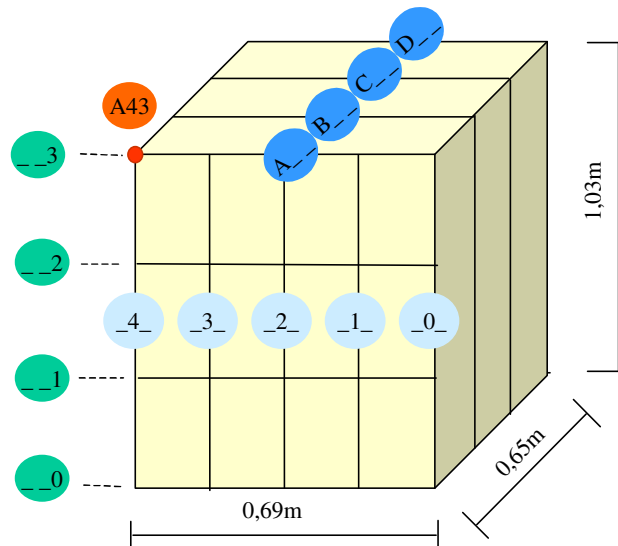


Figura 2. Desenho esquemático de distribuição dos 80 dosímetros de rotina do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), posicionados em 4 planos distintos (0, 1, 2 e 3), no mapeamento de dose dos produtos. O dosímetro posicionado no vértice superior esquerdo é o A43.

O *time setting* do Irradiador Multipropósito (tempo no qual cada caixa de alumínio permaneceu parada na mesma posição, no sistema de transporte, em frente aos 2 *racks* de fontes), dos produtos para geradores de ^{99m}Tc foi de 85min66s. Nos produtos para biotério, o *time setting* foi de 60min66s.

As medidas da espessura, absorvância, absorvância específica e dose absorvida dos 83 dosímetros tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), foram realizadas no Laboratório de Dosimetria em Processos de Irradiação do CTR, utilizando-se o micrômetro externo digital, faixa nominal de medição de 0mm a 25mm, resolução de 0,001mm, exatidão de $\pm 0,002\text{mm}$,

modelo 293-801, marca *Mitutoyo Corporation*, calibrado em 28/11/03 e o espectrofotômetro digital, com comprimento de onda ajustado em 640nm, marca *Genesys-20*, modelo 4001/4.

Após o processamento dos produtos para geradores de ^{99m}Tc e biotério, utilizaram-se as equações (1) e (2) para se obterem os valores dos fatores de uniformidade de dose e eficiência do Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, desenvolvido no IPEN.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Especificações Técnicas Finais do Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto

As características finais do Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, idealizadas pelos profissionais do “Grupo de Projeto, Construção e Implantação de Irradiadores de Grande Porte e Aceleradores Industriais de Elétrons” do CTR, mostrado na Fig. 3 são:

- Capacidade total licenciada pela CNEN: 37PBq (1MCi), Categoria IV;
- Atividade inicial de operação: 3.407,7TBq (92.099Ci, em 26/11/04);
- Piscina: 7,0m de profundidade e 2,7m de diâmetro;
- Portas de concreto: 1 deslizante, para montagem e manutenção da instalação, com 4,0m (comprimento) x 4,0m (altura) x 2,45m (largura) e 1 giratória, para entrada e saída de produtos na câmara de irradiação, com 2,65m (diâmetro) x 4,0m (altura);
- Parede de concreto: 1,8m de espessura (densidade = $2,35\text{g/cm}^3$);
- Geometria da fonte: 2 *racks* de fontes retangulares, com capacidade para 8 magazines por *rack*, num total de 504 lápis de ^{60}Co ;
- Dimensões da fonte: 1 *rack* de 1,4m (comprimento) x 2,1m (altura) e 1 *rack* de 0,7m (comprimento) x 2,1m (altura);
- Lápis de ^{60}Co por magazine: 40 (magazine para *rack* de 1,4m) e 23 (magazine para *rack* de 0,7m);
- Sistemas de irradiação: *product overlapping source*;
- Sistema de transporte: *tote box*, contínuo, duplo empilhamento de caixas, sendo que cada nível de caixa com os produtos movimentam-se na mesma direção (horizontal), mas em sentidos contrários;
- Capacidade da câmara de irradiação: 14 caixas, aproximadamente $6,47\text{m}^3$;
- Produtos a serem processados: alimentos; materiais médicos, cirúrgicos e biológicos; matérias-primas para as indústrias de alimentos, farmacêuticas e de cosméticos, entre outros;
- Doses de irradiação: $> 1\text{kGy}$ em um ciclo de irradiação;
- Tempo de irradiação: variável, de acordo com o produto a ser processado;
- Tamanho das caixas de alumínio: 0,69m (comprimento) x 0,65m (largura) x 1,03m (altura);
- Volume por caixa: 462 litros ($0,46\text{m}^3$);
- Capacidade máxima por caixa: 400kg; e
- Capacidade anual máxima do irradiador: variável, de acordo com a densidade do produto.



Figura 3. Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, projetado, construído e implantado no IPEN, com tecnologia nacional e apoio financeiro da FAPESP.

4.2. Resultado dos Testes de Esfregaço e de Fuga (*Flushing Test*)

O Teste de Esfregaço no Embalado de Transporte tipo B, modelo F-168 e o Teste de Fuga (*Flushing Test*), apresentaram resultados negativos. As monitorações dos filtros de papel e plásticos, mangueiras, conexões e água de lavagem das fontes de ^{60}Co , com detector *Geiger-Müller* tipo *pancake*, apresentaram valores inferiores a 5nCi (185Bq).

4.3. Distribuição das Fontes Seladas de ^{60}Co nos Racks

Na Fig. 4 são mostradas as fontes seladas de ^{60}Co , instaladas nos 6 magazines, em 2 *racks* do Irradiador Multipropósito. Três fontes de ^{60}Co , as quais somam 739,2TBq (19.976Ci), ou seja, 21,7% da atividade total de 3.407,7TBq (92.099Ci, em 26/11/04) foram instaladas em dois magazines do *rack* de 0,7m de largura, voltadas para o *rack* de 1,4m de largura. Nesse último *rack* foram instaladas dez fontes de ^{60}Co , em quatro magazines e de forma balanceada, as quais somam 2.668,5TBq (72.123Ci), ou seja, 78,3% da atividade total.

4.4. Análise dos Fatores de Uniformidade de Dose e Eficiência

Os valores dos fatores de uniformidade de dose (f) e eficiência (F) do Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, comparados aos Irradiadores Comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies* (*PALLET IRRADIATORTM*, *JS-9500TM*, *JS-9600TM* e *JS-10000TM*), para densidades aparentes de 0,09g/cm³ e 0,49g/cm³, os quais possuem sistemas de transporte contínuo do tipo *tote box* são apresentados na Tabela 1.



Figura 4. Fontes seladas de ^{60}Co instaladas nos 6 magazines dos 2 racks do Irradiador Multipropósito, no total de 3.407,7TBq (92.099Ci, em 26/11/04).

Tabela 1. Fatores de uniformidade de dose (f) e eficiência (F) do Irradiador Multipropósito e dos Irradiadores Comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies*, para densidades aparentes de $0,09\text{g/cm}^3$ e $0,49\text{g/cm}^3$ [12].

Irradiadores / Fatores	Irradiador Multipropósito	⁽¹⁾ <i>Pallet Irradiator (design 8)</i>	⁽²⁾ <i>JS-9500</i>	⁽²⁾ <i>JS-9600</i>	⁽³⁾ <i>JS-10000 (design 1)</i>	⁽³⁾ <i>JS-10000 (design 2)</i>
Densidade Aparente de $0,09\text{g/cm}^3$						
Uniformidade de dose (f)	1,33	1,45	1,40	1,50	1,25	1,30
Eficiência (F) (%)	11,6	15,0	14,6	16,8	18,7	25,1
Densidade Aparente de $0,49\text{g/cm}^3$						
Uniformidade De dose (f)	2,08	3,15	⁽⁵⁾ 1,85	⁽⁴⁾ 1,65	⁽⁵⁾ 1,85	1,90
Eficiência (F) (%)	36,6	23,4	⁽⁵⁾ 35,5	⁽⁴⁾ 33,7	41,1	⁽⁵⁾ 44,9

⁽¹⁾ *Pallets* em oito posições, dois níveis e dois passes ao redor das fontes de ^{60}Co ;

⁽²⁾ *Tote Boxes* em dois níveis e dois passes ao redor da fontes de ^{60}Co ;

⁽³⁾ *Tote Boxes* em dois níveis, quatro ou oito passes ao redor das fontes de ^{60}Co ;

⁽⁴⁾ $0,30\text{g/cm}^3$; e

⁽⁵⁾ $0,40\text{g/cm}^3$.

5. CONCLUSÕES

No projeto e construção do Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, o aplicativo *Cadgamma* foi imprescindível no planejamento do sistema de irradiação (*product overlap source*), sistema transporte de produtos (*tote box*, contínuo e duplo empilhamento de

caixas), rota de passagem dos produtos (dois passes) e na distribuição das fontes radioativas, mantendo-se as doses dentro dos limites especificados para o material, com o menor desperdício de radiação ionizante, melhor eficiência e melhor fator de uniformidade de dose por *rack*, para diferentes densidades de produtos.

No mapeamento de dose dos produtos, com densidades de $0,09\text{g/cm}^3$ e $0,49\text{g/cm}^3$, os valores encontrados para os fatores de uniformidade de dose e eficiência, demonstram que o Irradiador Multipropósito do IPEN, projetado e construído com tecnologia totalmente nacional, apresenta excelente desempenho e é extremamente competitivo, quando comparado aos irradiadores compactos e os de grande porte da *MDS Nordion Ion Technologies*, maior e mais tradicional fabricante de irradiadores gama no mercado internacional.

Os Relatórios de Análise de Segurança: “Aprovação Prévia” e “Licença de Construção”; e o “Plano de Transporte” exigidos e já aprovados pela CNEN; “Memorial de Caracterização do Empreendimento” e “Solicitação de Certificado de Dispensa de Instalação” exigidos e já aprovados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e o “Licenciamento Ambiental para Transporte de Material Radioativo” exigido e já aprovado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), confirmam os critérios rigorosos de projeto e segurança adotados no Irradiador Multipropósito, não oferecendo riscos às comunidades circunvizinhas e a do próprio IPEN. O Relatório de Análise de Segurança: “Autorização para Operação”; encontra-se em fase de análise e aprovação, na Coordenação Geral de Licenciamento e Controle da CNEN.

Para se concluir o programa de qualificação do Irradiador Multipropósito, necessita-se do mapeamento de dose em, pelo menos, dois produtos com densidades aparentes entre $0,20\text{g/cm}^3$ e $0,40\text{g/cm}^3$.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão e aporte financeiro e à Direção do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pelo apoio Científico e Tecnológico ao Projeto de Pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. Rela, Paulo R. *Diseno y Calificación de Plantas de Irradiación*. Curso Regional sobre Procedimientos, Control de Calidad y Seguridad en Procesos de Irradiación – IAEA, Santiago do Chile – Chile, Octubre 16-27, 2000.
2. Corley, John T., Cobalt-60 Gamma Irradiation Current Status, Trends and Insights. *Radiat. Phys. and Chem.*, v.52, n.1-6, p.419-424, 1998.
3. International Atomic Energy Agency. *Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities* (IAEA Safety Series n.º 107, Vienna - Austria, 1992).
4. Beers, Eric W., The Micro-Cell Irradiator: a Small Volume Gamma Irradiator for On-Site and Special Processing. *Radiat. Phys. Chem.*, v.57, p.573-576, 2000.
5. Mckinney, Dan; Perrins, Robert, Centurion – a Revolutionary Irradiator. *Radiat. Phys. Chem.*, v.57, p.569-571, 2000.

6. Clouser, James F.; Beers, Eric W., The MinicellTM Irradiator: A New System for a New Market. *Radiat. Phys. Chem.*, v.52, n.1-6, p.409-412, 1998.
7. Comissão Nacional de Energia Nuclear. *Licenciamento de Instalações Radiativas* (CNEN-NE-6.02, Rio de Janeiro, julho, 1998).
8. Omi, Nelson M. *Geração de um Aplicativo para Simulação de Doses em Sistemas de Irradiação Gama*. São Paulo: 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/USP, 2000.
9. Association for the advancement of Medical Instrumentation. *Sterilization of Health Care Products – Requirements for Validation and Routine Control – Radiation Sterilization*. USA, February 1994. (AAMI/ISO 11137/R2-94).
10. International Atomic Energy Agency. Guidelines for Industrial Radiation Sterilization of Disposable Medical Products(Cobalt-60 Gamma Irradiation). 1990. (IAEA Technical Reports Series n.º 539, Vienna-Austria, 1990).
11. American Society for Testing and Materials. *Use of a Polymethylmethacrylate Dosimetry System*. Committee E-10, Subcommittee E10-01, April 1993 (ASTM E 1276-93).
12. MDS Nordion Ion Technologies. Catálogos Técnicos *BREVIONTM*, *PALLET IRRADIATORTM*, *JS-9500TM*, *JS-9600TM* e *JS-10000TM*, 2005.