



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO EM
UM IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60
TIPO COMPACTO**

WILSON APARECIDO PAREJO CALVO

Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientador:
Dr. Leonardo Gondim de Andrade e Silva

**São Paulo
2005**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO EM UM IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO

WILSON APARECIDO PAREJO CALVO



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

**Orientador:
Dr. Leonardo Gondim de Andrade e
Silva**

**São Paulo
2005**

Aos meus pais Eduardo e Carmen (in memoriam) pela oportunidade, à minha esposa Adriana e filhas Ana Carolina e Giovanna pela dedicação, apoio e carinho, em toda realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível a realização do presente trabalho e especialmente:

Ao Dr. Leonardo Gondim de Andrade e Silva e ao Dr. Paulo Roberto Rela pela valiosa orientação e discussões, incentivos, apoios constantes, além de proporcionarem a realização do projeto, construção e implantação do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e amizade.

À Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa pelo empenho, motivação e amizade.

Ao M.Sc. Nelson Minoru Omi e Dr. Valdir Sciani pelas valiosas contribuições no desenvolvimento deste trabalho e amizade.

Ao M.Sc. Fábio Eduardo da Costa, Eng. Francisco Edmundo Sprenger, Eng. José Mauro Vieira, Eng. Samir Luiz Somessari, Dra. Kátia Aparecida Fonseca Hilário, M.Sc. Yasko Kodama, Sra. Cláudia Regina Nolla, Sr. Eduardo Pavão Araújo, Sr. Cláudio Botelho, Sr. Vagner Fernandes, Sr. Ethel Martins Pedroso, Sr. Manoel Enésio da Silva e Sr. Marcos Cardoso da Silva pela colaboração no projeto, construção e implantação do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e amizade.

À M.Sc. Célia Marina Napolitano e ao Sr. Sebastião Feliciano da Silva pela realização dos estudos dosimétricos e amizade.

À Dra. Margarida Mizue Hamada, Dra. Maria Elisa Chuery Martins Rostelato e M.Sc. Pedro Eiti Aoki pela motivação e amizade.

A todos os colegas do Centro de Tecnologia das Radiações, dos Departamentos de Importação e Exportação do IPEN-CNEN/SP e da FAPESP, que contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

À Equipe de Proteção Radiológica pelo empenho e monitorações constantes da instalação radiativa e das fontes de cobalto-60, no transporte até o IPEN-CNEN/SP.

À Direção do IPEN-CNEN/SP, especialmente ao Dr. Claudio Rodrigues - Superintendente, Dr. Roberto Fulfaro e Dr. José Carlos Bressiani - Diretores Técnicos de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino pelo incentivo e oportunidade, pela infra-estrutura necessária ao desenvolvimento deste trabalho e amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pela concessão e aporte financeiro ao projeto de pesquisa.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e à Comissão Nacional de Energia Nuclear pela minha formação profissional, apoio científico e tecnológico ao projeto de pesquisa.

DEVELOPMENT OF AN IRRADIATION SYSTEM FOR A SMALL SIZE CONTINUOUS RUN MULTIPURPOSE GAMMA IRRADIATOR

WILSON APARECIDO PAREJO CALVO

ABSTRACT

The Radiation Technology Center from *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP)*, Brazil, developed with a revolutionary design and national technology, a small size continuous run and multipurpose industrial gamma irradiator, to be used as a demonstration facility for manufacturers and contract service companies, which need economical and logistical in-house irradiation system alternatives. Also, to be useful for supporting the local scientific community on development of products and process using gamma radiation, assisting the traditional and potential users on process validation, training and qualification of operators and radioprotection officers. The developed technology for this facility consists of continuous tote box transport system, comprising a single concrete vault, where the automated transport system of products inside and outside of the irradiator utilizes a rotate door, integrated with the shielding, avoiding the traditional maze configuration. Covering 76 m² of floor area, the irradiator design is product overlap sources and the maximum capacity of cobalt-60 wet sources is 37 PBq (1 MCi). The performed qualification program of this multipurpose irradiator was based on AAMI/ISO 11137 standard, which recommends the inclusion of the following elements: installation and process qualification. The initial load of the multipurpose irradiator was 3.4 PBq (92.1 kCi) with 13 cobalt-60 sources model C-188, supplied by MDS Nordion Ion Technologies - Canada. For irradiator dose optimization, the source distribution was done using the software *Cadgamma* developed by *IPEN-CNEN/SP*. The poly-methylmetacrylate (PMMA) dosimeters system, certified by the International Dose Assurance Service (IDAS) of the International Atomic Energy Agency (IAEA) was used for irradiator dose mapping. The economic analysis, performance concerning to dose uniformity and cobalt-60 utilization efficiency were calculated and compared with other commercial gamma irradiators available in the market.

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO EM UM IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO

WILSON APARECIDO PAREJO CALVO

RESUMO

O Centro de Tecnologia das Radiações, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) desenvolveu, com concepção revolucionária e tecnologia inteiramente nacional, um irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. Trata-se de uma planta de demonstração aos fabricantes de irradiadores gama e prestadores de serviços de irradiação, os quais necessitam de alternativas econômicas e logísticas, oferecidas pelos sistemas de irradiação compactos e conjugados às linhas de produção. Além de auxiliar a comunidade científica no desenvolvimento de novos produtos e processos, a instalação tem o propósito de contribuir com os tradicionais e potenciais usuários dessa tecnologia, além de treinar e qualificar operadores e supervisores de proteção radiológica no País. O sistema de irradiação desenvolvido neste trabalho é do tipo *product overlap source*, duplo empilhamento de caixas, sistema de transporte tipo *tote box* e porta de concreto giratória, integrada à blindagem radiológica, para entrada e saída dos produtos na câmara de irradiação de forma contínua, possibilitando a redução no tamanho da câmara de irradiação, em 76 m². Após comissionamento a frio, implantou-se o programa de qualificação desse irradiador, baseado na Norma AAMI/ISO 11137, a qual define a qualificação do processo e da instalação. Com capacidade máxima licenciada para 37 PBq (1 MCi), realizou-se o primeiro carregamento no irradiador com 3,4 PBq (92,1 kCi), em 13 fontes radioativas de cobalto-60, modelo C-188, fabricadas pela *MDS Nordion Ion Technologies* - Canadá. Para otimização da dose e distribuição das fontes nos *racks*, utilizou-se o programa *Cadgamma*, desenvolvido como contribuição de uma Dissertação de Mestrado, no IPEN-CNEN/SP. Realizou-se o mapeamento dosimétrico do irradiador e dos produtos, por meio do sistema dosimétrico certificado pelo *IDAS/IAEA* e dosímetros de polimetilmetacrilato (PMMA). Ao final do trabalho realizou-se o estudo de análise econômica, determinando-se os fatores de uniformidade de dose e eficiências do irradiador multipropósito, comparando-os com os valores apresentados pelos tradicionais fabricantes mundiais de irradiadores gama compactos e de grande porte.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVO.....	4
1.2 - CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO.....	4
1.3 - ORIGINALIDADE DO TRABALHO.....	5
1.4 - IRRADIADORES GAMA NO PAÍS.....	6
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 - FÍSICA DAS RADIAÇÕES.....	9
2.2 - FONTES SELADAS INDUSTRIAIS DE COBALTO-60.....	12
2.3 - IRRADIADORES GAMA.....	15
2.3.1 - Classificação dos Irradiadores Gama.....	15
2.4 - IRRADIADORES GAMA INDUSTRIAIS DE GRANDE PORTE....	19
2.4.1 - Capacidade de Processamento da Planta de Irradiação.....	19
2.4.2 - Armazenamento das Fontes Radioativas.....	20
2.4.3 - Geometria do <i>Rack</i> de Fontes em Relação ao Produto.....	22
2.4.4 - Rota de Passagem do Produto pelas Fontes Radioativas.....	23
2.4.5 - Sistemas de Transporte dos Produtos.....	24
2.5 - IRRADIADORES GAMA INDUSTRIAIS TIPO COMPACTO.....	27
2.5.1 - Irradiadores Compactos Comerciais.....	27
2.5.2 - Irradiador Multipropósito Tipo Compacto com Sistema de Irradiação Desenvolvido no IPEN-CNEN/SP.....	32
2.6 - ANÁLISE DE ACIDENTES E INCIDENTES NO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E NO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP.....	35
2.6.1 – Análise de Exposição Acidental de Indivíduos.....	38
2.6.2 - Liberação de Material Radioativo.....	51
2.7 - CERTIFICAÇÕES E LICENCIAMENTOS DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO.....	60

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVO.....	4
1.2 - CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO.....	4
1.3 - ORIGINALIDADE DO TRABALHO.....	5
1.4 - IRRADIADORES GAMA NO PAÍS.....	6
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 - FÍSICA DAS RADIAÇÕES.....	9
2.2 - FONTES SELADAS INDUSTRIAIS DE COBALTO-60.....	12
2.3 - IRRADIADORES GAMA.....	15
2.3.1 - Classificação dos Irradiadores Gama.....	15
2.4 - IRRADIADORES GAMA INDUSTRIAIS DE GRANDE PORTE....	19
2.4.1 - Capacidade de Processamento da Planta de Irradiação.....	19
2.4.2 - Armazenamento das Fontes Radioativas.....	20
2.4.3 - Geometria do <i>Rack</i> de Fontes em Relação ao Produto.....	22
2.4.4 - Rota de Passagem do Produto pelas Fontes Radioativas.....	23
2.4.5 - Sistemas de Transporte dos Produtos.....	24
2.5 - IRRADIADORES GAMA INDUSTRIAIS TIPO COMPACTO.....	27
2.5.1 - Irradiadores Compactos Comerciais.....	27
2.5.2 - Irradiador Multipropósito Tipo Compacto com Sistema de Irradiação Desenvolvido no IPEN-CNEN/SP.....	32
2.6 - ANÁLISE DE ACIDENTES E INCIDENTES NO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E NO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP.....	35
2.6.1 – Análise de Exposição Acidental de Indivíduos.....	38
2.6.2 - Liberação de Material Radioativo.....	51
2.7 - CERTIFICAÇÕES E LICENCIAMENTOS DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO.....	60

	Página
2.7.1 - Certificação do Irradiador Multipropósito junto à CGLC/CNEN.....	61
2.7.1.1 - Relatório de Análise de Segurança - Aprovação Prévia.....	61
2.7.1.2 - Relatório de Análise de Segurança - Licença de Construção.....	62
2.7.1.3 - Relatório de Análise de Segurança - Autorização para Operação.....	63
2.7.1.4 - Plano de Transporte - Autorização para o Transporte de Material Radioativo.....	64
2.7.2 - Licenciamento do Irradiador Multipropósito junto à CETESB.....	65
2.7.3 - Licenciamento Ambiental para o Transporte de Material Radioativo junto ao IBAMA.....	67
2.8 - APLICATIVO PARA SIMULAÇÃO DE DOSES EM SISTEMAS DE IRRADIAÇÃO GAMA – <i>CADGAMMA</i>	69
2.9 - PROGRAMA DE VALIDAÇÃO E CONTROLE DE ROTINA DO PROCESSO.....	71
2.9.1 - Qualificação da Instalação Radiativa.....	73
2.9.1.1 - Documentação dos Equipamentos.....	73
2.9.1.2 - Testes dos Equipamentos.....	74
2.9.1.3 - Calibração dos Equipamentos.....	74
2.9.1.4 - Mapeamento de Dose do Irradiador.....	75
2.9.2 - Qualificação do Processo.....	75
2.9.2.1 - Determinação da Configuração de Carregamento do Produto.....	76
2.9.2.2 - Mapeamento de Dose no Produto.....	76
2.10 - ANÁLISE ECONÔMICA DOS IRRADIADORES GAMA DE COBALTO-60.....	77
2.10.1 - Custos de Investimento Inicial.....	77
2.10.2 - Custos Operacionais Fixos e Variáveis.....	78
2.10.2.1 - Custos Fixos.....	78
2.10.2.2 - Custos Variáveis.....	79

	Página
3 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	80
3.1 - CARACTERÍSTICAS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP.....	81
3.2 - AQUISIÇÃO, TRANSPORTE E INSPEÇÃO DAS FONTES SELADAS DE COBALTO-60.....	95
3.3 - PLANEJAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES SELADAS DE COBALTO-60 NOS RACKS.....	97
3.4 - PROGRAMA DE QUALIFICAÇÃO DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO.....	100
3.5 - MAPEAMENTO DE DOSE NOS PRODUTOS.....	101
3.5.1 - Tampas e Mangueiras Poliméricas	101
3.5.2 - Ração Animal.....	111
3.6 - FATOR DE EFICIÊNCIA DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO.....	113
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	115
4.1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS FINAIS DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO.....	115
4.2 - CERTIFICAÇÕES E LICENCIAMENTOS JUNTO À CNEN, CETESB E IBAMA.....	117
4.3 - RESULTADO DOS TESTES DE ESFREGAÇO E DE FUGA (FLUSHING TEST).....	117
4.4 - DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES SELADAS DE COBALTO-60 NOS RACKS.....	117
4.5 - SISTEMAS DE CONTROLE DE PROCESSO E SEGURANÇA DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO.....	120
4.6 - PROGRAMA DE QUALIFICAÇÃO DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO.....	124
4.6.1 - Mapeamento de Dose nos Produtos para Geradores de ^{99m} Tc...	124
4.6.2 - Mapeamento de Dose nos Produtos para Biotério.....	129
4.7 - ANÁLISE DOS FATORES DE UNIFORMIDADE DE DOSE E EFICIÊNCIA.....	134

	Página
4.8 - ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP.....	140
4.9 - DESEMPENHO ANUAL DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO DESENVOLVIDO PARA O IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP.....	145
4.9.1 - Produtos Médicos, Cirúrgicos e Biológicos.....	145
4.9.2 - Produtos para Biotério (Ração Animal).....	145
5 - CONCLUSÕES.....	146
6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	149
6.1 - Programa de Qualificação do Irradiador Multipropósito do IPEN-CNEN/SP.....	149
6.2 - Instalação Radiativa para Manipulação de Fontes Seladas de Atividade Alta.....	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151
ANEXOS.....	156
ANEXO 1 - FATORES DE DECAIMENTO RADIOATIVO PARA O COBALTO-60 (FDR ⁶⁰ _{Co}), EM DIAS, MESES E ANOS.....	156
ANEXO 2 - PLANTA DIMENSIONAL DO PRÉDIO DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO (DESENHO CTR – 0101/0001-I-3.08).....	158

LISTA DE TABELAS

Número	Título	Página
1	Irradiadores gama instalados no País, com capacidade entre 60 kCi a 3 MCi em ^{60}Co .	7
2	Eventos iniciadores com os possíveis modos de falha e as características adotadas e/ou incorporadas ao projeto, para evitarem ou atenuarem a exposição acidental dos trabalhadores e indivíduos do público, às fontes radioativas de ^{60}Co do sistema de irradiação, do irradiador multipropósito.	40
3	Eventos iniciadores com os possíveis modos de falha e as características adotadas e/ou incorporadas ao projeto, para evitarem ou atenuarem a liberação acidental de material radioativo na câmara de irradiação e meio ambiente, a qual pode levar à exposição dos trabalhadores e indivíduos do público.	53
4	Dosímetros de rotina em polimetilmetacrilato (PMMA), utilizados em processamento por radiação na indústria ⁵⁰ .	101
5	Valores das doses absorvidas (D) e absorbâncias específicas (K), medidas a 640 nm, nos dosímetros de rotina tipo <i>Red Perspex</i> 4034 (lote GD), utilizados na construção das curvas de calibração.	108
6	Informações técnicas e distribuição das fontes seladas de ^{60}Co , em 6 magazines, dos 2 <i>racks</i> de fontes do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.	118
7	Resultado do mapeamento de dose nos produtos dos geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$), para os dosímetros de rotina A00 a B43, tipo <i>Red Perspex</i> 4034 (lote GD).	125
8	Resultado do mapeamento de dose nos produtos dos geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$), para os dosímetros de rotina C00 a D43 e de referência R1 a R3.	126
9	Resultado do mapeamento de dose nos produtos para biotério (ração animal), com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3), para os dosímetros de rotina A00 a B43, tipo <i>Red Perspex</i> 4034 (lote GD).	130
10	Resultado do mapeamento de dose nos produtos para biotério (ração animal), com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3), para os dosímetros de rotina C00 a D43 e de referência R1 a R3.	131

Número	Título	Página
11	Fatores de uniformidade de dose (f) e eficiência (F) do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e dos irradiadores comerciais da <i>MDS Nordion Ion Technologies</i> , para densidades aparentes de 0,09 e 0,49 g/cm ³ ¹⁵ .	134
12	Características técnicas do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e dos irradiadores comerciais da <i>MDS Nordion Ion Technologies</i> (<i>Pallet Irradiator</i> TM , <i>JS-9500</i> TM , <i>JS-9600</i> TM e <i>JS-10000</i> TM) ¹⁵ .	136
13	Fatores de uniformidade de dose (f) e eficiência (F) do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e dos irradiadores compactos comerciais da <i>MDS Nordion Ion Technologies</i> (<i>BREVION</i> TM), <i>SteriGenics International, Inc.</i> (<i>MICROCELL</i> TM e <i>MINICELL</i> TM) e <i>Picowave Technology</i> (<i>BP1 Pallet Irradiator</i> TM), para densidades aparentes de 0,09 e 0,49 g/cm ³ ^{6,8,15-17} .	137
14	Características técnicas do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e dos irradiadores compactos comerciais da <i>MDS Nordion Ion Technologies</i> (<i>BREVION</i> TM), <i>SteriGenics International, Inc.</i> (<i>MICROCELL</i> TM e <i>MINICELL</i> TM) e <i>Picowave Technology</i> (<i>BP1 Pallet Irradiator</i> TM) ^{6,8,15-17} .	139
15	Custos de investimento inicial para instalação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto no IPEN-CNEN/SP, com financiamento FAPESP.	141
16	Custos operacionais fixos e variáveis do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP operando, futuramente, 8.000 horas/ano com atividade de 18,5 PBq (0,5 MCi).	143

LISTA DE FIGURAS

Número	Título	Página
1	Penetração e interação das radiações com a matéria: (a) raios gama provenientes de radioisótopos, (b) feixes de elétrons e (c) raios X, provenientes de aceleradores industriais de elétrons.	1
2	Interação da radiação gama com a eletrosfera de um átomo, por Efeito Compton.	10
3	Produção de raios X por Efeito <i>Bremsstrahlung</i> .	11
4	Fontes radioativas tipo C-188, fabricadas pela empresa canadense <i>MDS Nordion Ion Technologies</i> ¹⁵ .	12
5	Montagem esquemática do <i>rack</i> de fontes radioativas dos irradiadores gama industriais, a partir dos cilindros sinterizados de ⁵⁹ Co (99,98%), cápsulas de <i>Zircaloy</i> com ⁶⁰ Co, lápis de ⁶⁰ Co e magazines ²⁶ .	13
6	Esquema do decaimento radioativo para o cobalto-60 ²⁶ .	14
7	Irradiador gama de cobalto-60 tipo <i>Gammacell</i> , categoria I pela AIEA ¹² .	16
8	Irradiador gama de cobalto-60 tipo Panorâmico, categoria II pela AIEA ¹² .	17
9	Irradiador gama de cobalto-60, categoria III pela AIEA ¹² .	18
10	Irradiador gama de cobalto-60, categoria IV pela AIEA ¹² .	19
11	Formas de armazenamento das fontes radioativas, nas plantas industriais de irradiação gama: (a) seca (<i>dry</i>) e (b) úmida (<i>wet</i>) ⁹ .	21
12	Geometria de irradiação tipo <i>product overlap source</i> , no qual a altura final dos produtos em caixas metálicas ou <i>pallets</i> , no sistema de transporte, ultrapassa a altura dos <i>racks</i> de fontes de cobalto-60 ²⁶ .	22
13	Geometria de irradiação tipo <i>source overlap product</i> , no qual a altura final dos produtos em caixas metálicas ou <i>pallets</i> , no sistema de transporte é inferior à altura dos <i>racks</i> de fontes de cobalto-60 ²⁶ .	23
14	Rotas de passagens dos produtos pelas fontes radioativas de cobalto-60: (a) quatro passes e (b) oito passes ⁹ .	24

Número	Título	Página
15	Classificação dos sistemas de transporte dos produtos, nos irradiadores gama industriais: (a) <i>tote box</i> , (b) <i>carrier</i> e (c) <i>pallet</i> ^{9,29} .	26
16	<i>BREVION™ – MDS Nordion Ion Technologies</i> ¹⁵ .	28
17	<i>MICROCELL™ – SteriGenics International Inc.</i> ¹⁶ .	29
18	<i>MINICELL™ – SteriGenics International Inc.</i> ¹⁶ .	30
19	<i>BP1 Pallet Irradiator™ – Picowave Technology</i> ¹⁷ .	32
20	Movimentação esquemática das quatorze caixas em alumínio no sistema de transporte dos produtos, em relação aos dois <i>racks</i> de fontes radioativas, na câmara de irradiação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP.	34
21	Desenho em perspectiva do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com sistema de irradiação desenvolvido no IPEN-CNEN/SP.	35
22	Árvore de falhas para exposição acidental dos trabalhadores e indivíduos do público às fontes radioativas de cobalto-60, as quais fazem parte do sistema de irradiação, do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP ^{29,36} .	39
23	Árvore de falhas para liberação acidental de material radioativo na câmara de irradiação e meio ambiente, que pode levar à exposição dos trabalhadores e indivíduos do público, no irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP ^{29,36} .	52
24	Esquema simplificado do cálculo da dose em um ponto em estudo, somando-se as contribuições das transmissões dos raios gama, da fração de um lápis de ⁶⁰ Co e as atenuações provocadas pelos materiais existentes no percurso.	70
25	Programa de Validação e Controle de Rotina do Processo de Radioesterilização, em conformidade com a Norma Internacional AAMI/ISO 11137 ⁴³ .	72
26	Construção da piscina em concreto armado, para armazenamento das fontes radioativas de cobalto-60, no irradiador multipropósito: (a) escavação da piscina e (b) posicionamento do <i>liner</i> .	82
27	Construção das paredes e lajes em concreto, da câmara de irradiação, do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP: (a) armações e (b) formas permanentes em aço carbono.	83

Número	Título	Página
28	Construção do galpão de armazenamento dos produtos: (a) instalação das colunas pré-moldadas em concreto e das vigas em aço carbono, para confecção do telhado e (b) paredes em alvenaria e portas em aço carbono.	84
29	Sala de máquinas: (a) unidade hidráulica e deionizador de água e (b) compressor, reservatório de ar-comprimido e sistema de exaustão do gás ozônio.	85
30	Controle e tratamento de água da piscina, do irradiador multipropósito: (a) sistema de deionização e (b) tanque comunicante, com duas chaves de nível e quatro níveis de sinais eletro-eletrônicos.	86
31	Movimentação do sistema de transporte dos produtos, na câmara de irradiação, do irradiador multipropósito: (a) cilindros e válvulas hidráulicas, instalados na parte superior externa e (b) sistema de proteção e anticolisão.	87
32	Mecanismo de exposição dos dois <i>racks</i> de fontes, do irradiador multipropósito: (a) cilindros e válvulas pneumático, instalados na parte superior externa e (b) <i>racks</i> de fontes na posição de segurança, no fundo da piscina.	88
33	Sistema de combate a incêndio tipo dilúvio, instalado na câmara de irradiação, do irradiador multipropósito: (a) <i>sprinklers</i> tipo <i>spray</i> e (b) manômetro e sensor eletrônico de pressão d'água na tubulação.	89
34	Detector de sismo e sensores de radiação, instalados no irradiador multipropósito: (a) detectores de radiação Geiger-Müller e câmara de ionização, na câmara de irradiação e (b) monitores de radiação <i>EG&G Berthold</i> , modelo LB-111 e detector de sismo <i>Sprengnether Instruments Inc.</i> , modelo SSS-3, na sala de controle.	90
35	Porta de concreto giratória, responsável pela entrada e saída dos produtos na câmara de irradiação, do irradiador multipropósito: (a) compartimento para alojar as caixas em alumínio e (b) integração com a unidade externa, do sistema de transporte dos produtos.	91
36	Porta de concreto deslizante, para montagem e manutenção da instalação e do sistema de transporte dos produtos: (a) acoplagem perfeita na porta giratória e (b) detalhe dos três <i>microswitches</i> elétricos e uma válvula pneumática, do sistema de segurança e intertravamento.	92

Número	Título	Página
37	Sistemas de controle de processo (transporte), segurança e intertravamento, do irradiador multipropósito: (a) microcomputadores instalados na sala de controle, responsáveis pelo acompanhamento dos sistemas e (b) painel eletro-eletrônico do sistema de segurança e intertravamento (lógica de relês).	93
38	Fonte de ^{60}Co modelo C-188, duplamente encapsulada em <i>Zircaloy</i> (cápsulas internas) e aço inoxidável AISI 316L (cápsula externa), soldada pelo processo TIG (<i>Tungsten Inert Gas</i>), fabricada pela <i>MDS Nordion Ion Technologies</i> .	95
39	Embalado de transporte tipo B, modelo F-168 da <i>MDS Nordion Ion Technologies</i> e contêiner marítimo de 6,1 m (20 pés) de comprimento, utilizado no transporte das fontes seladas de ^{60}Co .	96
40	Testes de esfregaço e fuga (<i>flushing test</i>), realizados no embalado de transporte tipo B, modelo F-168 e nas fontes seladas de ^{60}Co , respectivamente.	97
41	Transferência do embalado de transporte tipo B, modelo F-168, com as 13 fontes seladas de ^{60}Co : (a) içado pelo guindaste do contêiner de 6,1 m (20 pés) de comprimento e (b) posicionado no fundo da piscina do irradiador multipropósito.	99
42	Instalação das fontes radioativas de ^{60}Co , nos magazines dos <i>racks</i> de fontes, do irradiador multipropósito: (a) gaiola posicionada sobre a mesa, a 5 m de profundidade na piscina e (b) magazines instalados nos <i>racks</i> , com as fontes seladas de ^{60}Co , modelo C-188.	99
43	Ferramentas reguláveis, especialmente confeccionadas para o manuseio e instalação das fontes seladas de ^{60}Co , nos magazines e nos <i>racks</i> de fontes.	100
44	Posicionamento dos 20 dosímetros de rotina tipo <i>Red Perspex 4034</i> (lote GD) por plano, utilizados no mapeamento de dose nos produtos (tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$).	102
45	Desenho esquemático de distribuição dos 80 dosímetros de rotina tipo <i>Red Perspex 4034</i> (lote GD), posicionados em 4 planos distintos (0, 1, 2 e 3), no mapeamento de dose nos produtos. O dosímetro posicionado no vértice superior esquerdo é o A43.	103
46	Posicionamento dos dosímetros de referência tipo <i>Red Perspex 4034</i> (lote GD), nas regiões centrais das faces externas, da caixa em alumínio monitorada e caixas adjacentes.	103

Número	Título	Página
47	Balança digital industrial, marca DIGIMED, modelo KN1-P12/12k, com capacidade máxima de 1.000 kg, utilizada da determinação das densidades aparentes dos produtos.	104
48	Preenchimento do sistema de transporte pelas 14 caixas em alumínio, em dois níveis, na câmara de irradiação do irradiador multipropósito, sendo 8 caixas com as tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc e 6 caixas com os sacos de 60 litros de maravalha para biotério.	105
49	Equipamentos digitais utilizados na leitura dos dosímetros <i>Red Perspex</i> 4034 (lote GD): (a) micrômetro para medidas de espessura e (b) espectrofotômetro para obtenção das absorbâncias.	106
50	Curva de calibração de dose (D), dos dosímetros do tipo <i>Red Perspex</i> 4034 (lote GD), na qual as absorbâncias específicas (K) foram medidas a 640 nm, após o término da irradiação, no LDPI/CTR.	109
51	Curva de calibração de dose (D), dos dosímetros do tipo <i>Red Perspex</i> 4034 (lote GD), na qual as absorbâncias específicas (K) foram medidas a 640 nm, 4 horas após o término da irradiação, no LDPI/CTR.	110
52	Posicionamento dos 20 dosímetros de rotina tipo <i>Red Perspex</i> 4034 (lote GD) por plano, utilizados no mapeamento de dose nos produtos (ração animal para biotério).	112
53	Desenho esquemático de distribuição dos 80 dosímetros de rotina tipo <i>Red Perspex</i> 4034 (lote GD), posicionados em 4 planos distintos (0, 1, 2 e 3), no mapeamento de dose nos produtos. O dosímetro posicionado no vértice superior esquerdo é o A43.	112
54	Irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com sistema de irradiação projetado, construído e implantado no IPEN-CNEN/SP, com tecnologia inteiramente nacional e apoio financeiro da FAPESP.	116
55	Distribuição das fontes seladas de ^{60}Co nos 6 magazines, dos 2 <i>racks</i> de fontes do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP, por meio do aplicativo <i>Cadgamma</i> ³⁸ .	119
56	Fontes seladas de ^{60}Co instaladas nos 6 magazines dos 2 <i>racks</i> do Irradiador Multipropósito, no total de 3.407,7 TBq (92.099 Ci, em 16/11/04).	120
57	Tela do sistema de controle de processo (transporte dos produtos) no microcomputador do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.	121

Número	Título	Página
58	Tela do sistema de segurança e intertravamento no microcomputador, em início de operação e condições gerais do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.	122
59	Tela do sistema de segurança e intertravamento no microcomputador, indicando que a porta deslizante da câmara de irradiação está fechada e o irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP, está habilitado para início de operação.	122
60	Tela do sistema de segurança e intertravamento no microcomputador, com a listagem dos alarmes do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.	123
61	Tela do sistema de segurança e intertravamento no microcomputador, com as condições gerais do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.	124
62	Distribuição tridimensional das doses (kGy) nos produtos dos geradores de ^{99m}Tc , com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$) e fator de uniformidade de dose de 1,33. Os valores para as doses máxima, mínima e de referência encontram-se nas posições D22 (25,1 kGy), C40 (18,9 kGy) e R2 (29,0 kGy), respectivamente.	128
63	Distribuição tridimensional das doses (kGy) nos produtos para biotério (ração animal), com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3) e fator de uniformidade de dose de 2,08. Os valores para as doses máxima, mínima e de referência encontram-se nas posições D33 (16,2 kGy), C12 (7,8 kGy) e R2 (19,0 kGy), respectivamente.	133

1 - INTRODUÇÃO

Os raios gama, os feixes de elétrons e os raios X são radiações ionizantes, efetivamente utilizadas no processamento industrial de materiais. A diferença entre essas três tecnologias de processamento está na forma como a radiação primária é transferida aos produtos. Os raios gama e raios X são radiações eletromagnéticas, com propriedades básicas de absorção representadas pela diminuição exponencial nas intensidades das radiações que, ao passarem pela matéria, propiciam maiores poderes de penetração, quando comparados aos feixes de elétrons, mostrados na Figura 1¹.

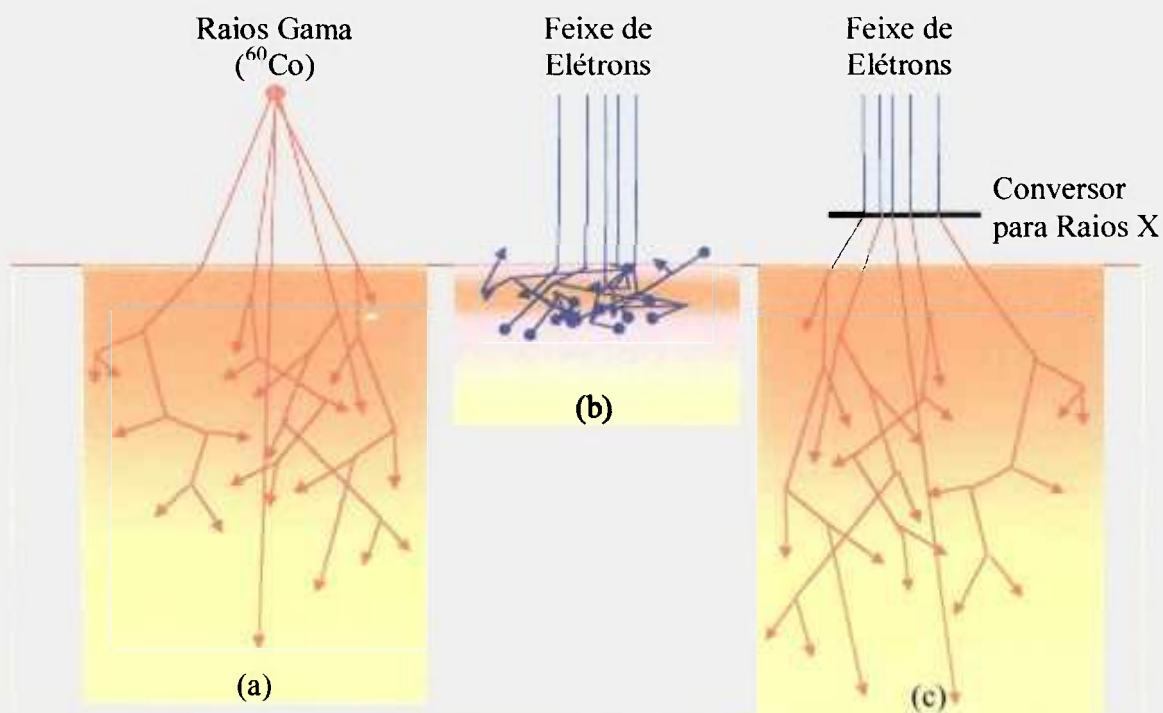


FIGURA 1 - Penetração e interação das radiações com a matéria: (a) raios gama provenientes dos radioisótopos, (b) feixe de elétrons e (c) raios X, provenientes dos aceleradores industriais de elétrons.

Em todos os tipos de radiação ionizante, a penetração é inversamente proporcional à densidade dos materiais processados. Assim, as dimensões das embalagens e as densidades dos produtos são fatores determinantes nas aplicações dos raios gama e raios X versus feixes de elétrons. Os raios gama e raios X têm grande poder de penetração, mas uma taxa de dose baixa (10 e 960 kGy/h, respectivamente), ideais no processamento de produtos diversificados, espessos e de alta densidade. Os feixes de elétrons têm um poder de penetração menor, mas uma taxa de dose alta (72 MGy/h, acelerador com energia de 10 MeV e potência de 50 kW), propiciando uma capacidade elevada de processamento dos produtos bem definidos ou de grandes superfícies, com espessuras finas (cura por radiação ionizante). Os feixes de elétrons com energia de 10 MeV penetram 5,0 cm em água (densidade 1,0 g/cm³), aproximadamente. Já os raios gama, provenientes do ⁶⁰Co, com energia média de 1,25 MeV e os raios X, com energia de 7,50 MeV têm poder de penetração superior a 50 cm, nesse mesmo meio ^{1,2}.

As tecnologias de processamento de materiais por raios gama e feixes de elétrons estão mundialmente consolidadas. Existem mais de 160 irradiadores gama industriais e 1.300 aceleradores industriais de elétrons em operação no mundo. Em termos de capacidade de processamento, um acelerador industrial de elétrons de 45 kW equivale a um irradiador gama industrial de 111 PBq (3 MCi) em ⁶⁰Co. Um novo avanço na área de processamento por radiação eletromagnética (alto poder de penetração), surge com as fontes de conversão elétrons/raios X, baseadas em Aceleradores Industriais de Elétrons de alta potência ^{3,4}.

Atualmente, a tendência mundial na construção de irradiadores industriais de cobalto-60 segue duas linhas: a de irradiadores de grande porte, com capacidade desde 111 PBq (3 MCi) até 444 PBq (12 MCi), e de irradiadores compactos ou dedicados, com capacidade até 74 PBq (2 MCi). Os irradiadores de grande porte representam mais de 20% dos irradiadores gama em operação. Nas plantas de irradiação, 86% utilizam *racks* de fontes retangulares e 90% armazenam as fontes de ⁶⁰Co em piscina, com água deionizada ⁵⁻⁸.

A crescente demanda no processamento de materiais por radiação forçou os fabricantes de irradiadores e as empresas prestadoras de serviços de irradiação a reavaliarem os tradicionais sistemas de irradiação disponíveis no mercado internacional. Surgiram então os irradiadores compactos, desenvolvidos com o propósito de serem instalados de forma integrada às unidades produtoras, com custos de investimento inicial e operacionais (fixos e variáveis) reduzidos, tendo como principal característica o processamento em batelada (*batch*)⁵⁻⁸.

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, de uma instalação radiativa^{5,9}:

- definir a capacidade da planta;
- calcular o desempenho da instalação radiativa, o qual é função da densidade, das dimensões do produto e da geometria do *rack* de fontes e dos produtos – custo por quilograma ou metro cúbico de produto processado;
- 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 dos produtos (*carrier, pallet* ou *tote box*).

As grandes vantagens tecnológicas do processamento por radiação, na esterilização de produtos médicos e farmacêuticos, comparadas com tecnologias alternativas, tais como óxido de etileno (EtO) e autoclavagem (vapor d'água) são: processo realizado à temperatura ambiente, provoca um aumento desprezível na temperatura do produto em tratamento, não deixa resíduos, não libera agentes poluentes, os produtos podem ser processados na embalagem final, tem custo competitivo elevado, aplicável em diversos materiais compatíveis com a radiação ionizante e não tornam os produtos radioativos^{10,11}.

1.1 - OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo o “Desenvolvimento do Sistema de Irradiação em um Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto”, no Centro de Tecnologia das Radiações – CTR, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP, com capacidade máxima certificada para 37 PBq (1 MCi), em conformidade com as normas *IAEA Safety Series n. 107*, CNEN-NE-3.01 e CNEN-NE-6.02¹²⁻¹⁴.

O trabalho fez parte do **Projeto da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, nº 1997/07136-0: Construção e Implantação de Irradiador Industrial Multipropósito de Cobalto-60**, coordenado pelo Dr. Leonardo Gondim de Andrade e Silva (orientador desta tese), com período de execução de 01/01/2001 a 30/11/2005. A gerência e a responsabilidade pela implementação do irradiador multipropósito foi do Dr. Paulo Roberto Rela (co-orientador desta tese).

1.2 - CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

O desenvolvimento do sistema de irradiação e do próprio irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP foi requisito fundamental para se viabilizar as aplicações das radiações em processos industriais, contribuindo-se para a atualização tecnológica no País e a otimização dos processos produtivos, aumentando-se a competitividade dos produtos nacionais. As principais contribuições deste trabalho são:

- desenvolver o sistema de irradiação e implantar no País um irradiador gama multipropósito tipo compacto, para implementação de tecnologias avançadas que utilizam a radiação ionizante como parte integrante dos processos de produção;
- desenvolver no País tecnologia de processamento automático, integrado com sistema de segurança e intertravamento, para plantas que operam com elevado nível de radioatividade;

- transferir tecnologia ou dar suporte técnico à comunidade industrial e entidades que atuam na área de saúde e alimentação, para implantação de unidades de irradiação compactas e de grande porte, atendendo às necessidades emergentes do País;
- desenvolver e validar sistemas de dosimetria e códigos computacionais de mapeamento de altas taxas de doses de radiação ionizante, para plantas de irradiação e
- permitir aos profissionais da comunidade científica, que atuam direta ou indiretamente na pesquisa de novos produtos e processos utilizarem a radiação ionizante, na indústria, saúde, agricultura e meio ambiente.

1.3 - ORIGINALIDADE DO TRABALHO

A originalidade do trabalho está baseada no projeto de engenharia de um sistema de irradiação, no qual não existem pesquisas, publicações ou irradiadores multipropósitos de cobalto-60 tipo compacto construídos ou em construção, os quais utilizam ^{5-8, 15-17}:

- sistema de irradiação tipo *product overlap source*, contínuo, duplo empilhamento de caixas, sendo que cada nível de caixa movimenta-se na mesma direção (horizontal), mas em sentidos contrários. O sistema de transporte é do tipo *tote box*, fontes radioativas seladas de cobalto-60 armazenadas em piscina, utilizando a radiação gama para processar continuamente os produtos e/ou matérias-primas, proporcionando uma melhor uniformidade de dose e eficiência do irradiador e
- sistema de porta de concreto giratória, para entrada e saída dos produtos na câmara de irradiação de forma contínua, sem a necessidade do recolhimento das fontes radioativas e de se abrir o irradiador para o carregamento dos produtos a serem beneficiados, eliminando-se o tempo morto considerável, sem irradiar produtos, característico do processo em batelada. A entrada e saída desses produtos é realizada por uma única porta de concreto giratória, possibilitando a redução no tamanho da câmara de irradiação e a ausência dos labirintos internos, reduzindo-se os custos iniciais da instalação, em função do baixo consumo de concreto utilizado na blindagem radiológica.

Tratou-se de um desenvolvimento inteiramente nacional e inédito, o qual adota os mesmos critérios rigorosos de projeto e de sistema de segurança e intertravamento do mais tradicional fabricante de irradiadores do mundo, a *MDS Nordion Ion Technologies*, no Canadá. O irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com o sistema de irradiação desenvolvido neste trabalho, apresenta as seguintes características técnicas, operacionais e avanços tecnológicos ^{12, 18-22}:

- sistema de controle de processo independente do sistema de segurança e intertravamento, ambos monitorados por Controladores Lógicos Programáveis independentes, aumentando-se a segurança de operação da instalação;
- sistema de armazenamento das fontes radioativas constituído por uma piscina de concreto, revestida internamente em aço inoxidável AISI 304 (*liner*), resistente à corrosão. Esse sistema forma uma dupla barreira de contenção, tornando a instalação mais segura, com relação aos abalos sísmicos;
- sistema de segurança eletro-mecânico redundante de indicação de falhas, ações de bloqueio de operação e recolhimento dos *racks* de fontes para a posição de segurança, até que as irregularidades sejam sanadas;
- sistema de proteção redundante, contra entrada de pessoas não autorizadas, na câmara de irradiação;
- sistemas de controle de processo, segurança e intertravamento dotados de unidades independentes de alimentação de energia elétrica, tipo *no-break* e
- sistema de transporte dos produtos acionado por um sistema hidráulico, com a utilização de cabos em aço para a transmissão do movimento aos produtos a serem processados. Os cilindros hidráulicos estão posicionados na parte superior externa da câmara de irradiação, diminuindo-se a necessidade de manutenções corretivas e preventivas, provenientes da degradação dos componentes poliméricos e das borrachas presentes nesses cilindros.

1.4 – IRRADIADORES GAMA NO PAÍS

Atualmente, existem sete irradiadores gama instalados no País, com capacidade máxima entre 60 kCi a 3 MCi em ⁶⁰Co, dos quais cinco fabricados pela *MDS Nordion Ion*

Technologies, apresentados na Tabela 1. O irradiador gama industrial da Companhia Brasileira de Esterilização - CBE e o irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, no qual desenvolveu-se e implantou-se o sistema de irradiação proposto neste trabalho foram projetados e construídos com tecnologia inteiramente nacional, pelos profissionais do “Grupo de Projeto, Construção e Implantação de Irradiadores de Grande Porte, Aceleradores Industriais de Elétrons e Sistemas de Irradiação”, do IPEN-CNEN/SP.

TABELA 1 – Irradiadores gama instalados no País, com capacidade máxima entre 60 kCi a 3 MCi em ^{60}Co .

Empresa / Instituição	Sistema de Transporte do Irradiador / Modelo	Capacidade da Planta de Irradiação (kCi)	Localização no País	Ano da Instalação
Johnson & Johnson	⁽¹⁾ <i>Tote box</i> (JS-6500)	1.500	São José dos Campos/SP	1978
Empresa Brasileira de Radiações - EMBRARAD	⁽¹⁾ <i>Tote box</i> (JS-7500)	1.500	Cotia/SP	1981
	⁽¹⁾ <i>Tote box</i> (JS-9500)	3.000		1999
Companhia Brasileira de Esterilização - CBE	⁽²⁾ <i>Pallet</i>	3.000	Jarinu/SP	1999
Tech Ion	⁽¹⁾ <i>Pallet</i> (IR-176)	3.000	Manaus/AM	2000
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN-CNEN/MG	⁽¹⁾ Panorâmico	60	Belo Horizonte/MG	2002
Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP	⁽¹⁾ <i>Conveyor</i> (IR-198)	3.000	Piracicaba/SP	⁽³⁾ 2002
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP	⁽²⁾ <i>Tote box</i> (Multipropósito)	2.000	São Paulo/SP	2004

⁽¹⁾ Irradiador *MDS Nordion Ion Technologies* - Canadá;

- ⁽²⁾ Projeto, construção e implantação, com tecnologia inteiramente nacional e
- ⁽³⁾ Aquisição do irradiador, obtenção da “Aprovação Prévia” junto à CNEN, aprovação do “Memorial de Caracterização do Empreendimento” e da “Solicitação de Certificado de Dispensa de Instalação”, junto à Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. Processo em análise no Ministério Público Federal, para início da construção e implantação.

Os irradiadores gama industriais das empresas EMBRARAD e CBE são utilizados nas prestações de serviços de irradiação, de produtos e matérias-primas, para o mercado nacional e exportação. A Johnson & Johnson utiliza seu irradiador gama, principalmente, para esterilização de agulhas e suturas cirúrgicas, entre outros produtos, no próprio complexo fabril. O irradiador gama da empresa Tech Ion, utilizado nas prestações de serviços de irradiação, encontra-se desativado no momento.

O porte do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com o sistema de irradiação desenvolvido neste trabalho permite o processamento de lotes adequados para estudos de otimização da produção em escala industrial, além do treinamento de coordenadores de operação e manutenção, operadores e supervisores de radioproteção. Assim, a comunidade científica e empresas prestadoras de serviços de irradiação têm a possibilidade de irradiar quantidades ou volumes que eram inviáveis nos irradiadores de pequeno porte (Panorâmico e *Gammacell*) disponíveis nas instalações do Centro de Tecnologia das Radiações – CTR, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - FÍSICA DAS RADIAÇÕES

A radiação gama emitida por radioisótopos e os feixes de elétrons produzidos pelos aceleradores industriais transferem suas energias, por meio de interações com os elétrons das órbitas dos átomos que constituem os produtos. Essas interações, provocam a excitação desses elétrons para níveis de energia superiores ou os arrancam de suas órbitas (ionização), com energia suficiente para interagirem com elétrons orbitais de outros átomos. Os produtos da ionização (íons, elétrons secundários, átomos e moléculas excitadas) são responsáveis pelos efeitos físicos, químicos e biológicos nos materiais irradiados.

Os três principais efeitos responsáveis pela interação da radiação gama com a matéria, provenientes de radioisótopos são: Fotoelétrico, Compton e Produção de Pares. No processamento industrial dos produtos por raios gama, prevalece o Efeito Compton, mostrado na Figura 2 ^{23,24}.

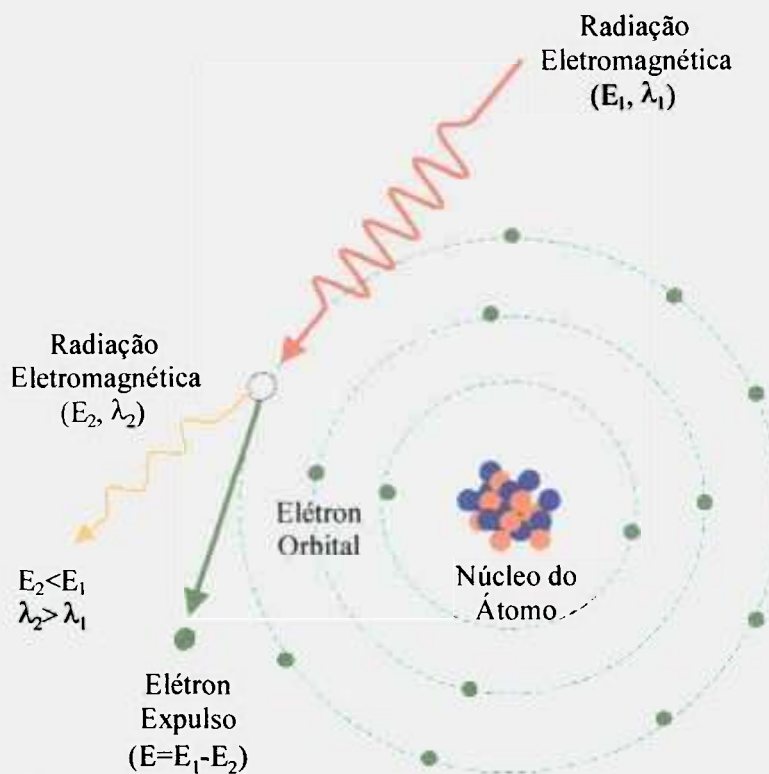


FIGURA 2 – Interação da radiação gama com a eletrosfera de um átomo, por Efeito Compton.

O raio X é uma radiação eletromagnética produzida por meio de fontes de conversão elétrons/raios X, as quais utilizam elementos químicos de elevado número atômico (tálio ou tungstênio), baseadas em aceleradores industriais de elétrons de alta potência. Os novos alvos para conversão de raios X, utilizam estruturas multicamadas, nas quais estes elementos químicos são depositados em substratos de baixo número atômico, alta condutividade e estabilidade térmica (alumínio ou cobre). Estes raios X de alta energia interagem com a matéria, do mesmo modo que os raios gama.

Os raios X são produzidos quando os elétrons incidentes passam próximo ao núcleo dos átomos de elevado número atômico, têm suas trajetórias desviadas, emitindo-se fótons. Esse efeito, conhecido como *Bremsstrahlung* ou radiação de freamento, é mostrado na Figura 3²⁵.

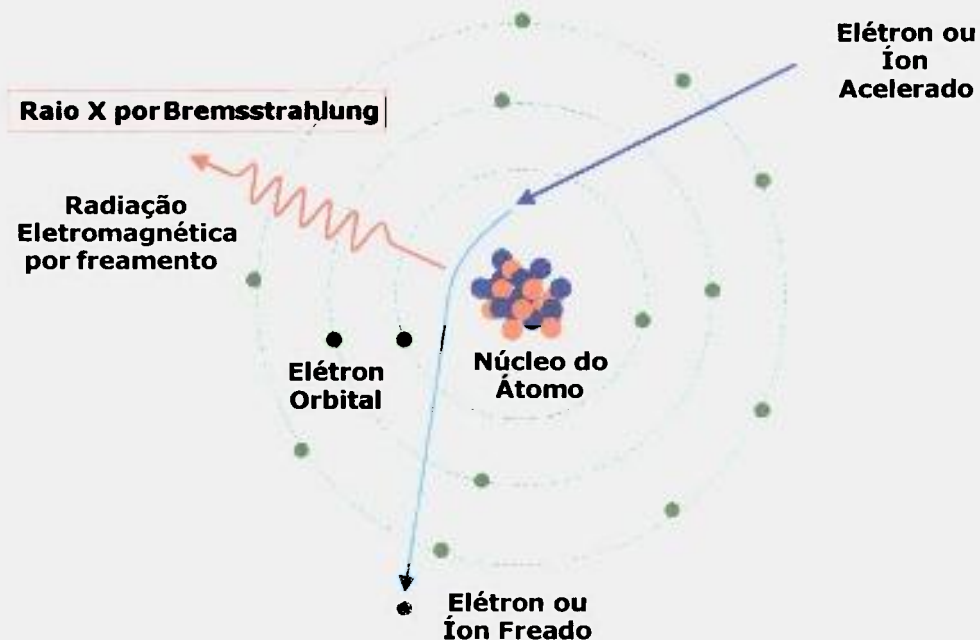


FIGURA 3 – Produção de raios X por Efeito *Bremsstrahlung*.

Os raios gama, os feixes de elétrons e os raios X asseguram o tratamento dos produtos das mais variadas formas e constituições. As embalagens finais e/ou matérias-primas são expostas às radiações ionizantes em um ambiente especialmente projetado onde, submetidas a um fluxo controlado, recebem uma quantidade de radiação por unidade de massa, conhecida como dose absorvida, expressa pela equação 2.1:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.1)$$

na qual,

- D = dose absorvida (J/kg ou Gray, 1 Gy = 100 rad);
- dE = quantidade de energia (J) e
- dm = quantidade de massa (kg).

2.2 – FONTES SELADAS INDUSTRIAIS DE COBALTO-60

As fontes radioativas industriais de cobalto-60 ($^{60}_{27}\text{Co}$), tipos C-188 e RSL-2089, das empresas canadense *MDS Nordion Ion Technologies* e inglesa *Reviss-Puridec Irradiation Technologies*, respectivamente, são produzidas a partir do cobalto-59 metálico, disponível na crosta terrestre (0,001%), com pureza de 99,98%, recoberto com níquel e encapsulado em *Zircaloy*. As cápsulas soldadas pelo processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), as quais contém pequenos cilindros sinterizados (*pellets*) de cobalto-59 são ativadas em reator nuclear tipo CANDU. Após o período de 18 a 25 meses de irradiação (função do fluxo neutrônico do reator), obtém-se o cobalto-60, com atividade específica de 4 TBq/g (120 Ci/g), necessária nos irradiadores industriais para o processamento por radiação gama. As cápsulas de cobalto-60 são então duplamente encapsulas em aço inoxidável AISI 316L, resistente à corrosão, em conformidade com as Normas ISO 2919 e ISO 9978, conforme é mostrado na Figura 4^{15, 26-28}.

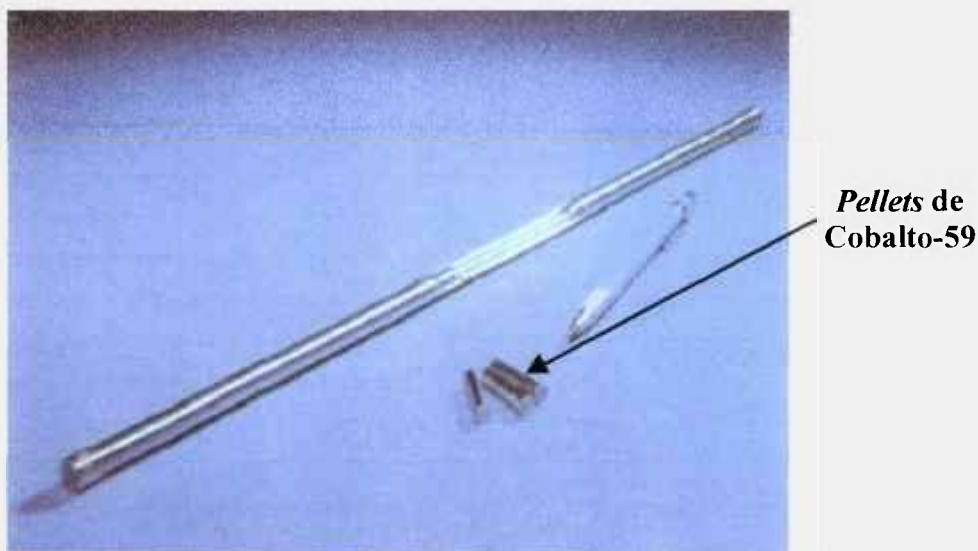


FIGURA 4 - Fontes radioativas tipo C-188, fabricadas pela empresa canadense *MDS Nordion Ion Technologies*¹⁵.

Os lápis de ^{60}Co e lápis frios em aço inoxidável AISI 316L, ou seja, sem ^{60}Co (*dummies*), são distribuídos de forma planejada, em posições predeterminadas nos magazines dos *racks* de fontes radioativas, conforme é mostrado na Figura 5 ²⁶. As configurações dos magazines e dos *racks* de fontes dependem do *design* dos irradiadores gama industriais. Com o planejamento e distribuição dos lápis obtêm-se melhores eficiências e fatores de uniformidade de dose por *rack*, para diferentes densidades dos produtos a serem processados por radiação gama.

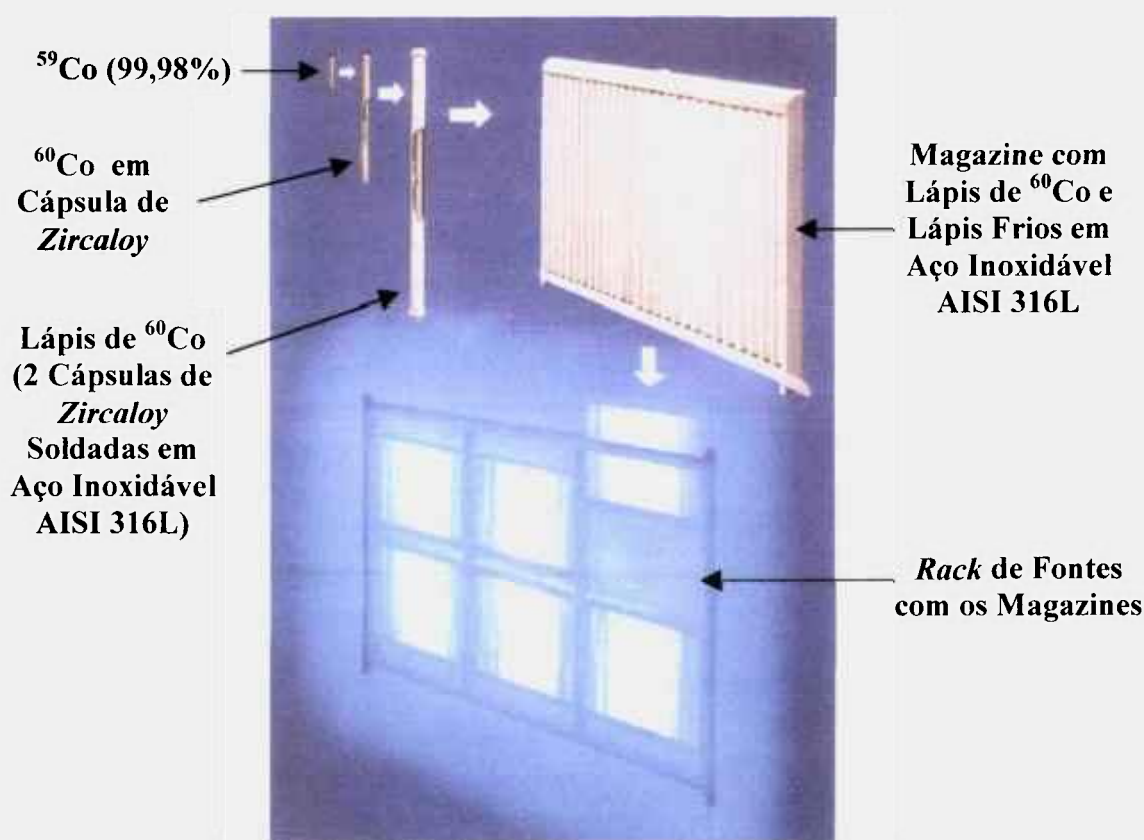


FIGURA 5 – Montagem esquemática do *rack* de fontes radioativas dos irradiadores gama industriais, a partir dos cilindros sinterizados de ^{59}Co (99,98%), cápsulas de Zircaloy com ^{60}Co , lápis de ^{60}Co e magazines ²⁶.

O cobalto-60 ($^{60}_{27}\text{Co}$) decai por duas possíveis emissões betas à níquel-60 ($^{60}_{28}\text{Ni}$) estável, com energias de 1,486 e 0,313 MeV, e dois fótons, com energias de 1,17 e 1,33 MeV, os quais são responsáveis pelo processamento dos materiais por radiação, nos irradiadores gama. A meia-vida do cobalto-60 é 5,261 anos, ou seja, há uma redução de 12,34% da atividade ao ano. Assim novos lápis de ^{60}Co devem ser adicionados aos *racks*

de fontes, se desejar manter a atividade total requerida pelo irradiador gama. Os lápis de ^{60}Co são eventualmente removidos dos *racks* de fontes e retornam ao fabricante, após vida útil de 20 anos. Na Figura 6 é mostrado o esquema do decaimento radioativo para o cobalto-60 ^{60}Co .

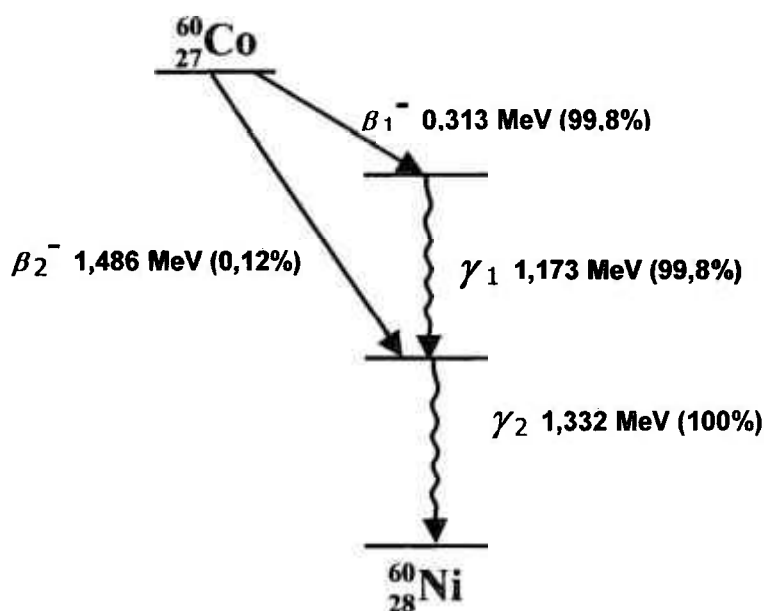


FIGURA 6 – Esquema do decaimento radioativo para o cobalto-60 ^{60}Co .

O decaimento radioativo de um radionuclídeo é regido pela equação 2.2:

$$N_t = N_0 e^{(-\lambda t)} \quad (2.2)$$

na qual,

- N_t = número de átomos radioativos, no tempo t ;
- N_0 = número de átomos radioativos iniciais;
- λ = constante de decaimento radioativo e
- t = tempo.

No tempo de meia-vida do radionuclídeo ($t = T_{1/2}$), $N = N_0/2$, e $\lambda = 0,693/T_{1/2}$. Em termos de atividade do radionuclídeo, substituindo-se $N_t = A_t$, $N_0 = A_0$ e $\lambda = 0,693/T_{1/2}$, na equação 2.2, obtém-se a equação 2.3:

$$A_f = A_0 0,5^{\left(\frac{t}{T_{1/2}}\right)} \quad (2.3)$$

na qual,

- A_f = atividade após tempo t ;
- A_0 = atividade inicial;
- $T_{1/2}$ = tempo de meia-vida (^{60}Co = 5,261 anos) e
- t = tempo.

Em função do decaimento radioativo do cobalto-60, o tempo corrigido (t_c) de processamento dos produtos por radiação, nos irradiadores industriais, será calculado pela equação 2.4, obtida a partir da equação 2.3. O Anexo 1 apresenta os fatores de decaimento radioativo para o cobalto-60 ($\text{FDR}^{60}_{\text{Co}}$), em dias, meses e anos ²⁹:

$$t_c = \frac{t_i}{\text{FDR}^{60}_{\text{Co}}} \quad (2.4)$$

na qual,

- t_c = tempo corrigido de processamento, em função do decaimento radioativo;
- t_i = tempo inicial de processamento e
- $\text{FDR}^{60}_{\text{Co}}$ = fator de decaimento radioativo para o cobalto-60.

2.3 – IRRADIADORES GAMA

2.3.1 – Classificação dos Irradiadores Gama

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 e particularmente, a acessibilidade e a blindagem das fontes radioativas. O irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, no qual desenvolveu-se e

implantou-se o sistema de irradiação proposto neste trabalho é classificado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN como sendo do grupo I e pela AIEA um irradiador gama categoria IV ^{12,14}.

Em um irradiador de categoria I pela AIEA, a fonte selada é completamente encapsulada e blindada em um contêiner seco, construído de materiais sólidos. O acesso à fonte radioativa selada ou à região de irradiação não é fisicamente possível, em função da sua configuração. Este tipo de irradiador é comercialmente conhecido como *Gammacell*, conforme é mostrado na Figura 7.

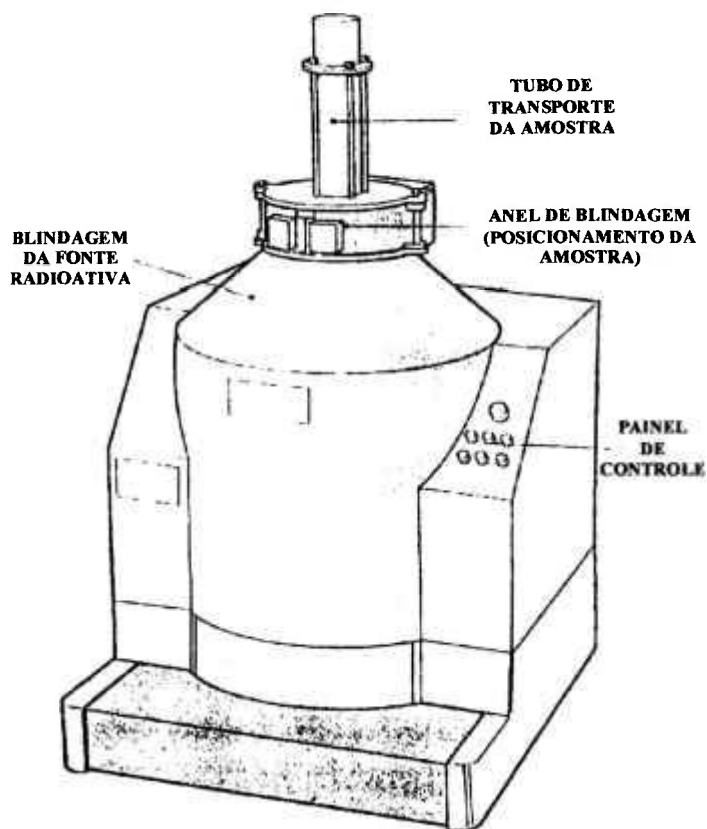


FIGURA 7 - Irradiador gama de cobalto-60 tipo *Gammacell*, categoria I pela AIEA ¹².

No irradiador de categoria II pela AIEA, o acesso é controlado e a fonte selada é armazenada em um contêiner construído em materiais sólidos. A fonte radioativa é totalmente blindada, quando não está sendo utilizada e o compartimento de irradiação é mantido inacessível durante o uso do equipamento, por meio do sistema de segurança e intertravamento. Trata-se de um irradiador do tipo panorâmico, conforme é mostrado na Figura 8.

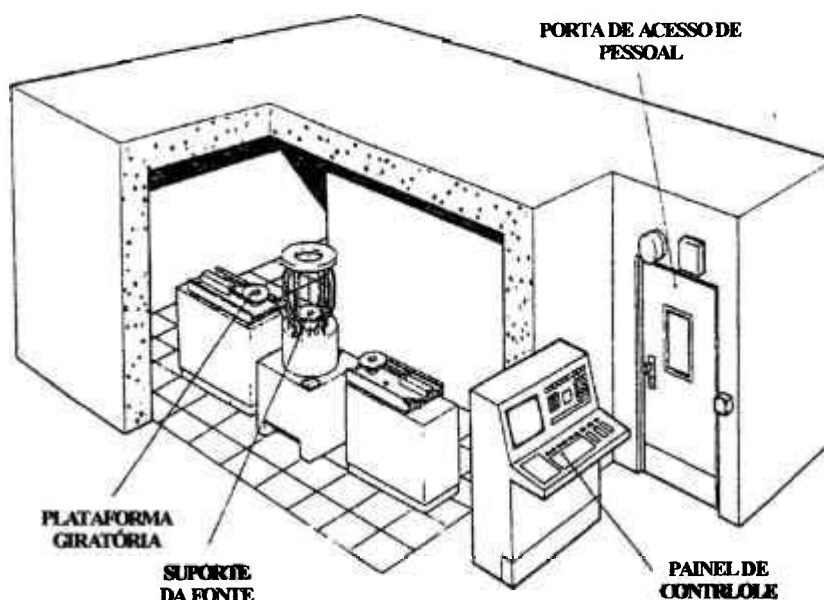


FIGURA 8 - Irradiador gama de cobalto-60 tipo Panorâmico, categoria II pela AIEA ¹².

Em um irradiador de categoria III pela AIEA, a fonte selada é armazenada em uma piscina de estocagem, constantemente blindada por água deionizada. O acesso à fonte radioativa e ao compartimento de irradiação é fisicamente restrito pelo projeto de construção, conforme é mostrado na Figura 9.

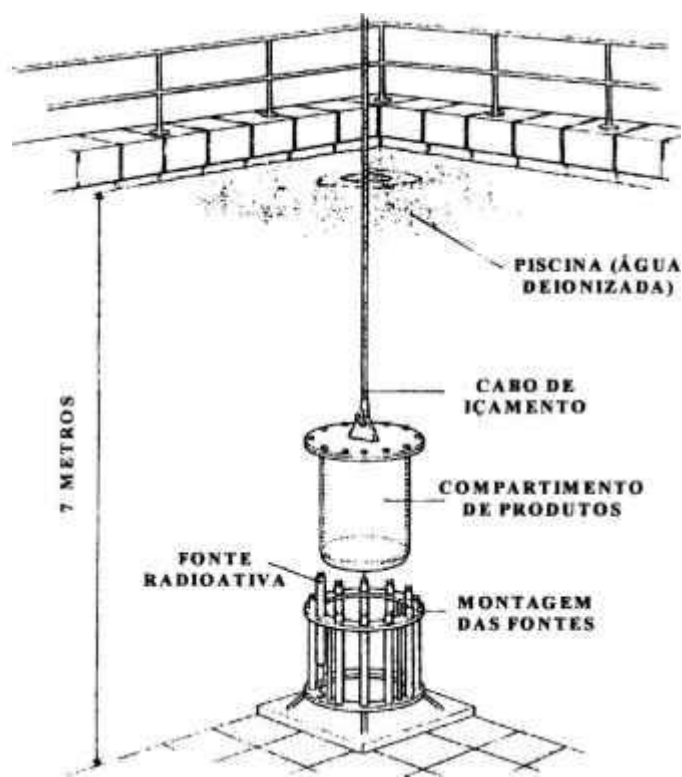


FIGURA 9 - Irradiador gama de cobalto-60, categoria III pela AIEA ¹².

No irradiador de categoria IV pela AIEA, o controle de acesso é restrito e a fonte selada é armazenada em uma piscina de estocagem, constantemente blindada por água deionizada. Assim, a fonte radioativa é completamente blindada quando não está sendo utilizada e o compartimento de irradiação é mantido inacessível durante o uso do equipamento, por meio do sistema de segurança e intertravamento, conforme é mostrado na Figura 10.

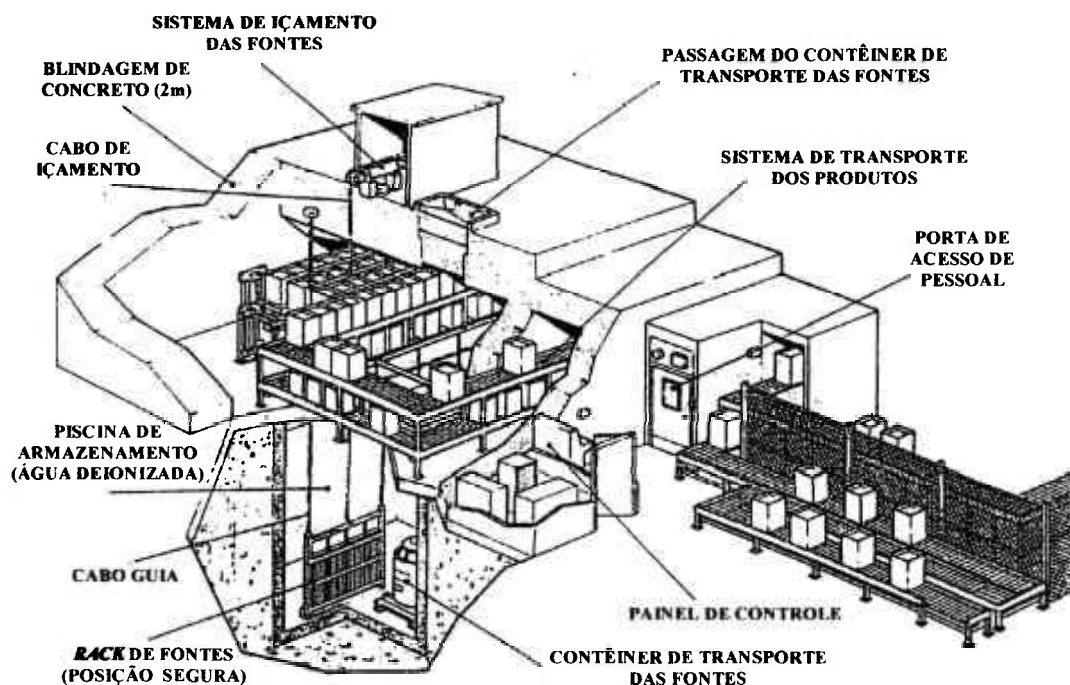


FIGURA 10 - Irradiador gama de cobalto-60, categoria IV pela AIEA ¹².

2.4 – IRRADIADORES GAMA INDUSTRIAIS DE GRANDE PORTE

2.4.1 – Capacidade de Processamento da Planta de Irradiação

A capacidade de processamento ou *throughput* de um irradiador gama industrial, definida em quilogramas ou metros cúbicos por hora, está relacionada à atividade em ^{60}Co

existente na planta de irradiação, à dose absorvida pelo produto e ao fator de eficiência do irradiador. No cálculo da capacidade de processamento utiliza-se a equação 2.5^{9,29,30}:

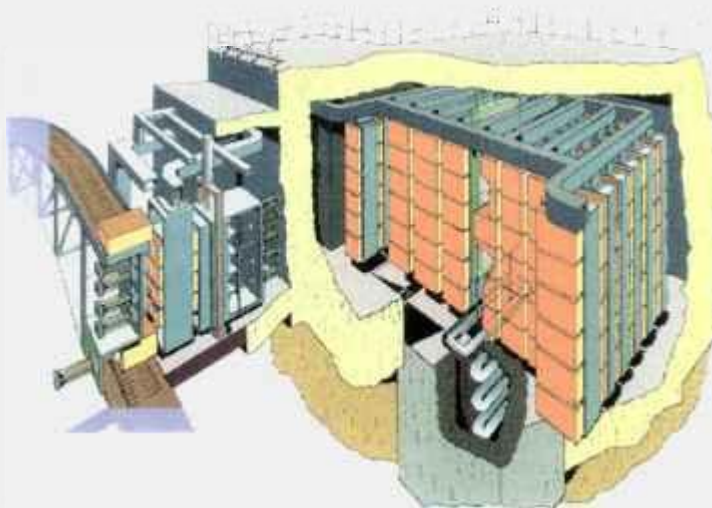
$$A^{60}\text{Co} = 18,7 \frac{X.D}{F} \quad (2.5)$$

na qual,

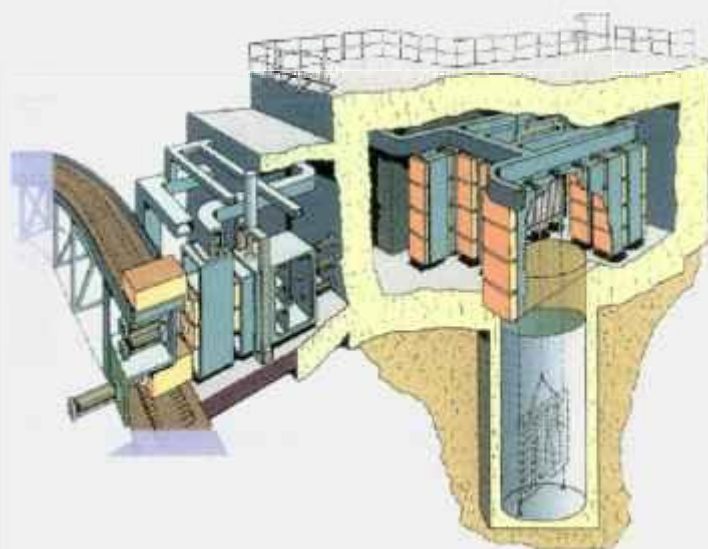
- $A^{60}\text{Co}$ = atividade em ^{60}Co (Ci, 1 Ci = 37 GBq);
- X = *throughput* (kg/h);
- D = dose absorvida (kGy) e
- F = fator de eficiência do irradiador.

2.4.2 – Armazenamento das Fontes Radioativas

Quanto a forma de armazenamento das fontes radioativas, as plantas industriais de irradiação gama são classificadas em seca (*dry*) e úmida (*wet*), conforme mostradas na Figura 11. Nas plantas a seco, com capacidade máxima para 74 PBq (2 MCi), as fontes radioativas são armazenadas em concreto refrigerado, a 3 (três) metros de profundidade e não necessitam de água deionizada para blindagem. Nas plantas úmidas, com capacidade máxima para 370 PBq (10 MCi), as fontes radioativas são armazenadas em piscinas com água deionizada (10 μ siemens/cm) e apresentam flexibilidade no carregamento dos *racks* de fontes. Para efeito de cálculo, 2.490,1 TBq (67,3 kCi) de cobalto-60 transferem para água 1 kW de energia, na forma de calor.



(a)



(b)

FIGURA 11 - Formas de armazenamento das fontes radioativas, nas plantas industriais de irradiação gama: (a) seca (*dry*) e (b) úmida (*wet*)⁹.

2.4.3 – Geometria do *Rack* de Fontes em Relação ao Produto

As geometrias de irradiação em um irradiador gama de grande porte podem ser do tipo: *product overlap source* ou *source overlap product*, conforme são mostradas nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

A geometria de irradiação tipo *source overlap product* é menos complexa, necessita de menor investimento inicial e suas manutenções preventivas e corretivas são mais simples e menos onerosas. Mas, a geometria de irradiação tipo *product overlap source* proporciona uma melhor uniformidade de dose aos produtos, dada pela relação entre as doses absorvidas máxima e mínima, maior aproveitamento dos raios gama e eficiência na utilização das fontes de cobalto-60, pelo irradiador industrial.

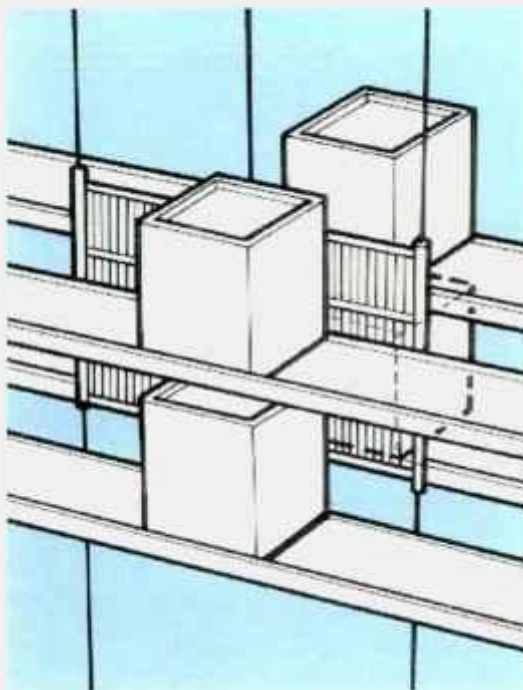


FIGURA 12 – Geometria de irradiação tipo *product overlap source*, no qual a altura final dos produtos em caixas metálicas ou *pallets*, no sistema de transporte, ultrapassa a altura dos *racks* de fontes de cobalto-60²⁶.

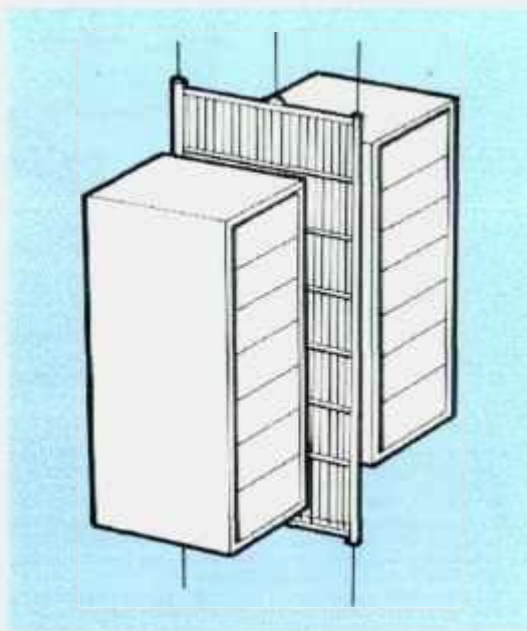


FIGURA 13 – Geometria de irradiação tipo *source overlap product*, no qual a altura final dos produtos em caixas metálicas ou *pallets*, no sistema de transporte é inferior à altura dos *racks* de fontes de cobalto-60 ²⁶.

2.4.4 – Rota de Passagem do Produto pelas Fontes Radioativas

O aumento na espessura e no volume dos produtos a serem processados por radiação, proporcionam um maior aproveitamento dos raios gama, na câmara de irradiação. Mas, o aumento no número de passes dos produtos pelas fontes radioativas, implica em um maior investimento inicial, para aquisição do sistema de transporte e construção da blindagem radiológica (necessidade de uma área maior, para a câmara de irradiação). Na Figura 14 são mostradas possíveis rotas de passagens dos produtos, pelas fontes radioativas de cobalto-60.

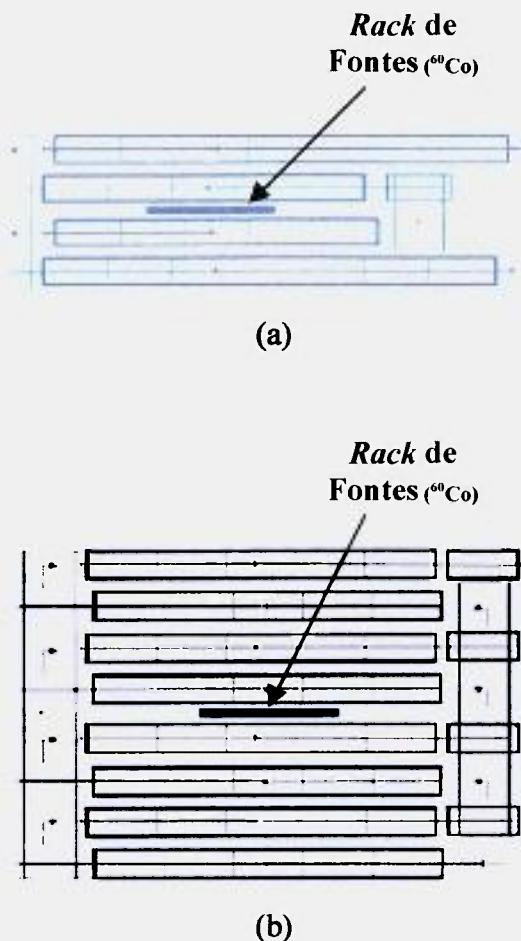


FIGURA 14 - Rotas de passagens dos produtos pelas fontes radioativas de cobalto-60: (a) quatro passes e (b) oito passes ⁹.

2.4.5 – Sistemas de Transporte dos Produtos

Nos irradiadores industriais, os sistemas de transporte dos produtos são classificados em *tote box*, *carrier* ou *pallet*, ilustrados na Figura 15 ^{9,29,30}.

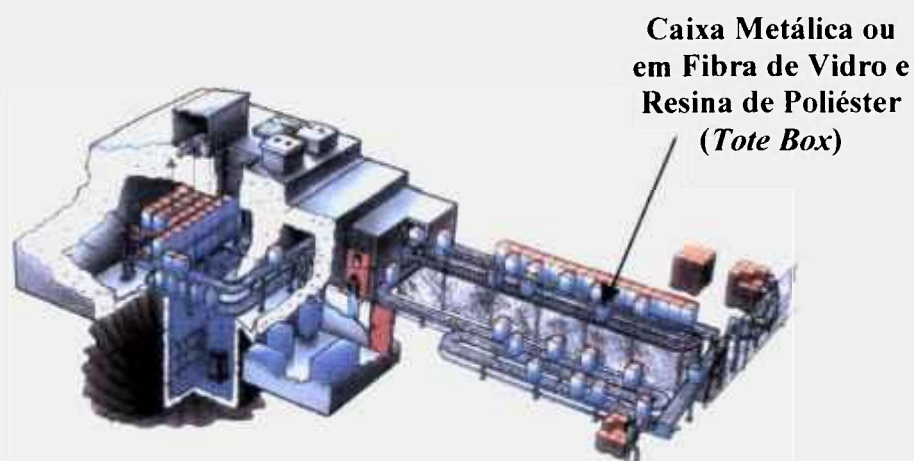
No sistema de transporte tipo *tote box*, os produtos são acondicionados em caixa metálica ou em fibra de vidro e resina de poliéster chamada *tote*, com volume aproximado de 0,25 m³. As caixas ou *totes* são conduzidos para câmara de irradiação, por meio de sistemas de transporte manual (em batelada) ou automático. As caixas circundam os *racks* de fontes radioativas, assegurando a máxima eficiência na utilização do ^{60}Co , melhor uniformidade de dose, mas uma menor flexibilidade nas dimensões dos produtos a serem

processados, quando comparado aos sistemas tipo *carrier* e *pallet*. A maioria dos irradiadores gama com sistema de transporte tipo *tote box* possuem geometria de irradiação tipo *product overlap source*, no qual as caixas com os produtos passam quatro vezes ao redor dos *racks* de fontes de ^{60}Co , sendo duas em cada nível: superior e inferior.

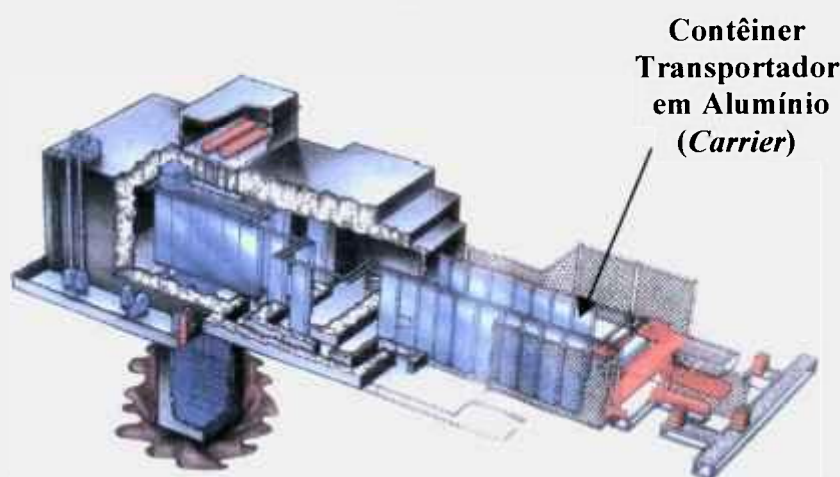
O sistema tipo *carrier* utiliza contêiner transportador em alumínio, com altura máxima de 3,0 m, no qual são acondicionados os produtos. Os *carriers* são suspensos, conduzidos para câmara de irradiação e circundam os *racks* de fontes radioativas, por meio de uma monovia. Os *carriers* possuem volumes internos superiores aos dos *tote boxes* e acomodam produtos com diferentes dimensões. Os *carriers* são conduzidos para câmara de irradiação, por meio de sistemas de transporte manual (em batelada) ou automático, com cilindros hidráulicos ou pneumáticos. Em geral, os irradiadores gama com sistemas de transporte tipo *carrier* possuem geometria de irradiação tipo *source overlap product*, permitindo maior capacidade de processamento (*throughput*), quando comparada aos *tote boxes*.

O sistema de transporte tipo *pallet* permite o processamento dos produtos, diretamente no palete padrão, com 1,0 m de comprimento, por 1,2 m de largura. Essa concepção reduz o custo intensivo de manuseio dos produtos, freqüentemente exigido nos sistemas de transporte tipo *tote box* e *carrier*, proporciona grandes capacidades de processamento, mas com menor uniformidade de dose. Os paletes são acondicionados em carrinhos hidráulicos individuais, esteiras ou em contêineres transportadores em alumínio, suspensos e conduzidos para câmara de irradiação por meio de uma monovia, de forma similar ao sistema de transporte tipo *carrier*.

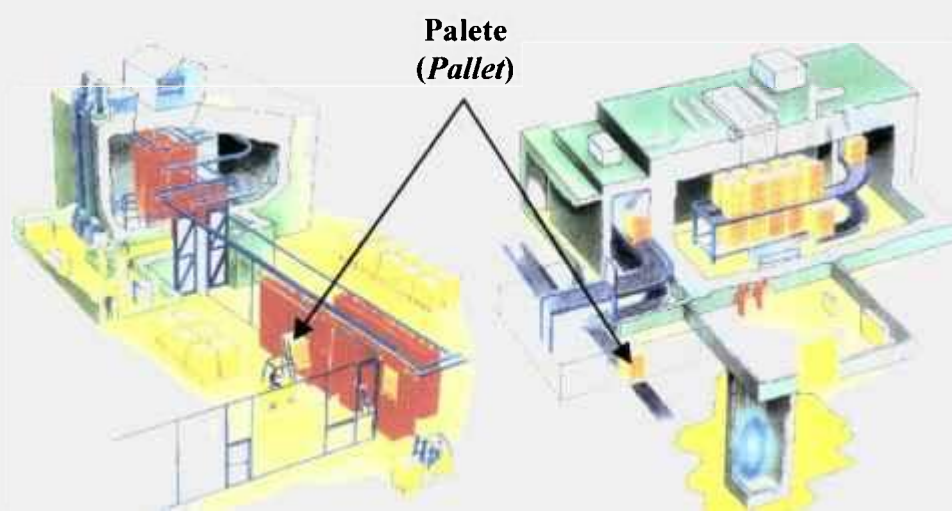
Os paletes padrão circundam os *racks* de fontes radioativas em uma seqüência indexada, compensando-se as dimensões envolvidas de 1,0 x 1,2 m. Além disso, existem estações mecânicas apropriadas para troca de posições dos paletes, entres os níveis superior e inferior, garantindo-se boa uniformidade de dose nos produtos. Em geral, os irradiadores gama com sistema de transporte tipo *pallet* possuem geometria de irradiação tipo *source overlap product*. Contudo, existem também esses irradiadores, com sistemas tipo *product overlap source*, aumentando-se a eficiência na utilização do ^{60}Co .



(a)



(b)



(c)

FIGURA 15 - Classificação dos sistemas de transporte dos produtos, nos irradiadores gama industriais: (a) *tote box*, (b) *carrier* e (c) *pallet* ^{9,29}.

2.5 - IRRADIADORES GAMA INDUSTRIAIS TIPO COMPACTO

2.5.1 – Irradiadores Compactos Comerciais

Os mais recentes modelos de irradiadores de cobalto-60 tipo compacto disponíveis no mercado internacional são: o *BREVIIONTM*, desenvolvido pela empresa canadense *MDS Nordion Ion Technologies*; o *MICROCELLTM* e o *MINICELLTM*, ambos desenvolvidos pela empresa americana *SteriGenics International Inc.* e o *BP1 Pallet IrradiatorTM*, desenvolvido pela empresa francesa *Picowave Technology*. Os irradiadores compactos foram desenvolvidos com o propósito de serem instalados de forma integrada às unidades produtoras, tendo como principal característica o processamento em batelada (*batch*).

A empresa canadense *MDS Nordion Ion Technologies*, a mais tradicional fabricante de irradiadores gama, construiu o seu primeiro irradiador comercial em 1964. Desde então, já projetou e instalou mais de 120 unidades em diversos países e é responsável por mais de 70% da produção e comercialização de fontes radioativas de cobalto-60, no mercado mundial.

O irradiador compacto *BREVIIONTM*, desenvolvido pela *MDS Nordion Ion Technologies*, possui sistema de transporte tipo *tote box*, com Controlador Lógico Programável – CLP, requer apenas uma pessoa para operá-lo e processa 8,61 ou 8,96 m³ de produtos por batelada, nas configurações com 32 ou 40 *tote boxes*, respectivamente ¹⁵.

No *BREVIIONTM*, as fontes radioativas de cobalto-60 tipo C-188 da *MDS Nordion Ion Technologies* são posicionadas em um *rack* de fontes, com capacidade máxima para 37 PBq (1 MCi) e armazenadas em piscina, com água deionizada. O *rack* de fontes é içado verticalmente por um cabo em aço inoxidável, com dois cabos guias laterais, quando em uso na câmara de irradiação, cuja área externa é de 82,5 m².

Os produtos a serem processados por radiação, com densidades de 0,10 a 0,40 g/cm³ são dispostos em caixas em aço inoxidável, capacidade máxima de 88 kg e volumes de 0,27 ou 0,22 m³ por caixa, nas configurações com 32 ou 40 *tote boxes*,

respectivamente. As caixas com os produtos são posicionadas dentro de um magazine, dispostas em quatro linhas paralelas e duplo empilhamento de caixas. Um guincho elétrico transfere o magazine com os 32 ou 40 *tote boxes*, para o sistema de translação ao redor do *rack* de fontes de cobalto-60, na câmara de irradiação.

Após o processamento dos produtos, o *rack* de fontes de cobalto-60 retorna à posição de segurança, no fundo da piscina, abrindo-se a porta do irradiador. O magazine com os *tote boxes* é retirado da câmara de irradiação, com auxílio do guincho elétrico, para a área de produtos irradiados. Outro magazine com produtos não irradiados é transferido para o sistema de translação, na câmara de irradiação, fechando-se a porta do irradiador. Inicia-se novamente o ciclo de processamento por radiação. O intervalo mínimo entre bateladas é de 4 a 5 minutos. Trata-se de um irradiador classificado pela AIEA como de Categoria IV, mostrado na Figura 16.

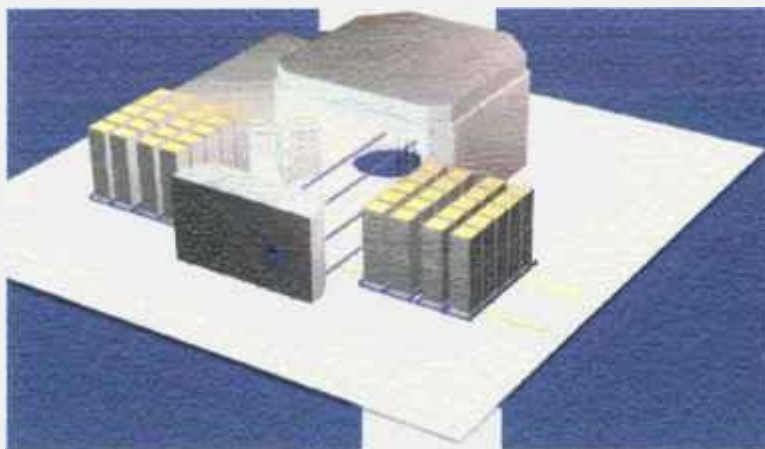


FIGURA 16 - *BREVIONTM* - MDS Nordion Ion Technologies ¹⁵.

O irradiador compacto *MICROCELLTM*, desenvolvido pela empresa americana *SteriGenics International Inc.*, processa 1,36 m³ de produto por batelada ^{6,16}. Na construção do irradiador, sua blindagem pré-fabricada em aço carbono é transportada de navio e posicionada no local da fundação de concreto, cuja área é de 16 m².

No *MICROCELLTM*, a fonte radioativa de cobalto-60 é armazenada a seco em um contêiner, do qual é içada verticalmente por um cabo em aço inoxidável, quando em uso na

câmara de irradiação. Os produtos a serem processados por radiação são dispostos em caixas em aço inoxidável, com volume de $0,34 \text{ m}^3$ e capacidade máxima de 275 kg por caixa. As caixas com os produtos são posicionadas em quatro mesas giratórias, dispostas ao redor da fonte radioativa, num sistema mecânico tipo carrossel.

Após o tempo de exposição, a fonte de cobalto-60 retorna à posição de segurança, no contêiner, abrindo-se a porta do irradiador. As quatro caixas com os produtos são retiradas manualmente da câmara de irradiação. A capacidade máxima de processamento anual do *MICROCELL*TM é de 1.986 m^3 , aproximadamente, para materiais irradiados a 25 kGy, com densidade aparente de $0,15 \text{ g/cm}^3$. Trata-se de um irradiador do tipo panorâmico, classificado pela AIEA como de Categoria II, mostrado na Figura 17.

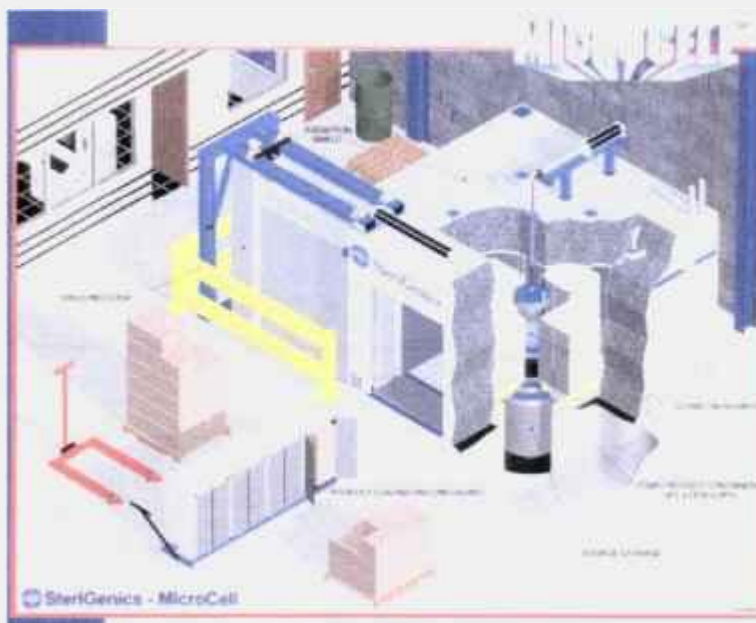


FIGURA 17 - *MICROCELL*TM - SteriGenics International Inc.¹⁶.

O irradiador compacto *MINICELL*TM, desenvolvido também pela empresa americana *SteriGenics International Inc.*, possui sistema de transporte pneumático tipo *tote box*, com Controlador Lógico Programável – CLP, duplo empilhamento de caixas, geometria de irradiação tipo *source overlap products* e processa $8,94 \text{ m}^3$ de produtos por batelada^{8,16}.

Na construção do irradiador, sua blindagem pré-fabricada em aço carbono é transportada de navio e posicionada no local da fundação de concreto, cuja área é de 39m². No *MICROCELL*TM, as fontes radioativas de cobalto-60 são posicionadas em dois *racks* de fontes paralelos, com capacidade máxima para 74 PBq (2 MCi) e armazenadas em piscina, com água deionizada. Os *racks* de fontes são içados verticalmente por cabos em aço inoxidáveis, com dois cabos guias laterais por *rack*, quando em uso na câmara de irradiação.

Os produtos a serem processados por radiação são dispostos em vinte e uma caixas em aço inoxidável, com volume de 0,43 m³ e capacidade máxima de 204 kg por caixa. Após o processamento, os *racks* de fontes de cobalto-60 retornam à posição de segurança, no fundo da piscina, abrindo-se a porta do irradiador. Todas as caixas com os produtos são retiradas simultaneamente da câmara de irradiação, por um sistema mecânico automático, aumentando-se a segurança e a velocidade de remoção e carregamento com novos produtos, quando comparado ao processamento manual, realizado pelos operadores da planta. Sua capacidade máxima de processamento anual é de 56.745 m³, aproximadamente, para materiais médicos, cirúrgicos e biológicos. Trata-se de um irradiador classificado pela AIEA como de Categoria IV, mostrado na Figura 18.

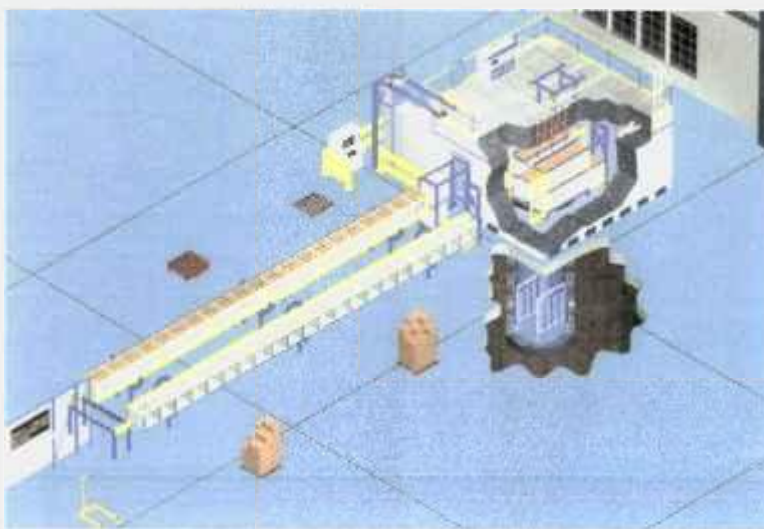


FIGURA 18 - *MINICELL*TM - SteriGenics International Inc. ¹⁶.

O irradiador compacto *BP1 Pallet IrradiatorTM*, desenvolvido pela empresa francesa *Picowave Technology* possui sistema de transporte tipo *pallet* e processa 5,38 m³ de produtos por batelada ¹⁷. A grande vantagem do sistema *pallet* é a possibilidade de irradiação de produtos em diferentes embalagens (tambores, sacos de matérias-primas e caixas de papelão com diversas dimensões), evitando-se o processamento manual, realizado pelos operadores da planta e possíveis danos aos produtos.

Neste irradiador as fontes radioativas de cobalto-60 são posicionadas em um *rack* de fontes com seção transversal quadrada, sendo que cada face possui três magazines em três níveis diferentes. Cada magazine comporta 25 lápis de ⁶⁰Co tipo C-188 da *MDS Nordion Ion Technologies*. A capacidade máxima do irradiador é de 44,4 PBq (1,2 MCi). As fontes radioativas são armazenadas a oito metros de profundidade, em uma piscina em aço inoxidável, com água deionizada. O *rack* de fontes é içado verticalmente por um cabo em aço inoxidável, com dois cabos guias laterais, quando em uso na câmara de irradiação.

Os produtos a serem processados por radiação são dispostos em *pallets*, com volume de 1,34 m³, e posicionados em quatro carrinhos, com capacidade máxima de 605 kg por *pallet*. Os carrinhos são conduzidos manualmente por trilhos, até as quatro mesas giratórias existentes, na câmara de irradiação, as quais estão localizadas em posições simétricas, ao redor do *rack* de fontes radioativas. As fontes de cobalto-60 são içadas e cada *pallet* permanece na mesma posição, por um quarto do tempo total de exposição. Decorrido esse período, os quatro *pallets* são rotacionados nas mesas giratórias em 90 graus, simultaneamente, por um mecanismo pneumático. Esse procedimento de rotação tem duração de 1 minuto e é repetido por três vezes, garantindo-se que cada face do *pallet* com os produtos, receba a mesma dose de radiação.

Após o tempo total de exposição, o *rack* de fontes de cobalto-60 retorna à posição de segurança, no fundo da piscina, abrindo-se a porta do irradiador. Os quatro carrinhos com os *pallets* são então retirados manualmente da câmara de irradiação. O intervalo entre bateladas é de 10 minutos. Trata-se de um irradiador classificado pela AIEA como de Categoria IV, mostrado na Figura 19.



FIGURA 19 - *BP1 Pallet IrradiatorTM - Picowave Technology¹⁷*.

2.5.2 – Irradiador Multipropósito Tipo Compacto com Sistema de Irradiação Desenvolvido no IPEN-CNEN/SP

O irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com o sistema de irradiação desenvolvido nesta tese, segue a mesma tendência desses quatro tipos de irradiadores compactos (*BREVIONTM*, *MICROCELLTM*, *MINICELLTM* e *BP1 Pallet IrradiatorTM*) no que se refere ao tamanho da câmara de irradiação e a atividade do material radioativo. Entretanto, o irradiador multipropósito desenvolvido no IPEN-CNEN/SP apresenta sistemas inéditos de porta giratória e de irradiação de produtos.

A porta giratória elimina a necessidade de labirinto para entrada e saída dos produtos, a necessidade do recolhimento das fontes radioativas e de se abrir a porta

deslizante do irradiador, para cada carregamento de material a ser beneficiado, eliminando-se o tempo morto considerável, sem irradiar produtos, no processo em bateladas. O sistema de transporte dos produtos é contínuo, duplo empilhamento de caixas, sendo que cada nível de caixa movimenta-se na mesma direção (horizontal), mas em sentidos contrários, proporcionando uma melhor uniformidade de dose e eficiência do irradiador. O sistema de transporte é do tipo *tote box*, as fontes radioativas seladas de cobalto-60 são armazenadas em piscina e a geometria de irradiação é do tipo *product overlap source*, utilizando a radiação gama para processar continuamente os produtos e/ou matérias-primas nas áreas de:

- esterilização de produtos médicos, cirúrgicos, biológicos e farmacêuticos³²;
- desinfestação e preservação de produtos alimentícios (especiarias, ervas medicinais - fitoterápicos, proteínas de origem animal e vegetal), plantas ornamentais e frutas³³;
- produtos de aplicação na agricultura (turfa, grãos e cereais);
- esterilização de tecidos biológicos para implantes cirúrgicos;
- beneficiamento de gemas (turmalina, topázio, citrino e ametista), além de quartzo de diferentes regiões do País;
- desinfecção e tratamento de resíduos domésticos e industriais (sólidos, líquidos e gasosos) e lixo hospitalar e
- novos materiais poliméricos por meio de modificações induzidas pela radiação.

Além disso, o irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com o sistema de irradiação desenvolvido neste trabalho propicia o desenvolvimento de detectores e sensores de radiação e novos irradiadores e dispositivos de irradiação.

Os produtos a serem processados, em sua embalagem final são colocados em caixas em alumínio, com comprimento de 0,69 m, por 0,65 m de largura e 1,03 m de altura, na área de armazenamento de produtos não irradiados. A seguir, cada uma das quatorze caixas em alumínio são transportadas automaticamente por um sistema hidráulico, passam pela porta giratória, até a câmara de irradiação. O sistema de transporte promove a movimentação das caixas com os produtos ao redor dos dois *racks* de fontes de cobalto-60, em um tempo previamente determinado, de acordo com a quantidade de cobalto-60 instalada, a densidade do produto e a dose absorvida de radiação requerida no processamento do produto, conforme mostrado na Figura 20.

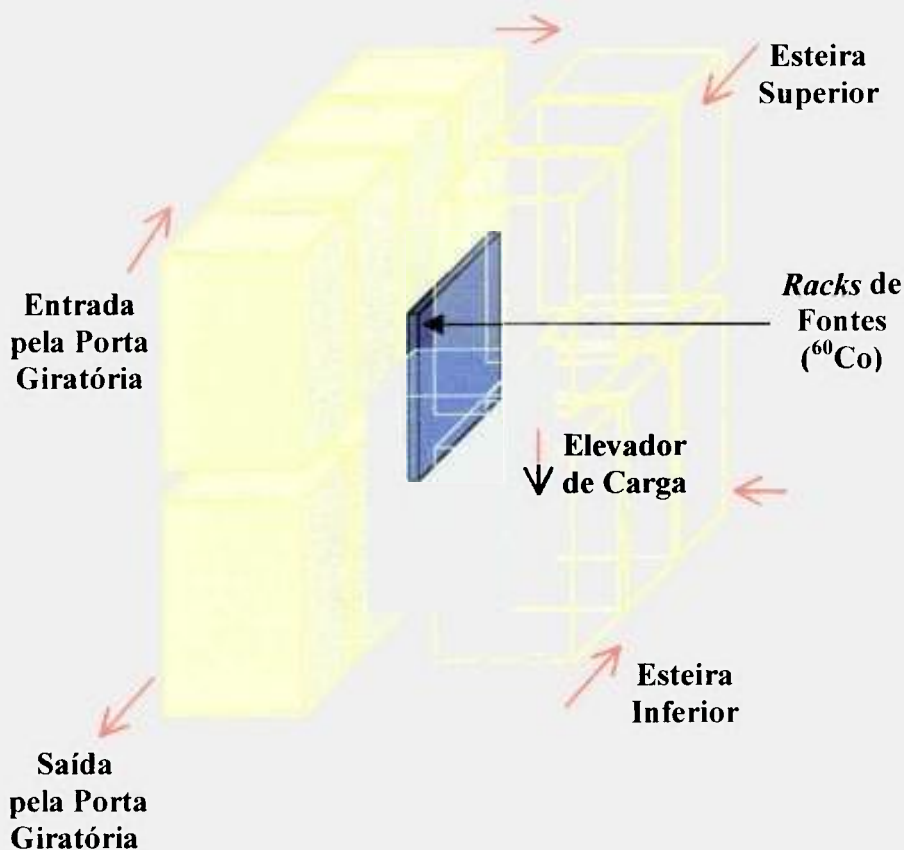


FIGURA 20 - Movimentação esquemática das quatorze caixas em alumínio no sistema de transporte dos produtos, em relação aos dois *racks* de fontes radioativas, na câmara de irradiação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP.

Após completado o tempo de irradiação, no qual cada uma das quatorze caixas em alumínio passam quatro vezes ao redor dos *racks* de fontes de ^{60}Co , sendo duas em cada nível (superior e inferior), as caixas são transportadas automaticamente pelo sistema hidráulico, passam pela porta giratória até a área de produtos processados (irradiados), no galpão de armazenamento do irradiador multipropósito, onde os mesmos serão descarregados das caixas. A quantidade de *racks* de fontes radioativas a serem retirados para fora da piscina de armazenamento, depende das doses e taxas de dose requeridas pelos produtos e/ou matérias-primas a serem processados.

Pelo fato do sistema de transporte de produtos ser contínuo, decorrido o tempo no qual cada caixa em alumínio permanece parada na mesma posição, em frente aos *racks* de fontes (*time setting*), as réguas do sistema de transporte são acionadas automaticamente. A porta giratória movimenta-se e retira, pelo nível inferior, uma caixa de produtos processados (irradiados), da câmara de irradiação. De forma sincronizado, a porta giratória

movimenta-se novamente e posiciona, pelo nível superior, uma nova caixa de produtos não irradiados, na câmara de irradiação. O desenho esquemático do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com o sistema de irradiação desenvolvido neste trabalho é mostrado na Figura 21.

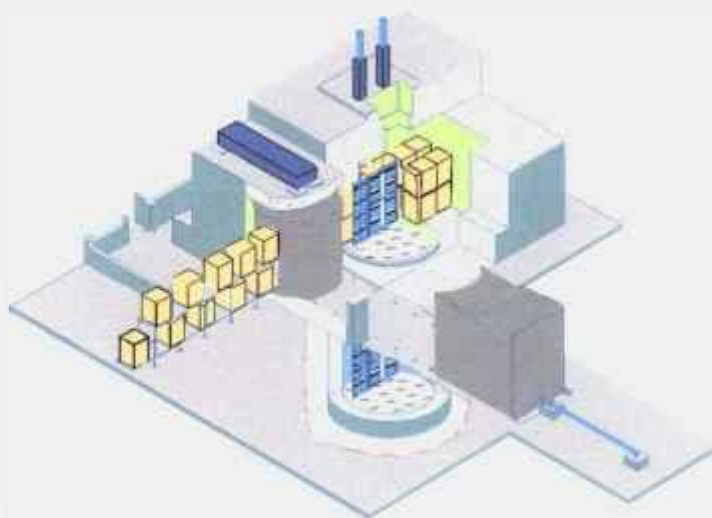


FIGURA 21 - Desenho em perspectiva do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com o sistema de irradiação desenvolvido no IPEN-CNEN/SP.

2.6 – ANÁLISE DE ACIDENTES E INCIDENTES NO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E NO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP

Sob o aspecto de filosofia de segurança, o projeto do sistema de irradiação e do próprio irradiador multipropósito, depende do propósito da sua operação e da categoria do irradiador gama, classificada pela AIEA de I a IV. A maior contribuição da filosofia de segurança é atribuída ao conceito de defesa em profundidade ^{12,34}.

O conceito de defesa em profundidade deve ser aplicado à todas as atividades de segurança, sejam organizacionais, comportamentais ou relativas ao projeto. O propósito é de garantir que todas as possibilidades de ocorrerem falhas foram analisadas, as

providências necessárias tomadas e se, mesmo assim, as falhas vierem a ocorrer, elas poderão ser compensadas ou corrigidas.

No projeto do sistema de irradiação desenvolvido neste trabalho, o conceito de defesa em profundidade está incorporado nos múltiplos níveis de proteção, segurança e intertravamento existentes no irradiador multipropósito, minimizando-se a necessidade de intervenção humana, a saber:

- Limites no controle de acesso à câmara de irradiação;
- Blindagem radiológica projetada e certificada para confinar a radiação ionizante;
- Fontes de ^{60}Co em posição de segurança no fundo da piscina;
- Sistemas automáticos com Controladores Lógicos Programáveis, instalados nos sistemas de controle de processo, segurança e intertravamento;
- Lógica de relês instalada no sistema de segurança e intertravamento e
- Equipamentos e procedimentos para controle do curso e conseqüências dos acidentes.

Em termos de equipamentos e procedimentos, destacam-se três níveis de defesa em profundidade, com o propósito de se prevenir acidentes ou minimizar suas conseqüências, em caso de falhas:

- Prevenir possíveis alterações nos procedimentos estabelecidos, para operação normal do irradiador multipropósito - os sistemas de irradiação e da instalação devem ser criteriosamente projetados, construídos e operados, com a implantação dos programas de garantia da qualidade, controle e manutenção;
- Detectar e responder imediatamente às alterações nos procedimentos estabelecidos, para operação normal do irradiador multipropósito – requer a provisão de sistemas específicos e definição dos procedimentos operacionais e
- Minimizar as conseqüências dos acidentes – requer a provisão de equipamentos adicionais e procedimentos operacionais.

A análise de acidentes no sistema de irradiação, desenvolvido e implantado no irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto do IPEN-CNEN/SP, baseia-se em experiências prévias e estatísticas obtidas na operação de diversas plantas de irradiação. Em média foi relatado um incidente a cada dez irradiadores instalados no mundo e, na

maioria dos casos, não houve danos às fontes de ^{60}Co ou à redução no nível de segurança da instalação. Esse resultado está associado à imprescindível existência do sistema de segurança e intertravamento redundante, independente e diversificado, sem o qual as plantas de irradiação gama não podem operar.

Dos 45 acidentes e incidentes radiológicos, reportados pelos Estados Unidos da América com irradiadores gama, 31 resultaram de falha, mal funcionamento ou degradação de algum componente eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento. Os outros 10 foram decorrentes de deficiências no gerenciamento operacional da planta de irradiação, sendo, a mais comum, a permissão na operação dos irradiadores, com o sistema de segurança e intertravamento inativado. Observa-se que os 4 restantes, de maior gravidade e fatalidade, foram ocasionados por ações pessoais inconsistentes com os procedimentos estabelecidos, para operações normais dos irradiadores gama: Stimos - Itália (Maio/1975), Kjeller - Noruega (Setembro/1982), San Salvador - El Salvador (Fevereiro/1989) e Sor-Van - Israel (Junho/1990) ^{12,22,35}.

Utilizando-se da metodologia de análise de riscos, por meio da construção de árvores de falha ou de eventos, dois cenários de riscos devem ser considerados para o sistema de irradiação, do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto do IPEN-CNEN/SP, sob o ponto de vista de acidentes e incidentes radiológicos. Com isso, a eficiência do sistema de segurança e intertravamento da instalação radiativa é avaliada e as deficiências apontadas são retificadas ^{29,36}:

- Exposição Acidental de Indivíduos; e
- Liberação de Material Radioativo.

2.6.1 – Análise de Exposição Acidental de Indivíduos

Na Figura 22 é mostrado o diagrama lógico da árvore de falhas, para exposição acidental dos trabalhadores e indivíduos do público às fontes radioativas de cobalto-60, as quais fazem parte do sistema de irradiação, do irradiador multipropósito. Observam-se quatorze eventos iniciadores, os quais são apresentados na Tabela 2, com os possíveis modos de falha e as características adotadas e/ou incorporadas ao projeto (procedimentos, sistemas e componentes), para evitarem ou atenuarem suas conseqüências.

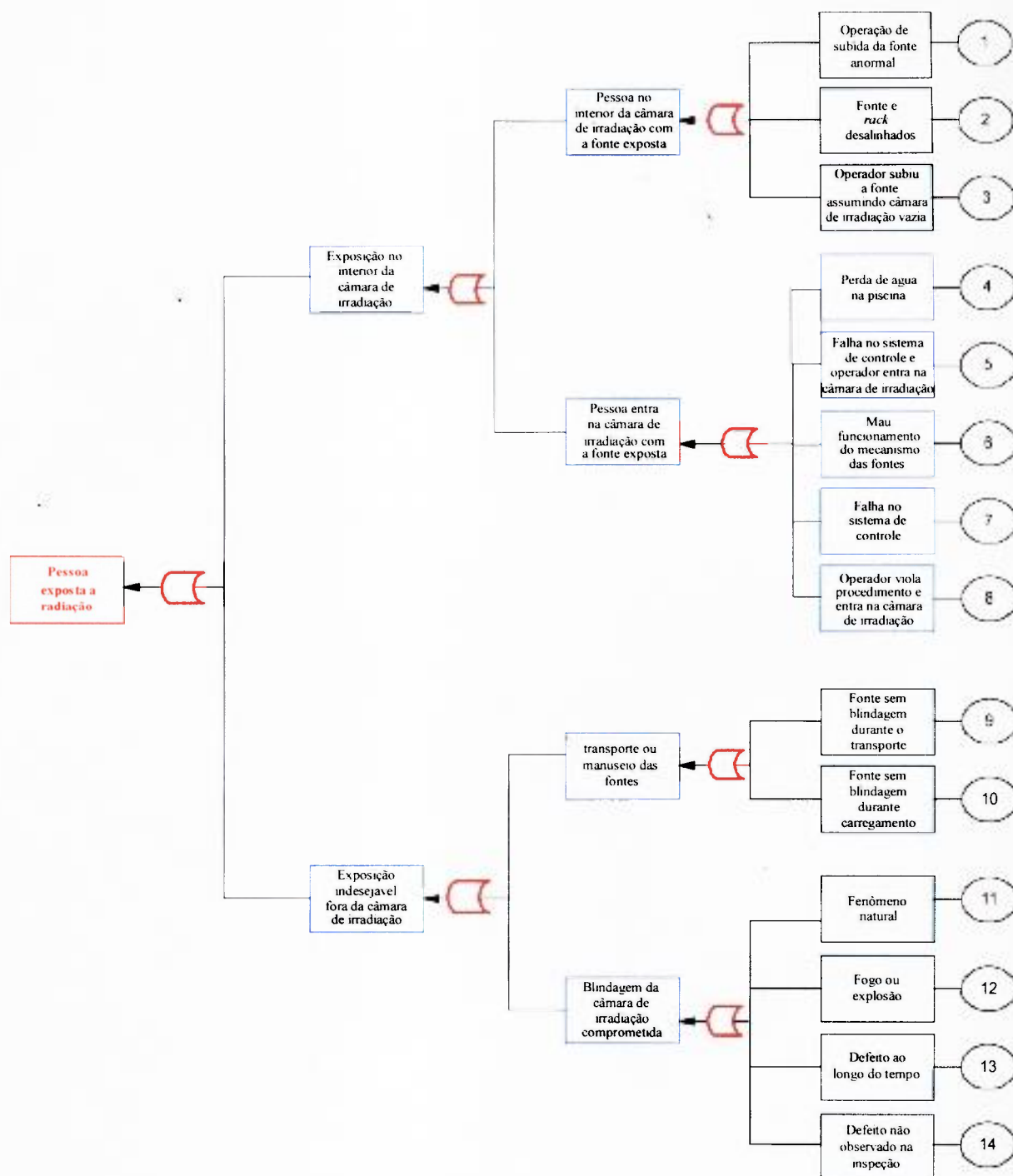


FIGURA 22 - Árvore de falhas para exposição acidental dos trabalhadores e indivíduos do público às fontes radioativas de cobalto-60, as quais fazem parte do sistema de irradiação, do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP^{29,36}.

TABELA 2 – Eventos iniciadores com os possíveis modos de falha e as características adotadas e/ou incorporadas ao projeto, para evitarem ou atenuarem a exposição accidental dos trabalhadores e indivíduos do público, às fontes radioativas de ^{60}Co do sistema de irradiação, do irradiador multipropósito.

Item	Evento Iniciador	Modo de Falha	Medida Corretiva Apresentada no Projeto
1	Operação de subida da fonte normal	- Falha no sistema de intertravamento (<i>interlock</i>); - Falha no painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento; - Falha no sistema pneumático e - Falha mecânica.	1. A chave geral de operação do irradiador deve ser desligada, para entrar na câmara de irradiação: - Intertravamento de controle de subida das fontes é desarmado; 2. Porta deslizante aberta: - Segundo intertravamento elétrico de controle de subida das fontes é desarmado; - Intertravamento pneumático da válvula de acionamento do mecanismo de acionamento das fontes é desarmado; - É despressurizada a linha de ar comprimido, que alimenta o mecanismo de subida das fontes; 3. Remoção do cabo em aço inoxidável AISI 304, na entrada da porta deslizante: - Desarma o intertravamento elétrico do mecanismo de subida das fontes; 4. Fotocélula na entrada da câmara de irradiação: - Desarma o intertravamento elétrico do mecanismo de subida das fontes; 5. Alarmes sonoro e visual no movimento da fonte: - Alarmes funcionam no movimento da fonte; - Cabo de parada de emergência pode ser acionado, durante a desocupação; 6. Detector de radiação <i>EG&G Berthold</i>, modelo LB-111: - Alarme dispara quando o nível de radiação de fundo (<i>background</i>) ultrapassa 2 $\mu\text{Sv/h}$, com a fonte exposta;

			- Cabo de parada de emergência pode ser acionado, durante a elevação das fontes; 7. Detector de radiação portátil (Geiger-Müller): - Indica um aumento no nível de radiação, na elevação do <i>rack</i> de fontes; - Cabo de parada de emergência pode ser acionado, durante a desocupação, a porta deslizante é fechada na saída e 8. Velocidade de subida da fonte: - Movimento da fonte para a posição superior não é imediato permitindo, consequentemente, um tempo de reação de 14s (<i>rack</i> 1) e 37s (<i>rack</i> 2), aproximadamente.
2	Fonte e <i>rack</i> desalinhados	- Causada por interferência mecânica; - Instalação imprópria da fonte; - Falha no <i>rack</i> de fonte e - Perda de controle do mecanismo de subida das fontes.	1. Falha na descida da fonte (somente se o <i>rack</i> não retornar para a posição de segurança, no fundo da piscina): - Interruptor de descida da fonte não é ativado; - Indicação de falha no painel eletro-eletrônico do sistema de segurança e intertravamento, de que a fonte não retornou; - O mecanismo de movimentação da porta de entrada de serviço não é acionado - a porta deslizante permanece fechada; 2. Detector de radiação <i>EG&G Berthold</i>, modelo LB-111: - Alarmes disparam em função do nível de radiação superior a 2 $\mu\text{Sv/h}$, na câmara de irradiação; - O mecanismo de movimentação da porta de entrada de serviço não é acionado - a porta deslizante permanece fechada; 3. Detector de radiação portátil (Geiger-Müller): - Indica um aumento do nível de radiação, durante a entrada na câmara de irradiação e

			- Os procedimentos estabelecem que a câmara de irradiação deve ser desocupada imediatamente, no primeiro sinal de radiação acima do <i>background</i> ($2 \mu\text{Sv/h}$) e a porta deslizante deve ser fechada na saída.
3	Operador subiu a fonte assumindo câmara de irradiação vazia	- Entrada de pessoa, pelo sistema de transporte (entrada de produtos); - Pessoa escondida na câmara de irradiação; - Verificação inadequada da câmara de irradiação, antes da saída; - Entrada de pessoa autorizada, face a falha no sistema de <i>interlock</i> e - Falha completa no sistema pneumático.	1. Acionamento das chaves na câmara de irradiação, no procedimento de partida do irradiador: - Duas chaves dos interruptores estão localizadas em posições estratégicas na câmara de irradiação. Para acionar cada interruptor antes da subida das fontes, o operador é obrigado a inspecionar toda a câmara de irradiação; - Quando o interruptor é acionado, sinais visíveis e audíveis indicam a seqüência de início de operação do irradiador; 2. Tempo de espera de segurança: - Quando a chave de início de operação é acionada, inicia-se a contagem de tempo até 60 s. Esse tempo assegura que a câmara de irradiação está sendo inspecionada e evita qualquer entrada de pessoas, durante a seqüência de subida das fontes; 3. Cabo de parada de emergência: - Cabo de parada de emergência pode ser acionado, durante a desocupação e 4. Procedimentos: - Operador deve ser a última pessoa a deixar a câmara de irradiação e estar com detector de radiação portátil (Geiger-Müller), com a chave geral do irradiador, fixada a este por meio de uma corrente.
4	Perda de água na piscina	- Falha no sistema de tratamento de água; - Falha no sistema de reposição de água;	1. Sensor do nível de água: - O interruptor do nível de água é acionado quando o nível de água torna-se menor do que o normal; - Se o nível da água diminuir até aproximadamente 30 cm abaixo do nível normal, um alarme será disparado;

		- Pessoa cai dentro da piscina; - Vazamento na linha de suprimento; - Mau funcionamento no sistema de detecção do nível d' água e - Vazamento.	- A porta deslizante permanecerá fechada; 2. Detector de radiação <i>EG&G Berthold</i>, modelo LB-111: - Alarme dispara se o nível de radiação estiver acima do nível de <i>background</i> (2 μSv/h), em função do baixo nível da água. Isto só é aplicável se os <i>racks</i> das fontes estiverem na posição de segurança; 3. Detector de radiação portátil (Geiger-Müller): - Indica um aumento no nível de radiação, na entrada da câmara de irradiação e - Os procedimentos estabelecem que a câmara de irradiação deve ser desocupada imediatamente, no primeiro sinal de radiação acima do <i>background</i> (2 μSv/h) e a porta deslizante deve ser fechada na saída.
5	Falha no sistema de controle e operador entra na câmara de irradiação	- Falha completa no sistema de detecção de radiação, incluindo o detector de radiação portátil (Geiger-Müller) - Falha no intertravamento e - Modificação no controle não autorizada.	1. Remoção da chave geral do irradiador, do painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento: - As fontes devem estar na posição de segurança, para que isso ocorra; - Existe somente uma única chave acessível ao operador; - A chave do irradiador está conectada ao detector de radiação portátil (Geiger-Müller); 2. Detector de radiação <i>EG&G Berthold</i>, modelo LB-111: - Monitor indicará um nível de radiação acima do <i>background</i> (2 μSv/h), na câmara de irradiação; - A porta de entrada (deslizante) permanecerá bloqueada; 3. Detector de radiação portátil (Geiger-Müller): - Detector é testado com uma fonte radioativa de verificação (^{137}Cs), com atividade de 10 μCi, localizada junto ao painel de controle, na porta deslizante. Se o detector não funcionar, segue-se o

			procedimento de “não entrar na câmara de irradiação”; 4. Porta deslizante: - A chave do irradiador é usada para abrir a porta de serviço; - A abertura da porta aciona um bloqueio pneumático e três bloqueios elétricos, do mecanismo de levantamento das fontes; 5. Interruptor da válvula do mecanismo de levantamento das fontes: - O cabo em aço de segurança é desconectado, na entrada da porta deslizante; - Ar comprimido que alimenta os cilindros de levantamento das fontes é purgado; 6. Detector de radiação portátil (Geiger-Müller): - Indica um aumento no nível de radiação, na entrada da câmara de irradiação e - Os procedimentos estabelecem que a câmara de irradiação deve ser desocupada imediatamente, no primeiro sinal de radiação acima do <i>background</i> (2 $\mu\text{Sv/h}$) e a porta deslizante deve ser fechada na saída.
6	Mau funcionamento do mecanismo das fontes	- Esmagamento do mecanismo da fonte em trânsito, como resultado de interferências; - Mau funcionamento do intertravamento; - Mau funcionamento do sistema de controle e	1. Chave geral do irradiador (somente uma chave é utilizada para acionar o irradiador e a porta deslizante): - A chave deve ser removida do painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento, para abrir a porta deslizante; - Para remover a chave, o irradiador deve estar desligada e a fonte estar, no fundo da piscina; - Sensor de posição da fonte deve estar acionado pelo <i>rack</i>, na sua posição inferior, para a porta deslizante ser desbloqueada; 2. Detector de radiação <i>EG&G Berthold</i>, modelo LB-111:

		- Falha no sistema de detecção da radiação.	- O Detector indicará que há um nível de radiação acima do <i>background</i> (2 $\mu\text{Sv/h}$), dentro da câmara de irradiação; - A porta deslizante permanece bloqueada; 3. Porta deslizante: - A chave do irradiador é usada para abrir a porta deslizante; - A abertura da porta aciona um bloqueio pneumático e três bloqueios elétricos, do mecanismo de levantamento das fontes; - Ao desconectar o cabo em aço de segurança, para entrada na câmara de irradiação, o ar comprimido do sistema de elevação dos <i>racks</i> de fontes deve ser interrompido; 4. Luz de perigo de radiação: - Uma luz de perigo está localizada acima da porta deslizante. Ela permanecerá acesa enquanto as fontes não estiverem no fundo da piscina (posição de segurança); 5. Detector de radiação portátil (Geiger-Müller): - Indica um aumento no nível de radiação, na entrada da câmara de irradiação e - Os procedimentos estabelecem que a câmara de irradiação deve ser desocupada imediatamente, no primeiro sinal de radiação acima do <i>background</i> (2 $\mu\text{Sv/h}$) e a porta deslizante deve ser fechada na saída.
7	Falha no sistema de controle	- Interferência eletromagnética; - Danos de radiação; - Falha na manutenção preventiva; - Modificação não	1. Chave geral do irradiador (somente uma chave é utilizada para acionar o irradiador e a porta deslizante): - A chave deve ser removida do painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento, para abrir a porta deslizante; - Para remover a chave, o irradiador deve estar desligado e a fonte deve estar no fundo da piscina (posição de segurança); - Interruptor que indica a posição de

		autorizada no controle; - Falha nos indicadores, isto é, nos detectores de fumaça e de aquecimento e - Falta de energia elétrica.	segurança da fonte deve estar ativado pelo <i>rack</i>, na sua posição inferior, para a porta deslizante ser desbloqueada; 2. Detector de radiação <i>EG&G Berthold</i>, modelo LB-111: - Detector indicará um nível de radiação acima do <i>background</i> (2 $\mu\text{Sv/h}$), na câmara de irradiação; - A porta de entrada (deslizante) permanece bloqueada; 3. Porta deslizante: - A chave geral do irradiador é usada para abrir a porta deslizante; - A abertura da porta aciona um bloqueio pneumático e três bloqueios elétricos, do mecanismo de levantamento das fontes; - Ao desconectar o cabo em aço de segurança, na entrada da câmara de irradiação, o ar comprimido do sistema de elevação dos <i>racks</i> de fontes deve ser interrompido; 4. Luz de perigo de radiação: - Uma luz de perigo está localizada acima da porta deslizante. Ela permanecerá acesa, enquanto as fontes não estiverem no fundo da piscina; 5. Detector de radiação portátil (Geiger-Müller): - Indica um aumento no nível de radiação, na entrada da câmara de irradiação e - Os procedimentos estabelecem que a câmara de irradiação deve ser desocupada imediatamente, no primeiro sinal de radiação acima do <i>background</i> (2 $\mu\text{Sv/h}$) e a porta deslizante deve ser fechada na saída.
8	Operador viola procedimento e entra na câmara de irradiação	- Operador ignora os alarmes sonoro e visual; - Porta de acesso	1. Procedimento para entrada na câmara de irradiação: - Não é possível se o procedimento correto de entrada não é seguido, a porta deslizante permanece bloqueada; 2. Conhecimento técnico específico é

		comprometida e	exigido para desbloquear os interruptores de segurança;
		- Modificação não autorizada no controle.	3. O <i>by-pass</i> dos interruptores de segurança é de difícil execução;
			4. Desvios (desbloqueios) múltiplos são necessários, para se conseguir acesso à câmara de irradiação;
			5. Detector de radiação portátil (Geiger-Müller):
			- Indica um aumento no nível de radiação, na entrada da câmara de irradiação;
			- Os procedimentos estabelecem que a câmara de irradiação deve ser desocupada imediatamente, no primeiro sinal de radiação acima do <i>background</i> (2 $\mu\text{Sv/h}$) e a porta deslizante deve ser fechada na saída;
			6. Luz de Perigo de Radiação
			- Uma luz de perigo está localizada acima da porta deslizante. Ela permanecerá acesa, enquanto os <i>racks</i> de fonte não estiverem no fundo da piscina (posição de segurança);
			7. Porta deslizante:
			- A abertura da porta aciona um bloqueio pneumático e três bloqueios elétricos, do mecanismo de levantamento das fontes e
			- Ao desconectar o cabo em aço de segurança, na entrada da câmara de irradiação, o ar comprimido do sistema de elevação dos <i>racks</i> deve ser interrompido.
9	Fonte sem blindagem durante o transporte	- Danos no embalado de transporte, provocados por fenômenos naturais e	1. Embalagem de transporte das fontes:
			- Antes do material radioativo ser embarcado, a embalagem é licenciada para transporte. O fabricante precisa mostrar às Autoridades Reguladoras do País, que a embalagem resistirá às rígidas condições de acidentes, formuladas pela Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA, mantendo-se sua blindagem
		- Danos no	

		embalado de transporte, em função de acidente no transporte	suficientemente intacta, para evitar expor o público à radiação (embalado de transporte tipo B, com certificado de aprovação unilateral) ³⁷; 2. Preparo do embalado para o embarque: - Antes do licenciamento da embalagem para o transporte, cada etapa do procedimento de preparo para o transporte deve ser documentada e aprovada pela Autoridade Reguladora. A Autoridade Reguladora também realizará auditorias periódicas, no trabalho que está sendo realizado. Esses procedimentos incluem medidas de campos de radiação e fixação de etiquetas de identificação, no lado de fora do embalado de transporte tipo B e 3. Manuseio durante o transporte: - Durante o transporte, somente o pessoal que recebeu treinamento é autorizado a manusear os embalados com as fontes radioativas. Os embalados são projetados para resistirem a qualquer tipo de acidente de transporte, sem danificar a blindagem. Todos os transportadores recebem documentos, para carregarem juntos ao veículo. Esses documentos informam os perigos potenciais da radiação, apresentam os procedimentos de manuseio dos embalados, informam o que fazer em situações de emergência e contém a lista de endereços e telefones das pessoas a serem avisadas em caso de emergência.
10	Fonte sem blindagem durante carregamento	- Falha no guindaste e - Falha nos cabos de içamento.	1. Procedimento no carregamento das fontes: - No carregamento das fontes no irradiador, os fixadores do <i>plug</i> do embalado não são removidos, até que o embalado esteja seguro, no fundo da piscina. O embalado e a piscina do irradiador resistirão a uma queda livre, em função da falha total dos cabos de içamento do embalado, conforme Norma da AIEA ¹².

11	Fenômeno natural	- Danos por terremoto, causando perda de blindagem.	1. Terremoto: - A blindagem radiológica e a piscina de armazenagem das fontes são projetadas e construídas, em estruturas livres separadas, para resistirem as acelerações laterais do chão, de forma independente. Um detector de sismo está montado na blindagem radiológica, que permite o envio automático da fonte para dentro da piscina (posição de segurança), com indicação de perigo no painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento, caso receba um sinal de aceleração maior que 0,03 G (0,29 m/s²).
12	Fogo ou explosão	- Fogo ou explosão causados por produtos e - Fogo ou explosão fora da instalação.	1. Fogo: - As paredes da blindagem radiológica são construídas com chapas em aço carbono e concreto armado, com aproximadamente 1,8m de espessura. As paredes em concreto e em aço proporcionarão isolamento térmico, na ocorrência de um incêndio; 2. Fogo externo: - No caso de fogo externo, estudos têm mostrado que a parte externa da blindagem sofrerá um dano mínimo, decorrente de um fogo de intenso aquecimento e de duração moderada. Testes extensivos e vistorias na blindagem devem ser efetuados após o acidente, de modo a confirmar a integridade da blindagem radiológica, antes de qualquer operação na planta; 3. Fogo interno: No evento de um fogo interno, provocado pela queima dos produtos, os seguintes sistemas de segurança atuarão: - Sensor de alta temperatura - se a temperatura da câmara de irradiação for superior a 70°C, o sensor de alta temperatura irá desligar o irradiador e as fontes retornarão para a piscina, o sistema de ventilação será desligado e indicará uma falha de alta temperatura,

			no painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento; - Detector de fumaça - se uma fumaça for detectada dentro da câmara de irradiação, o detector de fumaça desligará o irradiador, similarmente ao sensor de alta temperatura. A indicação de falha do detector de fumaça será visualizada no painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento; - Sistema de extinção de incêndio por aspersão – nos eventos simultâneos de alta temperatura e detecção de fumaça, acionarão o alarme de incêndio, com indicação de falha no painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento. O sistema de extinção de incêndio por aspersão será acionado manualmente, para esfriar os produtos, na câmara de irradiação e - Se o incêndio ocorrer no interior da câmara de irradiação, qualquer dano à blindagem será menor, que o provocado por um incêndio externo muito intenso. Internamente existem poucos materiais processados por radiação, os quais podem ser combustíveis. A blindagem deverá ser testada e inspecionada antes de qualquer operação da planta.
13	Defeito ao longo do tempo	- Defeito no material de blindagem radiológica e - Degradação nos pontos de acesso	1. Rachadura ou lacuna na blindagem radiológica: - Quando a construção de uma nova planta está completa, realiza-se um levantamento radiométrico detalhado, na superfície da blindagem do irradiador. O registro é retido pelo proprietário e a Autoridade Reguladora no País, a CNEN. Isto proporciona uma verificação final na integridade da blindagem radiológica. Mesmo se a rachadura foi desenvolvida na blindagem de concreto, ao longo do tempo, o resultado pode não ser muito drástico. A radiação é absorvida e refletida nas superfícies da blindagem, perdendo energia com muitas interações sucessivas. A maioria das

			rachaduras nas estruturas de concreto com reforços em aço produzirão um caminho difícil para o escape da radiação.
14	Defeito não observado na inspeção	- Mau funcionamento dos instrumentos e - Procedimentos que não foram observados	1. Inspeção inicial: - Será realizada uma inspeção ampla, dos níveis de radiação externos à blindagem radiológica, pelo construtor e supervisor de radioproteção do irradiador multipropósito, quando as fontes de ^{60}Co forem expostas pela primeira vez, no Comissionamento a Quente. Esse procedimento exige monitorações em vários pontos específicos, na superfície externa da blindagem. Um registro escrito dessas monitorações será feito com desenhos das superfícies da blindagem. Isto permitirá a Autoridade Reguladora (CNEN) fazer uma verificação independente para validar a inspeção e 2. Inspeções rotineiras: - As inspeções e levantamentos radiométricos são realizados rotineiramente. Portanto, qualquer falha na blindagem radiológica pode ser localizada rapidamente.

2.6.2 - Liberação de Material Radioativo

Na Figura 23 é mostrado o diagrama lógico da árvore de falhas, para liberação acidental de material radioativo na câmara de irradiação, na qual está o sistema de irradiação, do irradiador multipropósito e meio ambiente, que pode levar à exposição dos trabalhadores e indivíduos do público. Observam-se quatorze eventos iniciadores, os quais são apresentados na Tabela 3, com os possíveis modos de falha e as características adotadas e/ou incorporadas ao projeto (procedimentos, sistemas e componentes), para evitarem ou atenuarem suas consequências.

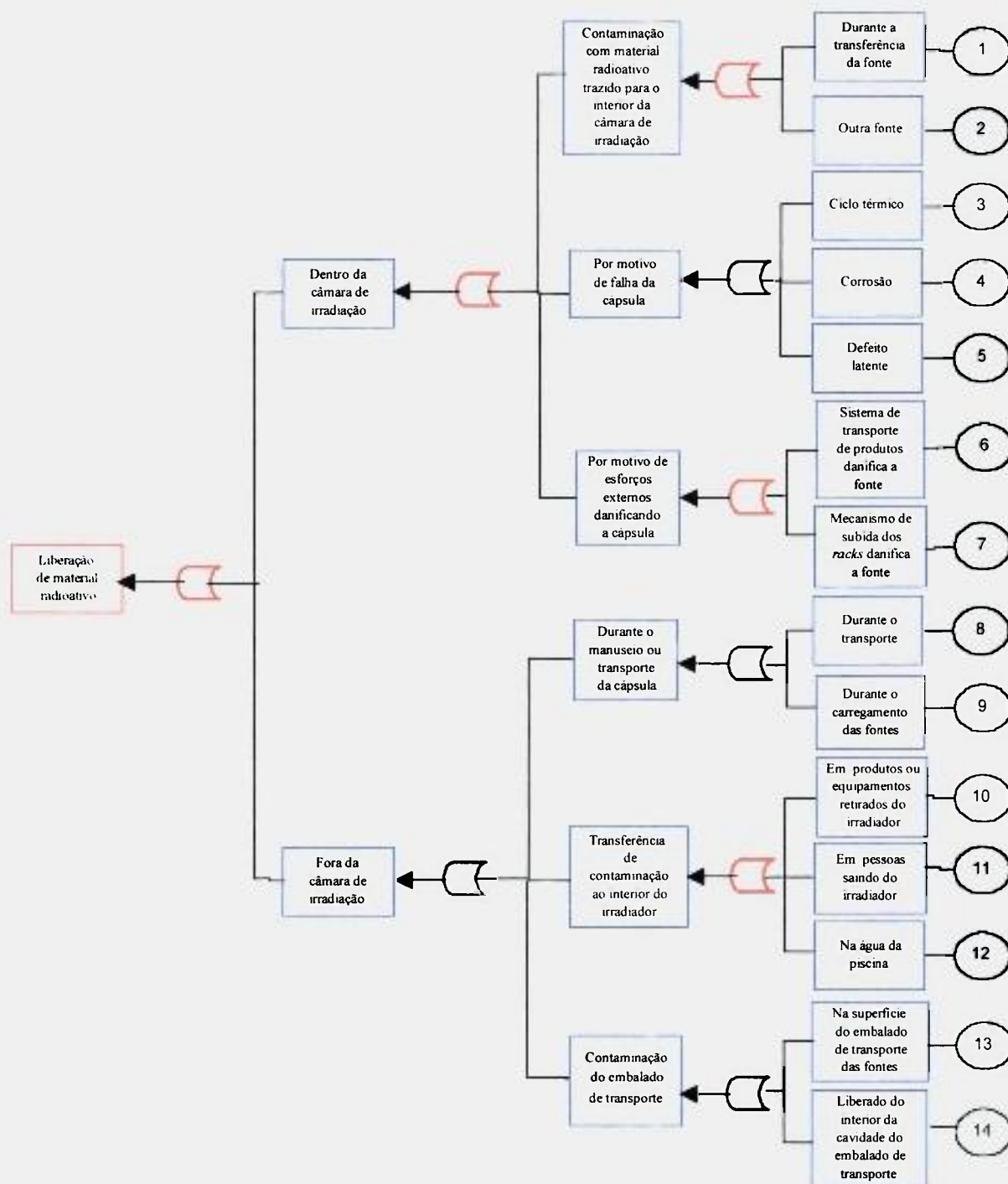


FIGURA 23 - Árvore de falhas para liberação acidental de material radioativo na câmara de irradiação e meio ambiente, que pode levar à exposição dos trabalhadores e indivíduos do público, no irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP 29,36

TABELA 3 – Eventos iniciadores com os possíveis modos de falha e as características adotadas e/ou incorporadas ao projeto, para evitarem ou atenuarem a liberação acidental de material radioativo na câmara de irradiação e meio ambiente, a qual pode levar à exposição dos trabalhadores e indivíduos do público.

Item	Evento Iniciador	Modo de Falha	Medida Corretiva Apresentada no Projeto
1	Durante a transferência da fonte	- Embalado de transporte tipo B contaminado durante o carregamento; - Embalado não monitorado e conteúdo danificado (fontes de ^{60}Co); - Danos na fonte durante a transferência, na planta de fabricação e - Perda do controle do embalado, durante seu manuseio.	1. Teste de contaminação das fontes seladas pelo fabricante: - As fontes seladas são limpas para remover qualquer traço de contaminação e as soldas são testadas, para verificar defeitos de fabricação, conforme Norma ISO/DIS 2919 ²⁷; 2. Inspeção do embalado de transporte tipo B: - Testes de esfregação são realizados no embalado, para verificar a contaminação radioativa superficial, antes do transporte; - O embalado é inspecionado antes do transporte, para assegurar níveis de radiação dentro dos limites permitidos; - No local, o embalado é inspecionado novamente e os resultados são comparados com a inspeção inicial na planta de fabricação. Testes de esfregação são também realizados na superfície do embalado e 3. Teste de vazamento das fontes seladas de ^{60}Co, no embalado de transporte tipo B: - Antes do embalado ser colocado na piscina, um teste de fuga (<i>flushing test</i>) é realizado nas fontes seladas de ^{60}Co, para prevenir qualquer chance de contaminação da piscina.
2	Outra fonte	- Embalado contaminado por outro material radioativo e	1. Inspeção do embalado de transporte tipo B: - Testes de esfregação são realizados no embalado, para verificar a contaminação radioativa superficial, antes do transporte; - O embalado é inspecionado antes do transporte, para assegurar níveis de radiação dentro dos limites permitidos;

		- Outro material radioativo presente na área da planta de fabricação e fora de controle.	- No local, o embalado é inspecionado novamente e os resultados são comparados com a inspeção inicial na planta de fabricação. Testes de esfregação são também realizados na superfície do embalado; 2. Teste de vazamento das fontes seladas de ^{60}Co, no embalado de transporte tipo B: - Um teste de fuga (<i>flushing test</i>) é realizado pelo fabricante, antes do embarque e - Antes do embalado ser colocado na piscina, um teste de fuga é realizado nas fontes seladas de ^{60}Co, para prevenir qualquer chance de contaminação da piscina.
3	Ciclo térmico	- Falha na solda liberando material radioativo e - Falha no corpo da cápsula de <i>Zircaloy</i> e aço inoxidável AISI 316L, a qual contém as fontes radioativas de ^{60}Co.	1. Projeto da cápsula de <i>Zircaloy</i> e aço inoxidável AISI 316L: - O projeto da cápsula é qualificado pela Norma ISO/DIS 2919²⁷ e - Um rígido programa de Garantia da Qualidade é exigido dos fornecedores de fontes seladas, o qual assegura que os lápis de ^{60}Co fabricados, obedeçam às especificações da Norma ISO/DIS 2919²⁷. O programa inclui um controle de processo rígido e uma rotina de testes destrutivos e não-destrutivos das amostras.
4	Corrosão	- Falha na solda; - Falha no corpo da cápsula de <i>Zircaloy</i> e aço inoxidável AISI 316L, a qual contém as fontes radioativas de ^{60}Co; - Água da piscina não tratada (deionizada) e - Produtos	1. Cápsula de ^{60}Co: - O cobalto é um material metálico insolúvel e resistente à corrosão, na água e no ar. O projeto de fabricação das cápsulas utilizadas nos irradiadores gama, requer que o ^{59}Co seja 99,98% puro, sendo recoberto por uma camada de níquel e, em seguida, encapsulado em uma cápsula de metal <i>Zircaloy</i>. Essas cápsulas são seladas novamente em cápsula em aço inoxidável AISI 316L. Portanto, antes que a oxidação do ^{60}Co ocorra, três barreiras devem ser ultrapassadas e 2. Resistência à corrosão: - Para prevenir a corrosão, as cápsulas

		químicos estranhos, adicionados na água da piscina.	externas são feitas em aço inoxidável AISI 316L, o qual apresenta excelente resistência à corrosão no ar e na água. Durante o processo de soldagem TIG (<i>Tungsten Inert Gas</i>) e em função do baixo conteúdo de carbono presente na liga, ocorre uma precipitação mínima de carbeto em contorno de grão. Todos os materiais utilizados na construção dos <i>racks</i> de fontes e o sistema guia são em aço inoxidável, minimizando o potencial de corrosão galvânica. Como precaução adicional, a água na piscina é deionizada, mantendo-se a condutividade inferior a 10 μ siemens/cm.
5	Defeito latente	- Solda imprópria e - Materiais das cápsulas das fontes de ^{60}Co, com defeito (<i>Zircaloy</i> e aço inoxidável AISI 316L).	1. Construção da fonte selada de ^{60}Co: - A integridade das cápsulas é assegurada pela manutenção de um programa de Garantia da Qualidade. As cápsulas são soldadas automaticamente pelo processo TIG, em atmosfera de argônio utilizando eletrodos não consumíveis de tungstênio; 2. Teste das fontes radioativas seladas de ^{60}Co: - Em toda a produção das fontes seladas, testes destrutivos são realizados na primeira e última cápsula e em uma cápsula intermediária ou, no mínimo, uma em cada vinte e cinco cápsulas fabricadas. As cápsulas são cortadas, abertas e as soldas inspecionadas para se verificar trincas e porosidades e - Antes do embarque, um teste de fuga (<i>flushing test</i>) é realizado em cada fonte selada de ^{60}Co.
6	Sistema de transporte de produtos danifica a fonte	- Sistema de transporte dos produtos interfere com os <i>racks</i> de fontes.	1. Colisão mecânica: - Os <i>racks</i> de fontes do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP são protegidos da interferência dos produtos, por meio de um painel em alumínio com estrutura em aço inoxidável (<i>shroud</i>), o qual também age como uma barreira, direcionando qualquer fonte de ^{60}Co, para dentro da piscina, que venha a soltar-se dos <i>racks</i>; - O irradiador multipropósito é dotado de

			sistema anticolisão. Qualquer produto ou mesmo as caixas em alumínio (<i>tote boxes</i>) do sistema de transporte, que estiverem em rota de colisão com o painel de proteção dos <i>racks</i> de fontes (<i>shroud</i>), acionará primeiramente um sensor, o qual desligará automaticamente o sistema de transporte dos produtos e recolherá os <i>racks</i> de fontes para dentro da piscina; - O movimento dos produtos na câmara de irradiação, cumpre um tempo pré-estabelecido ("tempo para excesso de dose"), definido em função da dose e características dos produtos. Se o movimento é atrasado, provocado por interferência mecânica, os <i>racks</i> de fontes irão automaticamente para dentro da piscina, o sistema de transporte de produtos desligará e uma indicação de falha aparecerá no painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento do irradiador e - Um detector de radiação tipo Geiger-Müller está instalado na saída dos produtos da porta giratória. Se o nível de radiação na vizinhança aumentar acima do <i>background</i> ($2 \mu\text{Sv/h}$), alarmes sonoros e visuais farão com que o sistema de transporte dos produtos pare imediatamente, fornecendo uma indicação de falha no painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento. Isto evitará que qualquer material radioativo seja transportado para fora da câmara de irradiação.
7	Mecanismo de subida dos <i>racks</i> danifica a fonte	- Os <i>racks</i> de fonte interferem com a estrutura do sistema de transporte dos produtos.	1. Pressão do ar-comprimido que alimenta o sistema de elevação dos <i>racks</i> de fontes: - A pressão mínima do sistema de elevação dos <i>racks</i> de fontes é fixada em 5 kgf/cm^2. Isto reduz qualquer dano que possa ser causado, por interferência mecânica; - Se a linha de alimentação de ar-comprimido for interrompida, os <i>racks</i> de fontes irão vagarosamente para dentro da piscina, por gravidade;

			- Se os <i>racks</i> sofrerem qualquer acidente durante as trajetórias de subida ou descida, a velocidade e a força do impacto serão insuficientes para provocarem danos mecânicos de grandes proporções; 2. Projeto de montagem do sistema de elevação dos <i>racks</i> das fontes: - Simples e confiável de acionamento pneumático; - Os <i>racks</i> deslizam, para cima e para baixo, guiados por dois cabos em aço inoxidável AISI 304 esticados e - Os <i>racks</i> são protegidos por dois painéis em alumínio, com estrutura em aço inoxidável, resistentes ao impacto (<i>shroud</i>).
8	Durante o transporte	- Danos extremos no embalado de transporte tipo B, como resultado de riscos naturais ou colisão; - Segurança imprópria do embalado e - Dano intencional ou remoção das fontes de ^{60}Co.	1. Projeto do embalado de transporte tipo B: - O embalado de transporte é projetado e certificado, conforme Norma da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA, para o transporte seguro de materiais radioativos ³⁷. O embalado deve ser capaz de suportar as condições severas de acidentes, postulados pela AIEA, mantendo-se a blindagem suficientemente intacta, para evitar expor o público à radiação ionizante.
9	Durante o carregamento das fontes	- Perda de controle do embalado de transporte tipo B, durante o manuseio e - Danos nas fontes radioativas de ^{60}Co, durante a instalação.	1. Procedimento de carregamento: - Durante o carregamento das fontes de ^{60}Co no irradiador multipropósito, os parafusos da tampa (<i>plug</i>) do embalado não são removidos, até que o mesmo esteja segura no fundo da piscina. Isto assegura que o embalado resistirá à queda, até o fundo da piscina, no caso de falha total dos cabos em aço de içamento do embalado ¹².

10	Em produtos ou equipamentos retirados do irradiador	- Provocado pela não detecção dos danos, nas fontes de ^{60}Co; - Não detecção de contaminação radioativa superficial no embalado e - Como resultado da destruição dos <i>racks</i> de fontes, na câmara de irradiação, por um ato violento.	1. Monitoração da radiação na saída dos produtos: - Um detector de radiação tipo Geiger-Müller está instalado na saída dos produtos da porta giratória. Se o nível de radiação na vizinhança aumentar acima do <i>background</i> ($2 \mu\text{Sv/h}$), alarmes sonoros e visuais farão com que o sistema de transporte dos produtos pare imediatamente, fornecendo uma indicação de falha no painel eletro-eletrônico, do sistema de segurança e intertravamento. Isto evitará que qualquer material radioativo seja transportado para fora da câmara de irradiação e 2. Projeto do irradiador multipropósito: - O irradiador é dotado de sistema anticolisão. Qualquer produto ou mesmo as caixas em alumínio (<i>tote boxes</i>) do sistema de transporte, que estiverem em rota de colisão com o painel de proteção dos <i>racks</i> de fontes (<i>shroud</i>), acionará primeiramente um sensor, o qual desligará automaticamente o sistema de transporte dos produtos e recolherá os <i>racks</i> de fontes para dentro da piscina.
11	Em pessoas saindo do irradiador	- Modo de falha idem ao anterior, porém transferida as pessoas.	1. Caso ocorra um cenário de exposição à radiação é improvável que uma pessoa possa chegar perto da fonte de ^{60}Co, deixada sozinha inadvertidamente. Os procedimentos de segurança radiológica, previamente estabelecidos serão seguidos rigorosamente, pela equipe de radioproteção do irradiador.
12	Na água da piscina	- Liberada pelo embalado de transporte tipo B, com contaminação radioativa superficial;	1. Monitoração da radiação no deionizador: - Um detector de radiação tipo Geiger-Müller está instalado no leito das resinas do deionizador, para monitorar a contaminação da água da piscina; - Se for detectado nível de radiação acima do <i>background</i> ($2 \mu\text{Sv/h}$), alarmes sonoros e visuais serão acionados, a bomba de recirculação de água da piscina será desligada e o irradiador não será habilitado, para operação;

		- Danos nas cápsulas de <i>Zircaloy</i> e aço inoxidável AISI 316L, as quais contém as fontes radioativas de ^{60}Co e - No sistema de filtração.	2. Fonte de ^{60}Co: - O cobalto é um material metálico insolúvel e resistente à corrosão, na água e no ar. O projeto de fabricação das cápsulas utilizadas nos irradiadores gama, requer que o ^{59}Co seja 99,98% puro, sendo recoberto por uma camada de níquel e, em seguida, encapsulado em uma cápsula de metal <i>Zircaloy</i>. Essas cápsulas são seladas novamente em cápsula em aço inoxidável AISI 316L. Portanto, antes que a oxidação do ^{60}Co ocorra, três barreiras devem ser ultrapassadas; - O ^{60}Co metálico é insolúvel em água, portanto, apresenta menos risco de contaminação, se qualquer uma de suas cápsulas for rompida e 3. Sistemas de refrigeração e tratamento de água da piscina: - O deionizador, o resfriador (<i>chiller</i>) e a piscina constituem um circuito fechado de água. Na eventualidade de uma contaminação, esta ficará contida dentro desses sistemas. Uma vez que a fonte de contaminação radioativa possa ser localizada e contida, a piscina será limpa pela ação do deionizador. Os resíduos (resinas) do deionizador serão dispostos como resíduo radioativo.
13	Na superfície do embalado de transporte das fontes	- Contaminação radioativa transferida por meio da água da piscina e - Contaminação radioativa transferida pelo meio ambiente.	1. Testes de contaminação: - A presença de contaminação radioativa é verificada, interna e externamente, no embalado de transporte tipo B, antes do carregamento das fontes de ^{60}Co pelo fabricante, antes do embarque do embalado no contêiner marítimo e antes do descarregamento das fontes no irradiador; - Antes do embalado de transporte tipo B ser colocado na piscina, verifica-se a contaminação radioativa superficial do mesmo (teste de esfregaço), além da água da piscina, por meio do detector Geiger-Müller instalado no leito das resinas e - O embalado de transporte tipo B é monitorado, quanto a existência de

			contaminação, quando retirado da piscina.
14	Liberado do interior da cavidade do embalado de transporte	- Cavidade do embalado de transporte tipo B contaminada, no carregamento inicial.	1. Testes de contaminação: - A presença de contaminação radioativa é verificada, interna e externamente, no embalado de transporte tipo B, antes do carregamento das fontes de ^{60}Co pelo fabricante, antes do embarque do embalado no contêiner marítimo e antes do descarregamento das fontes no irradiador e - Após teste de esfregação e antes do embalado ser colocada dentro da piscina, um teste de fuga (<i>flushing test</i>) é realizado nas fontes seladas de ^{60}Co, para prevenir qualquer chance de contaminação da piscina.

2.7 – CERTIFICAÇÕES E LICENCIAMENTOS DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO

Por ser uma Instalação Radiativa que exige critérios rigorosos de projeto, controle, segurança, intertravamento e proteção radiológica, o irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto do IPEN-CNEN/SP necessita de certificações e licenciamentos, para aprovação prévia, construção, importação de material radioativo e operação, junto às seguintes Instituições no País:

- Comissão Nacional de Energia Nuclear, Coordenação Geral de Licenciamento e Controle – CGLC/CNEN;
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB e
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA.

2.7.1 - Certificação do Irradiador Multipropósito junto à CGLC/CNEN

2.7.1.1 - Relatório de Análise de Segurança – Aprovação Prévia

O Relatório de Análise de Segurança – Aprovação Prévia apresenta à CGLC/CNEN, as informações do projeto, necessárias à aprovação do local de construção e implantação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, por meio dos estudos ¹²⁻¹⁴:

- Descrição Geral da Instalação Radiativa;
- Características Gerais de Projeto e de Operação da Instalação Radiativa;
- Comparações com Projetos das Instalações Semelhantes no Mundo;
- Identificação do Requerente, dos Responsáveis pela Instalação e dos Contratados Principais;
- Características e Descrição do Local da Instalação;
- Demografia e Geografia - Localização, Densidade e Distribuição Populacional e Uso do Solo, Águas e Terras Adjacentes;
- Utilização das Cercanias da Instalação Radiativa - Instalações Militares, Industriais, Hospitalares, Comerciais e Meios de Transporte (Rodovias, Ferrovias e Aeroportos);
- Meteorologia - Climatologia Regional, Descrição Topográfica da Região Metropolitana de São Paulo, Clima Geral, Variações Sazonais das Condições Meteorológicas, Meteorologia do Local e Eventos Meteorológicos Extremos;
- Hidrologia - Águas Superficiais (Canais, Rios e Reservatórios) e Subterrâneas;
- Geologia e Sismologia - Geologia Regional e Local, Geomorfologia, Sismologia, Falhas Recentes e Ativas, Engenharia Geotécnica, Características Geológico-Geotécnicas Locais, Estabilidade Geológica Local, Estabilidade de Taludes, Potencial de Liquefação e Sondagem a Percussão no Local de Interesse;
- Eventos Externos Naturais e Induzidos pelo Homem Considerados como Base de Projeto da Instalação - Fenômenos de Origem Natural (Terremotos, Inundações, Tornados, Furacões, Tempestades e Descargas Elétricas) e Fenômenos de Origem Antrópica (Quedas de Aeronaves, Fogos, Explosões e Derramamento de Produtos Tóxicos);

- Estudo de Impacto Ambiental Radiológico - Liberação de Material Radioativo para o Meio Ambiente, Programa de Monitoração Ambiental (Metodologia de Coleta, Medida, Lençol Freático e Precipitação Direta no Meio Ambiente) e Níveis de Exposição à Radiação Ionizante nas Cercanias do Irradiador Multipropósito e
- Conclusão.

2.7.1.2 - Relatório de Análise de Segurança – Licença de Construção

O Relatório de Análise de Segurança – Licença de Construção apresenta à CGLC/CNEN, as informações necessárias à construção e implantação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, por meio dos estudos ¹²⁻¹⁴:

- Introdução;
- Qualificações Técnicas dos Responsáveis pela Construção;
- Descrição e Análise da Instalação, com Atenção Especial as Características de Projeto e Operação;
- Descrição Geral da Instalação - Justificativa para Utilização do Irradiador Multipropósito, Capacidade da Instalação e Grupos de Itens de Segurança e Intertravamento, Apoio e Instalações Complementares;
- Arranjo Físico da Planta de Irradiação;
- Itens de Segurança da Instalação - Prédio do Irradiador/Blindagem Radiológica, Piscina de Armazenagem de Fontes, Mecanismo de Suporte e Exposição das Fontes, Controle de Acesso às Fontes de Radiação e Sistema de Intertravamento, Monitores de Radiação, Sistema de Combate a Incêndio, Sistemas de Controle de Processo e Segurança, Fontes Radioativas Seladas, Unidade de Tratamento de Água, Sistema de Resfriamento da Água da Piscina, Sistema de Ar Comprimido e Sistema de Alimentação de Energia Elétrica (Função de Segurança, Bases e Descrição do Projeto, Análise de Segurança, Redundância, Independência e Diversidade);
- Itens de Apoio da Instalação – Sistema de Ventilação (Função de Segurança, Bases e Descrição do Projeto, Análise de Segurança, Redundância, Independência e Diversidade);

- Análise Preliminar e Avaliação do Projeto e Desempenho de Estruturas, Sistemas e Componentes da Instalação, com objetivo de Avaliar os Aspectos de Radioproteção (Segurança Passiva – Estimativa da Taxa de Dose pelo Espalhamento na Folga da Porta Giratória, Penetrações na Câmara de Irradiação e Otimização das Blindagens e Segurança Ativa);
- Procedimentos Administrativos a Serem Adotados Durante a Construção (Programa de Garantia da Qualidade do Centro de Tecnologia das Radiações - CTR);
- Planos Preliminares para Procedimentos em Situações de Emergência;
- Descrição dos Sistemas de Controle de Liberação de Efluentes e Rejeitos Radioativos;
- Relação de Normas Técnicas e Publicações Adotadas;
- Plano Preliminar de Proteção Física;
- Plano Preliminar de Radioproteção e
- Relatório do Sistema de Proteção contra Incêndio.

2.7.1.3 - Relatório de Análise de Segurança – Autorização para Operação

O Relatório de Análise de Segurança – Autorização para Operação apresenta à CGLC/CNEN, as informações necessárias à operação rotineira do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, por meio dos estudos ¹²⁻¹⁴:

- Introdução e Descrição Geral da Instalação;
- Projeto Final da Instalação - Memorial Descritivo, Características Técnicas e Operacionais, Bases de Projeto, Função de Segurança, Desenhos Especificações Técnicas e Manuais de Operação e Manutenção para Blindagem Radiológica, Piscina de Armazenamento das Fontes, Mecanismo de Suporte e Exposição das Fontes, Controle de Acesso às Fontes de Radiação e Sistema de Intertravamento, Monitores de Radiação, Sistema de Combate a Incêndio, Sistema de Segurança e Intertravamento, Fontes Radioativas Seladas, Unidade de Tratamento e Sistema de Resfriamento da Água da Piscina, Sistema de Ar Comprimido, Sistema de Alimentação Elétrica, Sistema de Ventilação, Sistema de Transporte, Edificações da Sala de Máquinas e Sala de Controle e Instalações Complementares;

- Organização do Pessoal Envolvido na Operação da Instalação - Organograma Funcional e Memorial Descritivo das Atribuições e Responsabilidades Funcionais;
- Procedimento para Treinamento de Pessoal na Instalação Radiativa;
- Procedimentos para Condução das Operações - Monitoração Radiológica, Calibração e Controle de Equipamentos de Radioproteção e Testes dos Sistemas de Controle de Processo, Segurança e Intertravamento, Manual de Manutenção do Irradiador Multipropósito, Entrada na Câmara de Irradiação, Operação do Irradiador Multipropósito, Teste de Esfregaço para Detecção de Contaminação Radioativa Superficial, Detecção de Vazamentos das Fontes Radioativas Seladas, Recebimento, Carregamento e Substituição das Fontes Radioativas da Embalagem de Transporte Tipo B, Modelo F-168 da *MDS Nordion Ion Technologies*;
- Procedimentos Administrativos a Serem Aplicados Durante a Operação - Programa de Garantia da Qualidade (Operação Rotineira, Organização Geral de Documentos e Procedimentos de Garantia da Qualidade);
- Plano de Emergência;
- Plano de Proteção Física e
- Plano de Radioproteção.

2.7.1.4 - Plano de Transporte – Autorização para o Transporte de Material Radioativo

O Plano de Transporte ou Autorização para o Transporte de Material Radioativo – AT apresenta à CGLC/CNEN, os procedimentos de radioproteção e segurança no transporte das fontes radioativas seladas de cobalto-60, sob forma especial, para o irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. Além disso, estabelece as responsabilidades e requisitos administrativos ao transporte rodoviário seguro das fontes radioativas de cobalto-60, desembarcadas no Porto de Santos, Estado de São Paulo, provenientes do fabricante, a *MDS Nordion Ion Technologies* – Canadá, por meio dos estudos:

- Especificação do Material a ser Transportado - Descrição, Identificação, Certificado, Quantidade, Fornecedor e Fabricante das Fontes Radioativas Seladas de Cobalto-60;

- Descrição, Quantidade e Fornecedor do Contêiner de Transporte - Cópia do Certificado da Embalagem de Transporte Tipo B, Modelo F-168 da *MDS Nordion Ion Technologies*;
- Descrição do Veículo de Transporte;
- Descrição da Equipe de Transporte e do Serviço de Radioproteção - Cópias dos Documentos dos Motoristas Habilitados para Transporte de Produtos Perigosos;
- Procedimentos Relativos ao Transporte - Rotulagem de Risco de Radiação;
- Documentação para Transporte - Envelope de Transporte, Ficha de Monitoração de Carga e Veículo, Pannel de Segurança e Identificação da Classe do Material Perigoso, Formulário de Checagem de Embarque, Ficha de Emergência;
- Previsão para o Transporte;
- Percurso do Transporte - Mapas e Descrição das Rotas Principal e Alternativa;
- Requisitos e Responsabilidades do Expedidor e do Transportador - Declaração do Expedidor de Material Radioativo – ONU 2916-77 – Classe 7;
- Equipamentos, Detectores de Radiação, Materiais para Situações de Emergência e Veículos a Serem Utilizados;
- Escolta para o Transporte e
- Documentos de Referência e Normas Aplicáveis.

2.7.2 - Licenciamento do Irradiador Multipropósito junto à CETESB

O Memorial de Caracterização do Empreendimento – MCE e Solicitação de Certificado de Dispensa de Licença de Instalação, apresenta informações do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto à CETESB, por meio dos estudos:

- Informações Cadastrais - Identificação, Atividades, Áreas, Período de Produção, Número de Funcionários, Coordenadas Geográficas, Localização Hidrográfica e Responsável pelo Empreendimento;
- Relação das Principais Matérias-Primas - Descrição, Quantidade Média Anual e Forma de Estocagem;
- Relação dos Produtos - Descrição, Quantidade Média Anual e Forma de Estocagem;
- Fluxograma do Processo;

- Desenho de Localização - Usos das Construções e Áreas Existentes, Cursos D'água Constantes ou Adjacentes a Área;
- Relação e Disposição Física das Máquinas e Equipamentos - Descrição, Quantidade, Potência e Capacidade Nominal;
- Combustíveis Sólidos, Líquidos e Gasosos Utilizados para Queima no Processo Industrial, Operações Secundárias e Geração de Vapor e Energia;
- Informações sobre Chaminés - Temperatura dos Gases, Vazão, Teor de Oxigênio, Altura, Área Interna, Distância do Receptor, Poluentes e Emissões;
- Fontes de Poluição do Ar - Processo, Fonte, Material, Teor de Enxofre, Período de Funcionamento, Fonte e Emissão Potencial da Fonte;
- Equipamentos de Controle de Poluição do Ar - Processo, Fonte e Equipamentos;
- Balanço Hídrico - Captação, Usos, Incorporação de Água ao Produto, Perdas, Águas Subterrâneas, Pontos de Lançamento de Efluentes;
- Efluentes Líquidos - Despejo, Vazão e Disposição Final;
- Resumos dos Lançamentos - Despejo, Efluente, Concentrações e Unidades de Tratamento;
- Resíduos Sólidos - Descrição, Origem, Estado Físico, Quantidade Anual, Composição e Aspecto Geral;
- Armazenamento e Tratamento/Disposição Final dos Resíduos Sólidos e
- Fontes de Poluição por Ruído - Fonte, Período de Funcionamento, Equipamento e/ou Ações de Controle.

Além do Memorial de Caracterização do Empreendimento – MCE e Solicitação de Certificado de Dispensa de Licença de Instalação, o Relatório de Caracterização do Empreendimento, apresenta informações complementares do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto à CETESB, por meio dos estudos:

- Considerações Gerais - Implantação do Irradiador Multipropósito no IPEN-CNEN/SP e no Estado de São Paulo e seu Representante Legal;
- Descrição do Processo de Esterilização e da Irradiação de Alimentos, Utilizando a Radiação Ionizante;
- Descrição Geral da Instalação;
- Características Gerais de Projeto e de Operação da Instalação - Capacidade da Planta, Fontes de Cobalto-60, *Racks*, Mecanismo de Exposição e Piscina de Armazenamento,

Blindagem Radiológica e Sistemas de Controle de Processo, Segurança e Intertravamento – Indicação de Condições de Operação e Falhas, Monitoração da Radiação e Registro de Dados;

- Comparação com Projetos das Instalações Semelhantes;
- Características e Descrição do Local da Instalação - Demografia e Geografia – Localização, Densidade e Distribuição Populacional e Uso do Solo, Águas e Terras Adjacentes;
- Utilização das Cercanias da Instalação Radiativa - Instalações Militares, Industriais, Hospitalares, Comerciais e Meios de Transporte – Rodovias, Ferrovias e Aeroportos;
- Hidrologia – Águas Superficiais (Canais, Rios e Reservatórios) e Subterrâneas e
- Estudo de Impacto Ambiental Radiológico - Liberação de Material Radioativo e Taxa de Dose de Radiação para o Meio Ambiente, Radiação de Fundo (*Background*) e Radioatividade Natural da Água, Despejos Líquidos e Resíduos Sólidos Convencionais.

2.7.3 - Licenciamento Ambiental para o Transporte de Material Radioativo junto ao IBAMA

O Plano de Transporte tem por objetivo solicitar o Licenciamento Ambiental, ou seja, a Licença de Operação – LO junto ao IBAMA, para o transporte das fontes radioativas seladas de cobalto-60, desembarcadas no Porto de Santos/SP, provenientes da *MDS Nordion Ion Technologies* – Canadá, para o irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. A rota rodoviária principal até o IPEN-CNEN/SP já é conhecida e aprovada pelo IBAMA. Todos os carregamentos de cobalto-60, transportados para as empresas privadas Empresa Brasileira de Radiações – EMBRARAD (Cotia/SP) e Companhia Brasileira de Esterilização – CBE (Jarinu/SP) passam pela Cidade Universitária/SP, na qual está localizado o IPEN-CNEN/SP.

A Licença de Operação – LO do IBAMA, estabelece as responsabilidades e requisitos administrativos ao transporte rodoviário seguro das fontes radioativas de cobalto-60, por meio dos estudos:

-
- Objetivo - Autorização para o Transporte de Material Radioativo da CNEN;
 - Campo de Aplicação - Avisos de Licença (Diário Oficial da União e Diário de São Paulo);
 - Memorial Descritivo das Atribuições e Responsabilidades Funcionais - Organogramas do IPEN-CNEN/SP e CTR;
 - Descrição Geral do Irradiador Multipropósito - Certificado de Dispensa de Licença de Instalação da CETESB e Aprovação Prévia e Licença de Construção da CNEN;
 - Especificação do Material a ser Transportado - Descrição, Identificação, Certificado, Quantidade, Fornecedor e Fabricante das Fontes Radioativas Seladas de Cobalto-60;
 - Descrição, Quantidade e Fornecedor do Contêiner de Transporte - Desenho Técnico e Cópia do Certificado da Embalagem de Transporte Tipo B, Modelo F-168 da *MDS Nordion Ion Technologies*;
 - Descrição do Veículo de Transporte;
 - Descrição da Equipe de Transporte e do Serviço de Radioproteção - Cópias dos Documentos dos Motoristas Habilitados para Transporte de Produtos Perigosos;
 - Procedimentos Relativos ao Transporte - Rotulagem de Risco de Radiação;
 - Documentação para Transporte - Envelope de Transporte, Ficha de Monitoração de Carga e Veículo, Painel de Segurança e Identificação da Classe do Material Perigoso, Formulário de Checagem de Embarque, Ficha de Emergência;
 - Previsão para o Transporte;
 - Percurso do Transporte - Mapas e Descrição das Rotas Principal e Alternativa e Mapas Planialtimétricos das Regiões de Santos/SP, Riacho Grande/SP e São Paulo/SP;
 - Requisitos e Responsabilidades do Expedidor e do Transportador - Declaração do Expedidor de Material Radioativo – ONU 2916-77 – Classe 7;
 - Equipamentos, Detectores de Radiação, Materiais para Situações de Emergência e Veículos a Serem Utilizados;
 - Escolta para o Transporte e
 - Documentos de Referência e Normas Aplicáveis.

2.8 - APLICATIVO PARA SIMULAÇÃO DE DOSES EM SISTEMAS DE IRRADIAÇÃO GAMA - *CADGAMMA*

O *Cadgamma*, software em Linguagem C⁺⁺, para ser utilizado em ambiente Windows95[®] ou versão superior, foi desenvolvido como contribuição de uma Dissertação de Mestrado, no Centro de Tecnologia das Radiações – CTR, do IPEN-CNEN/SP ³⁸. Tem como princípio, a fragmentação da fonte em elementos finitos e a avaliação da sua participação na formação das doses nos pontos estudados, considerando-se a presença de outros materiais no caminho dos raios gama, os quais atingem esses pontos.

A técnica é conhecida como *Point Kernel Calculation* ^{39,40}. Na Figura 24 é mostrado o método de cálculo da dose em um ponto, o qual está dentro de uma caixa em alumínio com os produtos, no irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP. A soma das contribuições das transmissões dos raios gama, decorrentes de cada fração de um lápis de ⁶⁰Co e atenuações provocadas pelos materiais do sistema de proteção dos *racks* de fontes (*shroud*) e das caixas com os produtos, interferem parcialmente na dose recebida pelo ponto em estudo.

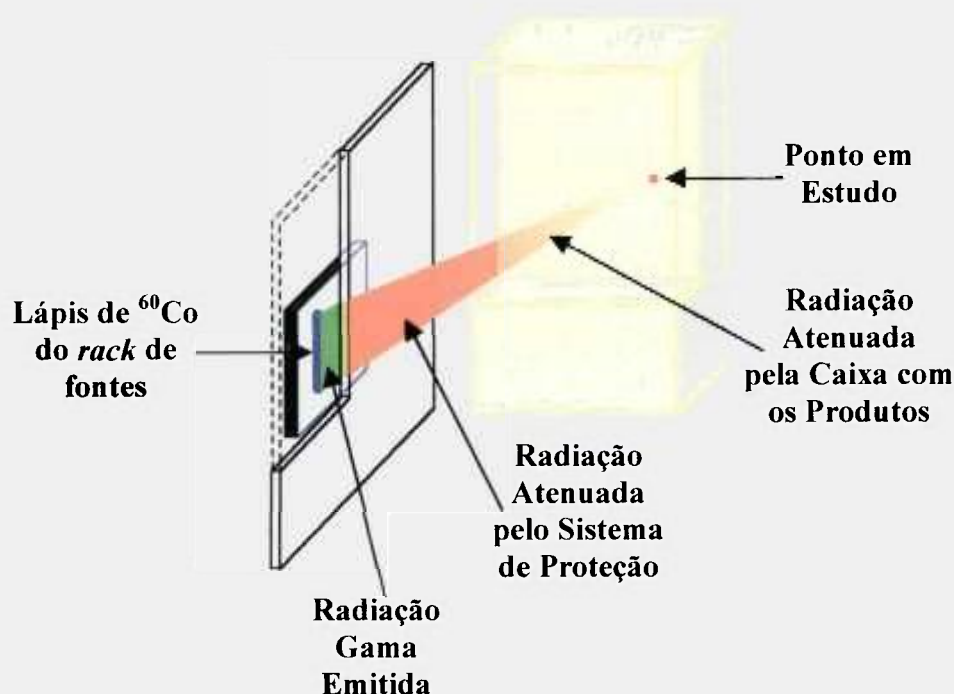


FIGURA 24 – Esquema simplificado do cálculo da dose em um ponto em estudo, somando-se as contribuições das transmissões dos raios gama, da fração de um lápis de ^{60}Co e as atenuações provocadas pelos materiais existentes no percurso.

No *Cadgamma*, a influência de cada fração do lápis de ^{60}Co é avaliada com base em cálculos de transmissão dos raios gama, pelos vários materiais que interferem no percurso, com a utilização dos fatores de *buildup* (curvas de equilíbrio eletrônico), baseados em Tabelas publicadas pelo *Oak Ridge National Laboratory – ORNL/USA* ⁴¹. Assim, o *Cadgamma* adota valores de *buildup* mais precisos, quando comparados aos obtidos por meio de fórmulas, publicadas em trabalhos científicos ⁴².

O *Cadgamma* pode considerar, além das interferências entre caixas com os produtos, as interferências existentes na câmara de irradiação do irradiador multipropósito, tais como: sistema de transporte, sistema de proteção dos racks de fontes (*shroud*), entre outras estruturas que possam interferir nas doses em cada ponto estudado. Outra possibilidade oferecida pelo *Cadgamma* é o cálculo das doses nas caixas com os produtos, em regiões de densidades diferentes. Isso possibilita calcular também a influência dos materiais das caixas de transporte ou até das embalagens dos produtos, na dose calculada.

A principal vantagem do *Cadgamma* é ser totalmente dedicado a irradiadores gama industriais, com cobalto-60, melhorando-se a performance do irradiador, no processamento dos produtos. O programa permite a visualização das simulações, por meio da geração de gráficos, mostrando as curvas de isodose. Possibilita planejar, distribuir e otimizar a configuração dos lápis de ^{60}Co nos magazines e o posicionamento destes no(s) *rack(s)* de fontes, visando uma melhor uniformidade de doses, maior capacidade de processamento anual ou ainda, maior flexibilidade com o mínimo de perdas dos raios gama, nas irradiações de materiais com densidades muito diferentes.

A determinação dos pontos de dose máxima e mínima no produto e a distribuição das doses no volume do produto pelo *Cadgamma*, permitem uma considerável redução nos custos operacionais do irradiador, reduzindo-se o número de mapeamentos dosimétricos necessários, quando há mudança nas características do produto a ser irradiado, fato comum nos irradiadores multipropósitos.

Assim, o *Cadgamma* foi fundamental nesta tese, para desenvolver e otimizar o sistema de irradiação do irradiador multipropósito tipo compacto do IPEN-CNEN/SP, mantendo-se as doses dentro dos limites especificados nos materiais, com o menor desperdício de radiação ionizante e com os melhores fatores de uniformidade de dose e eficiência, para produtos com diferentes densidades, definindo-se:

- Sistema de transporte - *tote box*, *carrier* ou *pallet*;
- Geometria de irradiação - *product overlap source* ou *source overlap product*;
- Configurações e processos de irradiação - contínuo ou semi-contínuo, simples ou duplo empilhamento de caixas;
- Rota de passagem dos produtos pelas fontes radiativas (número de passes) e
- Distribuição e atividade das fontes radioativas nos *racks*, entre outros aspectos.

2.9 - PROGRAMA DE VALIDAÇÃO E CONTROLE DE ROTINA DO PROCESSO

O Programa de Qualificação do Processo e da Instalação Radiativa, baseou-se na Norma Internacional AAMI/ISO 11137, a qual define o Programa de Validação e Controle

de Rotina, para o processo de radioesterilização de produtos médicos – cirúrgicos. As exigências específicas do programa de validação e controle são apresentadas na Figura 25 ⁴³.

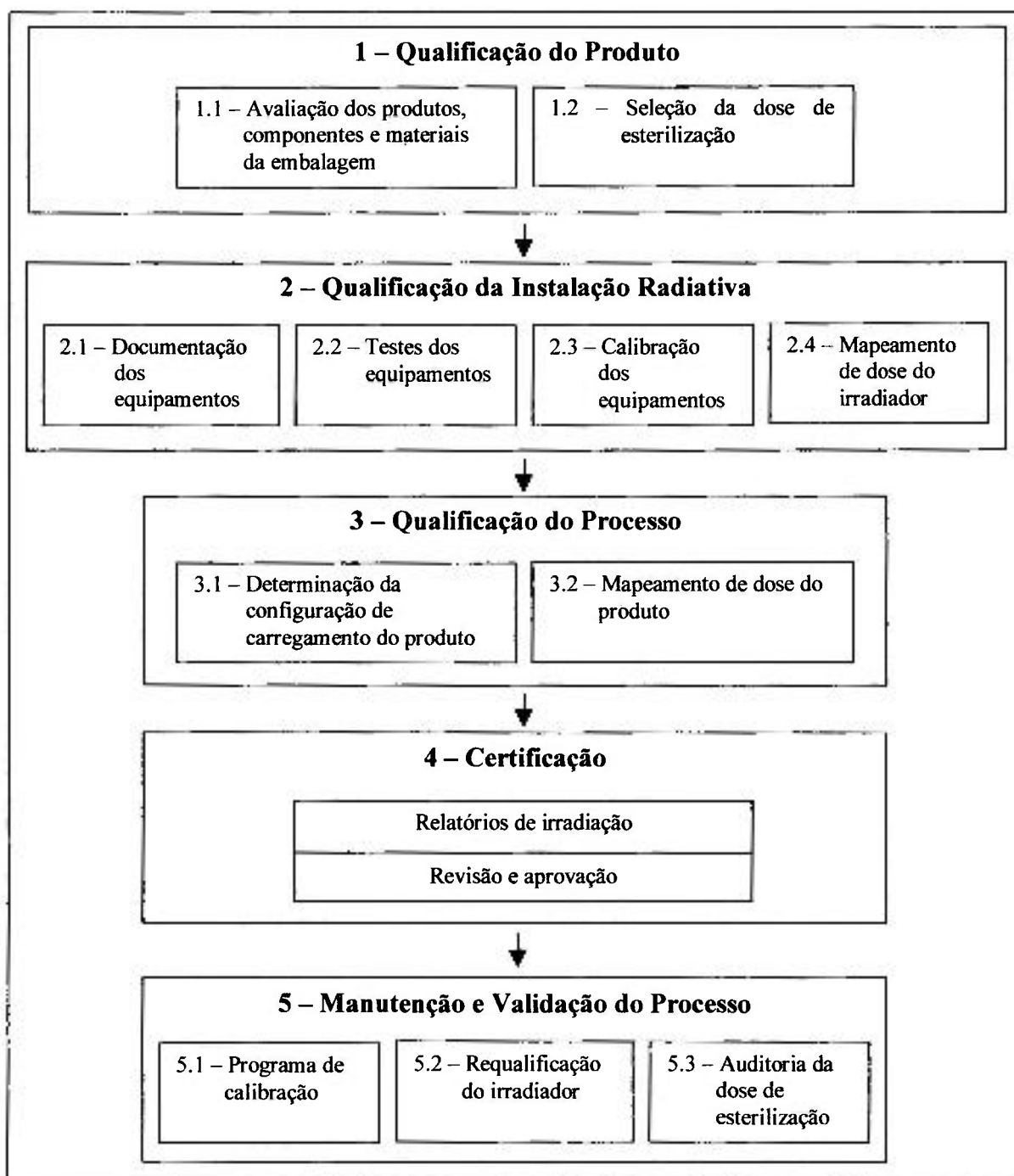


FIGURA 25 – Programa de Validação e Controle de Rotina do Processo de Radioesterilização, em conformidade com a Norma Internacional AAMI/ISO 11137 ⁴³.

O Programa de Qualificação do Processo e do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com o sistema de irradiação desenvolvido neste trabalho, constitui-se nos seguintes itens apresentados na Figura 25:

- Controle da documentação, testes e calibração dos equipamentos;
- Mapeamento de dose do irradiador;
- Determinação da configuração de carregamento do produto e
- Mapeamento de dose no produto.

2.9.1 - Qualificação da Instalação Radiativa

2.9.1.1 - Documentação dos Equipamentos

Toda documentação pertinente à descrição e operação do irradiador multipropósito deve ser mantida durante a vida útil da instalação radiativa:

- Características e especificações técnicas do irradiador;
- Descrição da planta do irradiador, com as áreas discriminadas para armazenamento dos produtos irradiados e não irradiados;
- Descrição da construção e operação do sistema de transporte dos produtos;
- Dimensões e materiais das caixas metálicas (*tote boxes*), do sistema de transporte dos produtos;
- Descrição dos procedimentos de operação do irradiador e sistema de transporte dos produtos;
- Modificações realizadas no irradiador e
- Certificados das fontes radioativas seladas de cobalto-60, suas atividades e localização nos *racks* de fontes;

Além disso, devem ser documentados os seguintes parâmetros críticos do processo, utilizados para controle e monitoração, na irradiação dos produtos:

- Tempo do ciclo de irradiação (*time setting*);
- Tempo de exposição ou velocidade do sistema de transporte dos produtos, no processamento por radiação e
- Dosimetria do irradiador e dos produtos.

2.9.1.2 - Testes dos Equipamentos

Os sistemas e equipamentos devem ser testados, verificando-se a operação satisfatória do irradiador multipropósito, confrontando-se os resultados com as especificações técnicas do projeto original. Os seguintes sistemas e equipamentos devem ser verificados e seus resultados documentados:

- Sistema de elevação dos *racks* de fontes;
- Sistema de transporte dos produtos;
- Sistema de segurança e intertravamento e
- Sistemas auxiliares (tratamento de água da piscina, exaustão, refrigeração, hidráulico e pneumático).

2.9.1.3 - Calibração dos Equipamentos

O programa de calibração e documentação garante que os equipamentos e sistemas dosimétricos estejam calibrados e possuem rastreabilidades nacional e internacional, em conformidade com o Norma ISO 9001:2000. Os equipamentos e sistemas a serem controlados e calibrados no irradiador multipropósito são:

- Cronômetro utilizado na determinação da velocidade do sistema de transporte e ciclos de irradiação;
- Balança utilizada no cálculo da densidade aparente dos produtos a serem processados;
- Sistema dosimétrico, incluindo espectrofotômetros, micrômetros e paquímetros e

- Sistema de elevação dos *racks* de fontes, a qual define o posicionamento das fontes radioativas em relação aos produtos.

2.9.1.4 - Mapeamento de Dose do Irradiador

O mapeamento de dose do irradiador multipropósito tem como objetivo caracterizá-lo em função da magnitude, distribuição e reprodutibilidade da dose fornecida pelas fontes radioativas de cobalto-60. Os seguintes procedimentos são adotados, no mapeamento de dose do irradiador:

- Os diferentes materiais utilizados no mapeamento de dose do irradiador devem ocupar completamente o volume interno das caixas metálicas (*tote boxes*), do sistema de transporte dos produtos. Além disso, esses materiais devem simular as faixas de densidade dos produtos a serem processados por radiação;
- Os dosímetros devem estar distribuídos dentro das caixas metálicas selecionadas, no sistema de transporte, obtendo-se uma resolução espacial no mapeamento de dose. Essas caixas devem estar rodeadas por caixas com a mesma distribuição interna de materiais, no que diz respeito às suas dimensões e densidades, simulando-se o carregamento completo do sistema de transporte na câmara de irradiação, determinando-se a reprodutibilidade de dose absorvida pelos produtos e
- Após a irradiação, os dosímetros são recolhidos, aferidos e analisados e os resultados documentados, registrando-se as zonas de dose máxima e mínima, a uniformidade de dose e o tempo do ciclo de irradiação (*time setting*).

2.9.2 - Qualificação do Processo

No controle de processo da Instalação Radiativa, nas fases de validação ou rotina, utiliza-se sistema dosimétrico para determinação da dose absorvida pelos produtos, constituído de dosímetros, instrumentação de medida e procedimentos para uso do sistema. Na seleção do sistema dosimétrico a ser utilizado, consideram-se¹⁰:

- Dosímetros com níveis conhecidos de acuracidade e precisão, respeitando-se suas faixas de dose ao limite de dose absorvida de interesse;
- Estabilidade e reprodutibilidade adequada do sistema de medida de dose;
- Sistema de fácil calibração, intercomparável e consistente com padrões nacionais e internacionais;
- Sistema de utilização simples e
- Aplicação de controles estatísticos apropriados e documentados.

2.9.2.1 - Determinação da Configuração de Carregamento do Produto

A distribuição dos produtos a serem processados por radiação, dentro das caixas metálicas (*tote boxes*), do sistema de transporte do irradiador é estabelecida e documentada, para cada tipo de produto, descrevendo-se:

- A embalagem do produto, dimensões, densidade e orientação do produto na mesma;
- Orientação das embalagem nas caixas metálicas do irradiador e
- As dimensões da caixa metálica do irradiador.

2.9.2.2 - Mapeamento de Dose no Produto

O mapeamento de dose no produto tem como objetivo identificar as zonas de dose máxima e mínima, assegurando-se a reprodutibilidade do processo, em função da densidade, dimensões e distribuição dos produtos, dentro da caixa metálica do sistema de transporte. Esta informação é utilizada para seleção dos locais de monitoração dosimétrica nos produtos, no controle de rotina do processo e na análise da uniformidade de dose absorvida pelos produtos (relação entre a dose máxima e mínima).

Na distribuição espacial de dose, os dosímetros devem ser posicionados nas prováveis áreas de dose máxima e mínima, na caixa metálica de irradiação com os produtos, necessitando-se um menor número de dosímetros nas regiões de doses

absorvidas intermediárias. Além disso, o número de caixas metálicas com produtos deve ser representativo, ocupando-se o maior número de posições possíveis no sistema de transporte, na câmara de irradiação.

2.10 - ANÁLISE ECONÔMICA DOS IRRADIADORES GAMA DE COBALTO-60

Na análise econômica dos irradiadores gama de cobalto-60 são considerados os seguintes parâmetros financeiros, na obtenção dos custos operacionais total e unitário e custos de processamento unitários, dos diferentes produtos e densidades, por radiação ionizante ^{1,30,31}:

- Custos de investimento inicial e
- Custos operacionais fixos e variáveis.

2.10.1 - Custos de Investimento Inicial

Nos custos de investimento inicial são considerados todos os gastos envolvidos nas fases de projeto, construção e implantação dos irradiadores gama de cobalto-60, até os testes pré-operacionais. Os gastos com o terreno não são considerados, pois dependem significativamente da região de instalação da planta de irradiação:

- Projeto de engenharia (10% do investimento total, exceto as fontes de ^{60}Co) ³¹.
- *Liner* da piscina de armazenamento das fontes radioativas de ^{60}Co ;
- Blindagem radiológica e infra-estrutura de radioproteção;
- Materiais elétricos, eletrônicos, hidráulicos, mecânicos, pneumáticos e de construção civil, entre outros materiais de consumo;
- Máquinas, Sistemas e Equipamentos (tratamento de água da piscina, elevação dos *racks* de fontes, exaustão da câmara de irradiação, grupo motogerador, compressor de ar, empilhadeiras, bombas d'água, unidade hidráulica e ferramentas), entre outros materiais permanentes;
- Detectores de sismo e sensores de radiação;

- Sistema de transporte dos produtos;
- Sistemas de controle de processo, segurança e intertravamento;
- Montagem do sistema de transporte dos produtos, *liner* da piscina, caldeiraria e montagem dos materiais estruturais para blindagem radiológica, entre outros serviços de terceiros;
- Galpão de armazenamento dos produtos;
- Fontes radioativas de ^{60}Co ;
- Licenciamento da Instalação Radiativa, junto à CNEN, CETESB e IBAMA e
- Mão-de-obra especializada para construção e implantação da Instalação Radiativa.

2.10.2 - Custos Operacionais Fixos e Variáveis

Os custos operacionais dos irradiadores gama de cobalto-60 são divididos em custos fixos e variáveis.

2.10.2.1 - Custos Fixos

Os custos fixos permanecem inalterados, quando comparados ao volume de produção (volume de produtos processados por radiação ionizante), na Instalação Radiativa:

- Depreciação do irradiador gama (20 anos e taxa de juros de 5% ao ano, exceto as fontes radioativas de ^{60}Co) ³¹;
- Custo do capital investido (taxa de juros de 5% ao ano) ³¹ e
- Administrativos, tais como seguros e taxas (2% do custo do investimento total) ³¹.

2.10.2.2 - Custos Variáveis

Os custos variáveis estão diretamente relacionados ao volume de produção e a utilização da Instalação Radiativa:

- Decaimento radioativo das fontes de ^{60}Co (reposição de 12,34% da atividade total ao ano)³¹;
- Manutenção (3,5% do investimento total, exceto as fontes radioativas de ^{60}Co)³¹ e
- Mão-de-obra direta, com encargos trabalhistas, nos turnos de trabalho.

3 – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto do IPEN-CNEN/SP, no qual foi desenvolvido e implantado o sistema de irradiação proposto neste trabalho foi projetado para operar com capacidade máxima de 74 PBq (2 MCi). A Instalação Radiativa foi Certificada e Licenciada, junto à CGLC/CNEN, CETESB e IBAMA.

Para a construção e implantação do sistema de irradiação e do próprio irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, analisaram-se os seguintes itens ^{9,12-14,39-42,44-47}:

- Tipos de fontes radioativas seladas industriais de cobalto-60;
- Piscina de armazenamento das fontes radioativas;
- Mecanismo de suporte e exposição das fontes radioativas;
- Porta de concreto giratória para entrada e saída dos produtos a serem processados;
- Porta de concreto deslizante, para montagem e manutenção da instalação e do sistema de transporte dos produtos;
- Blindagem radiológica de concreto;
- Controle de acesso e intertravamento;
- Geometria, dimensões e número de *racks* de fontes de cobalto-60;
- Geometria e processo de irradiação (*product overlap source* ou *source overlap product*, contínuo ou semicontínuo, simples ou duplo empilhamento de caixas);
- Detector de sismo e sensores de radiação;
- Capacidade e dimensões da câmara de irradiação;
- Produtos a serem processados;
- Doses absorvidas e tempo de irradiação;
- Dimensões, volume e capacidade máxima das caixas de transporte dos produtos;
- Capacidade anual de processamento da planta radioativa;
- Sistema de combate a incêndio;
- Sistemas de controle de processo, segurança e intertravamento;

- Unidades de tratamento e refrigeração da água da piscina;
- Sistema de ar comprimido;
- Sistema de alimentação de energia elétrica e grupo motogerador;
- Sistema de exaustão;
- Sistema de transporte de produtos (*tote box*, *carrier* ou *pallet*) e
- Edificações da sala de máquinas, sala de controle, almoxarifado e área de armazenamento dos produtos.

Para cada item mencionado no projeto do irradiador mutipropósito, com o sistema de irradiação desenvolvido nesse trabalho, definiu-se a função de segurança, as bases do projeto, a descrição do projeto, a análise de segurança e a redundância, diversidade e independência dos sistemas, mecanismos ou unidades da instalação radiativa, quando aplicável.

3.1 – CARACTERÍSTICAS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP

A piscina para armazenamento das fontes radioativas de cobalto-60 foi construída em concreto armado e internamente revestida em aço inoxidável AISI 304. Todas as chapas em aço inoxidável foram soldadas entre si formando um *liner*, com massa total de 4 toneladas. As soldas à prova de vazamento foram inspecionadas por líquido penetrante. O *liner* possui tubulações apenas na sua parte superior, impossibilitando o vazamento de água, no caso do rompimento de uma das tubulações. Na Figura 26 é mostrada a escavação da piscina e a instalação do *liner*.

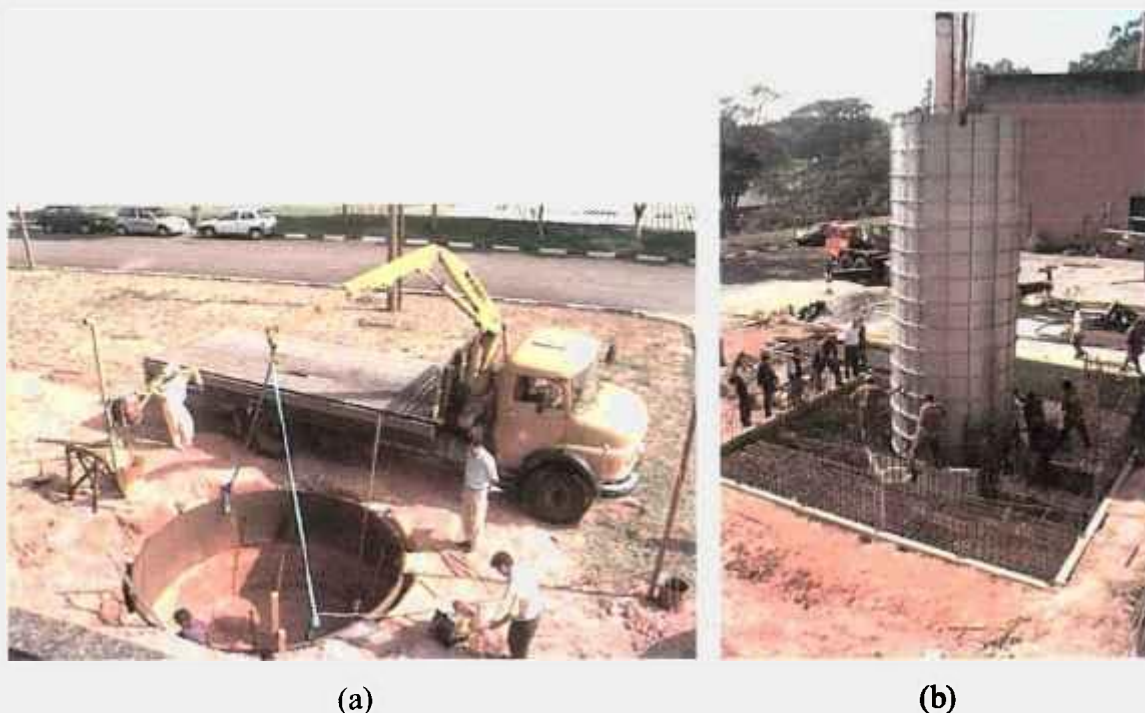


FIGURA 26 – Construção da piscina em concreto armado, para armazenamento das fontes radioativas de cobalto-60, no irradiador multipropósito: (a) escavação da piscina e (b) posicionamento do *liner*.

Na Figura 27 são mostradas as armações e as formas permanentes em aço carbono, as quais foram utilizadas na construção das paredes e lajes em concreto, da câmara de irradiação (*bunker*), do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto do IPEN-CNEN/SP. O item 545 da *IAEA Safety Series n. 107 – Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities*, estabelece que as blindagens radiológicas dos irradiadores gama de cobalto-60, categoria IV, devem ser projetadas para manterem sua integridade para o *Design Basis Earthquake* ou Sismo Básico de Projeto, o qual corresponde ao sismo de máxima intensidade, com probabilidade de ocorrência no local da instalação¹².

Os registros históricos de sismos no raio de 100 km do local do irradiador multipropósito atingiram no máximo a intensidade VI na escala Mercalli Modificada (MM). Conforme orientação da publicação *IAEA Technical Reports Series n. 348* e, de modo bastante conservador, adotou-se como base de projeto uma intensidade de sismo na faixa entre VII MM e VIII MM (5 a 6 graus na escala Richter), para o limite inferior no dimensionamento da instalação, com inventário limitado de material radioativo. Assim, sob a ação de um sismo, a estrutura não deve sofrer colapso e a piscina deve manter a sua integridade, sem vazamento. A partir da avaliação geotécnica, elaborada pela empresa

CONTEST, no Memorial de Cálculo Estrutural de Concreto Armado, adotou-se o valor da aceleração de projeto igual a 0,10 G ($0,98 \text{ m/s}^2$)⁴⁸.

Adotou-se como critério de projeto, para a estrutura de concreto do irradiador multipropósito, a possibilidade de ocorrência de tornados, classificados na escala F3 de Fujita, com ventos de 70 a 92 m/s (252 a 331 km/h), os quais provocam danos severos (telhados e paredes derrubadas, trens descarrilados e tombados, maioria das árvores arrancadas, carros levantados do chão e atirados). As forças dos ventos consideradas no projeto são definidas pela Norma Brasileira NBR 6123. A velocidade básica de projeto do vento considerada foi de 92m/s (331km/h)⁴⁹.



FIGURA 27 – Construção das paredes e lajes em concreto, da câmara de irradiação, do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP: (a) armações e (b) formas permanentes em aço carbono.

Na Figura 28 é mostrada a construção do galpão de armazenamento dos produtos, no qual utilizaram-se colunas pré-moldadas em concreto e vigas em aço carbono, para confecção do telhado.



(a)



(b)

FIGURA 28 – Construção do galpão de armazenamento dos produtos: (a) instalação das colunas pré-moldadas em concreto e das vigas em aço carbono, para confecção do telhado e (b) paredes em alvenaria e portas em aço carbono.

Na Figura 29 é mostrada a sala de máquinas do irradiador multipropósito, na qual foram instaladas a unidade hidráulica, para movimentação do sistema de transporte dos produtos e portas giratórias e deslizantes, o deionizador de água da piscina de armazenamento das fontes de ^{60}Co , o compressor e reservatório de ar-comprimado para içar os *racks* de fontes e o sistema de exaustão do gás ozônio, produzido na câmara de irradiação: $1,13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ ²⁹.

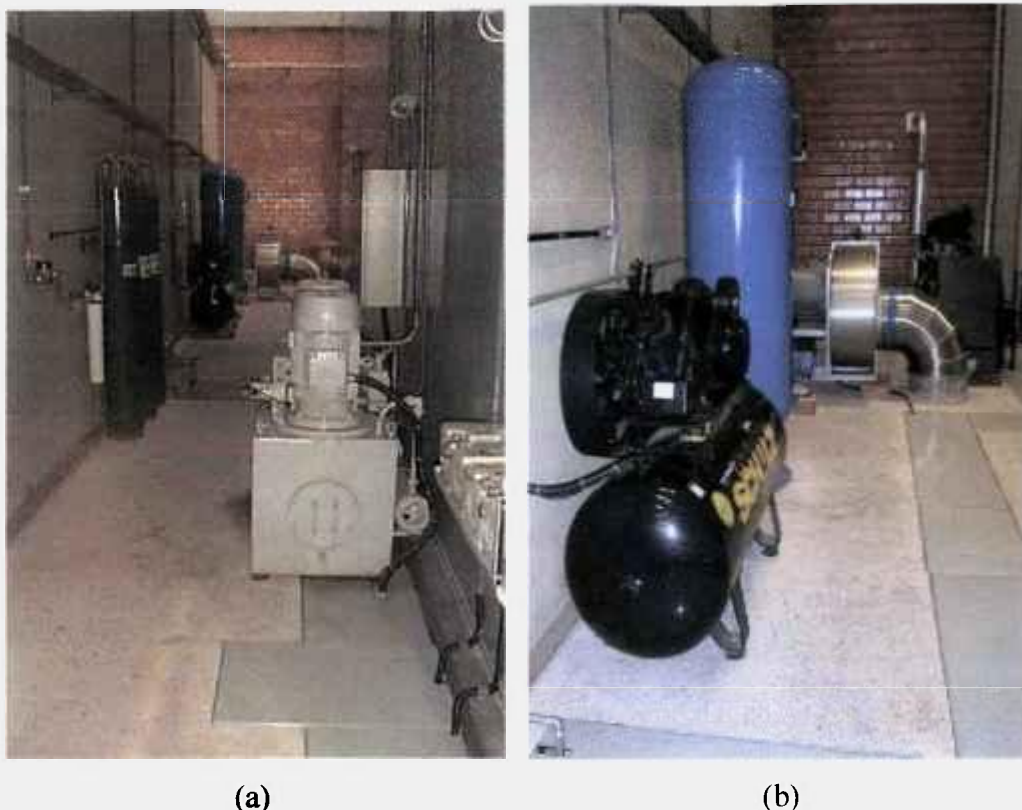


FIGURA 29 – Sala de máquinas: (a) unidade hidráulica e deionizador de água e (b) compressor, reservatório de ar-comprimado e sistema de exaustão do gás ozônio.

No tratamento contínuo da água da piscina, instalaram-se bombas centrífugas e uma unidade de deionização, responsável pela remoção dos íons da água, mantendo a sua condutividade abaixo de $10 \mu\text{siemens/cm}$. Um controlador de nível soará um alarme, impedindo o desbloqueio de acesso à câmara de irradiação, quando o nível d'água da piscina estiver abaixo ou acima do permitido. Os sistemas são mostrados na Figura 30.

O deionizador, o resfriador (*chiller*) e a piscina foram projetados de forma a constituírem um circuito fechado de água. Na eventualidade de uma contaminação, esta ficará contida dentro desses sistemas. Uma vez que a fonte de contaminação radioativa possa ser localizada e contida (fonte selada de ^{60}Co), a piscina será limpa pela ação do deionizador. Os resíduos (resinas) do deionizador serão dispostos como resíduo radioativo. O resfriador da água da piscina não foi instalado no irradiador multipropósito, pois a atividade inicial adquirida, em fontes de ^{60}Co foi inferior a $18,5 \text{ PBq}$ ($0,5 \text{ MCi}$).

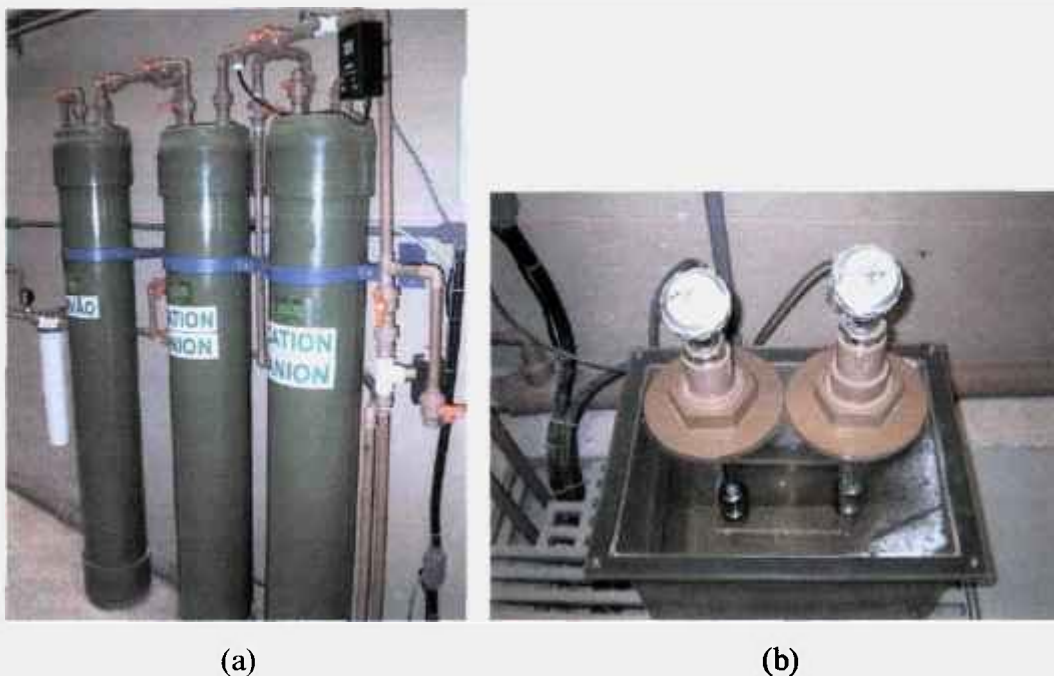


FIGURA 30 – Controle e tratamento de água da piscina, do irradiador multipropósito: (a) sistema de deionização e (b) tanque comunicante, com duas chaves de nível e quatro níveis de sinais eletro-eletrônicos.

A piscina de armazenamento das fontes radioativas foi construída no piso da câmara de irradiação, com uma lâmina d'água de 30 cm abaixo do piso. Quando os 2 *racks* de fontes estiverem recolhidos no fundo da piscina, o nível de radiação não deverá ultrapassar o limite de dose anual estabelecido para os trabalhadores (50 mSv/ano), na Norma CNEN-NE-3.01 ¹³.

Na Figura 31 são mostrados os cilindros e válvulas hidráulicas, os quais foram instalados na parte superior externa da câmara de irradiação, responsáveis pela movimentação do sistema de transporte dos produtos (*tote box*, contínuo e duplo empilhamento de caixas). Além disso, é mostrado o sistema de proteção dos *racks* de fontes (*shroud*), na câmara de irradiação, constituído por placas em alumínio, fixadas em estrutura em aço inoxidável AISI 304. O sistema anticolisão possui cabos em aço inoxidável fixados às *microswitches*, instalados próximos aos painéis de proteção, com o propósito de se evitar o choque das caixas em alumínio com os produtos e os *racks* de fontes de ^{60}Co .

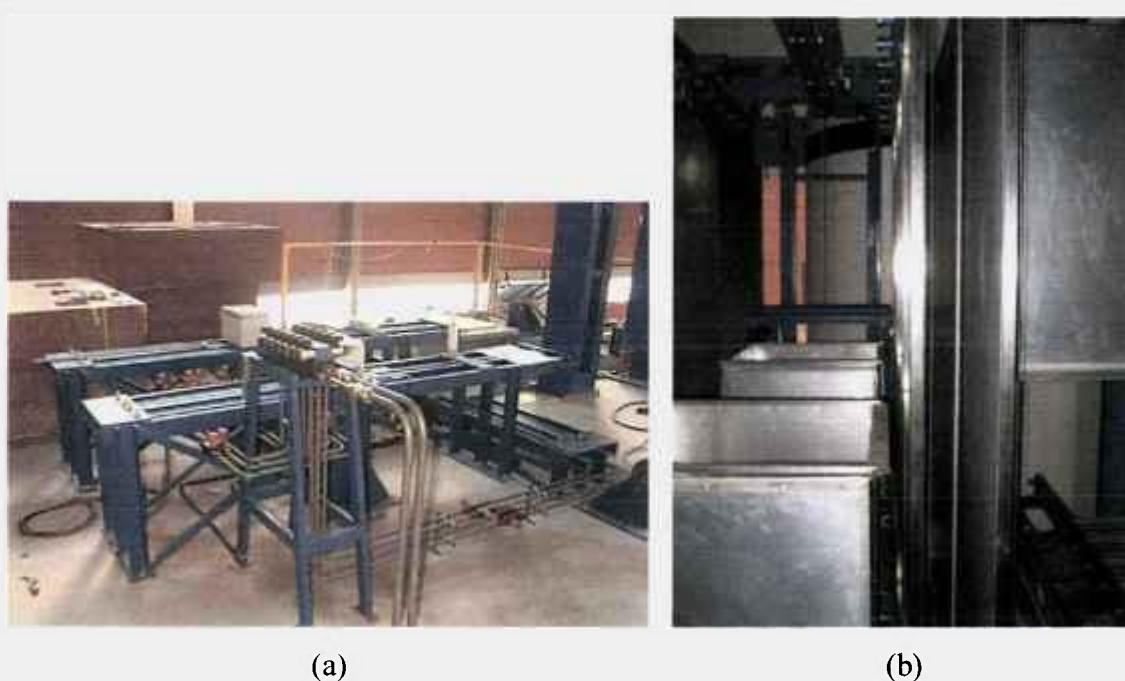


FIGURA 31 - Movimentação do sistema de transporte dos produtos, na câmara de irradiação, do irradiador multipropósito: (a) cilindros e válvulas hidráulicas, instalados na parte superior externa e (b) sistema de proteção e anticolisão.

Projetou-se o mecanismo de exposição pneumático dos dois *racks* de fontes do irradiador multipropósito, acionado independentemente para cada *rack*, conforme é mostrado na Figura 32. O movimento de cada *rack* de fontes é guiado por meio de buchas em aço inoxidável soldadas ao *rack*, o qual desliza em dois cabos em aço inoxidável paralelos, fixados no teto e no fundo da piscina.



(a)



(b)

FIGURA 32 – Mecanismo de exposição dos dois *racks* de fontes, do irradiador multipropósito: (a) cilindros e válvulas pneumático, instalados na parte superior externa e (b) *racks* de fontes na posição de segurança, no fundo da piscina.

Projitou-se e instalou-se na câmara de irradiação, o sistema de combate a incêndio tipo dilúvio, conforme é mostrado na Figura 33. Esse sistema, constituído por *sprinklers* tipo *spray* opera em detecção cruzada, por meio de dois sistemas independentes: sensor de temperatura (termopar tipo K, em Cromel-Alumel), com limite inferior fixado em 70°C e detector de fumaça tipo óptico. O sistema de extinção das chamas somente será acionado, quando estiverem atuando os dois sistemas de detecção, simultaneamente, com transmissão do sinal para o painel eletro-eletrônico e CLP, do sistema de segurança e intertravamento, o qual desabilitará a exposição das fontes de ^{60}Co , do irradiador multipropósito.



FIGURA 33 – Sistema de combate a incêndio tipo dilúvio, instalado na câmara de irradiação, do irradiador multipropósito: (a) *sprinklers* tipo *spray* e (b) manômetro e sensor eletrônico de pressão d'água na tubulação.

Para monitoração contínua do campo de radiação gama na câmara de irradiação, quando os *racks* de fonte estiverem expostos ou recolhidos na piscina, foram instalados detectores de radiação tipo Geiger-Müller, com limite superior de 20 $\mu\text{Sv/h}$ e câmara de ionização, da marca *EG&G Berthold*, modelo LB-111, mostrados na Figura 34. Na parte externa da câmara de irradiação foram instalados mais dois detectores de radiação tipo Geiger-Müller, posicionados na saída dos produtos pela porta giratória e nas resinas do sistema de deionização da água da piscina, ajustados para medidas de taxas de exposição superiores a 2 $\mu\text{Sv/h}$.

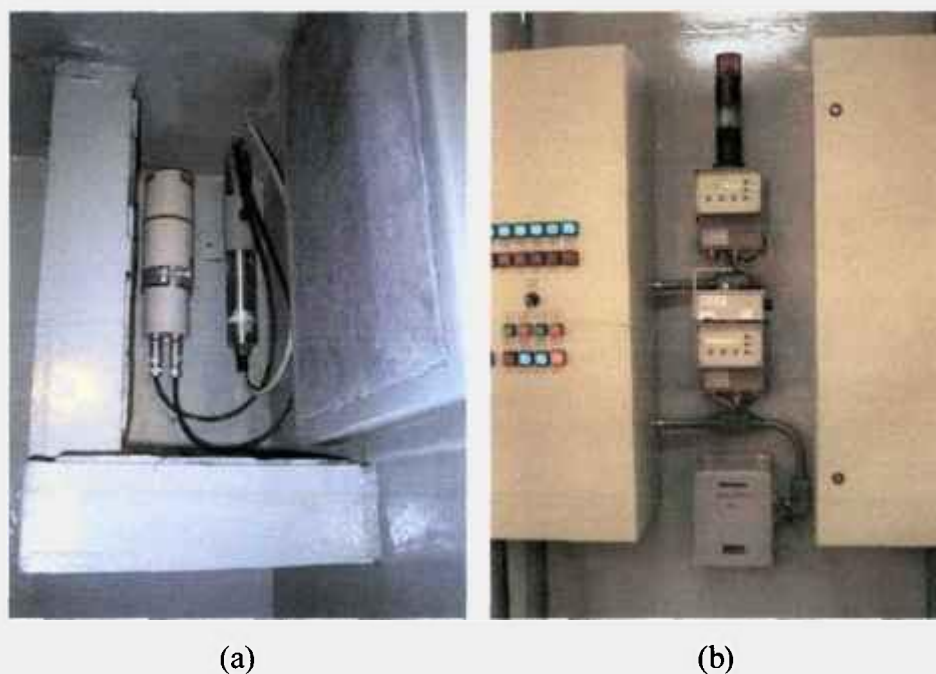


FIGURA 34 – Detector de sismo e sensores de radiação, instalados no irradiador multipropósito: (a) detectores de radiação Geiger-Müller e câmara de ionização, na câmara de irradiação e (b) monitores de radiação *EG&G Berthold*, modelo LB-111 e detector de sismo *Sprengnether Instruments Inc.*, modelo SSS-3, na sala de controle.

Na Figura 35 é mostrada a porta de concreto giratória, a qual foi projetada para permitir a entrada e saída dos produtos na câmara de irradiação, de forma contínua e integrada à unidade externa do sistema de transporte dos produtos.



(a)



(b)

FIGURA 35 – Porta de concreto giratória, responsável pela entrada e saída dos produtos na câmara de irradiação, do irradiador multipropósito: (a) compartimento para alojar as caixas em alumínio e (b) integração com a unidade externa, do sistema de transporte dos produtos.

Na Figura 36 é mostrada a porta de concreto deslizante, a qual foi projetada para permitir a entrada e saída de pessoas, na câmara de irradiação, para montagem e manutenção da instalação e do sistema de transporte dos produtos, além do acesso ao dispositivo de irradiação estático, do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. A porta deslizante possui, em uma das extremidades, geometria curva, permitindo acoplar perfeitamente na porta giratória, eliminando-se a existência de labirintos internos na câmara de irradiação, mantendo-se a eficiência da blindagem radiológica do irradiador.



FIGURA 36 – Porta de concreto deslizante, para montagem e manutenção da instalação e do sistema de transporte dos produtos: (a) acoplamento perfeita na porta giratória e (b) detalhe dos três *microswitches* elétricos e uma válvula pneumática, do sistema de segurança e intertravamento.

Projetaram-se e construíram-se os sistemas de controle de processo (transporte), segurança e intertravamento independentes e compostos por Controladores Lógicos Programáveis, aumentando-se a segurança de operação da instalação. As funções mais importantes da instalação são controladas por um circuito redundante de indicação de falhas, além de serem continuamente monitoradas, controladas e registradas. O sistema de segurança e intertravamento da instalação radiativa foi projetado para trabalhar com redundância, diversidade e independência, incorporando-se a lógica de relês e CLP, com probabilidades de falha de 10^{-6} e 10^{-3} , respectivamente, diminuindo-se a probabilidade de falha do sistema para 10^{-9} . Na Figura 37 são mostrados os microcomputadores instalados na sala de controle, responsáveis pelo acompanhamento dos sistemas de controle de processo (transporte), segurança e intertravamento e o painel eletro-eletrônico do sistema de segurança e intertravamento do irradiador multipropósito.



FIGURA 37 – Sistemas de controle de processo (transporte), segurança e intertravamento, do irradiador multipropósito: (a) microcomputadores instalados na sala de controle, responsáveis pelo acompanhamento dos sistemas e (b) painel eletro-eletrônico do sistema de segurança e intertravamento (lógica de relês).

O painel eletro-eletrônico do sistema de segurança e intertravamento do irradiador multipropósito é constituído pelas seguintes funções:

- Chave geral do painel eletro-eletrônico;
- Chave que habilita a elevação dos *racks* de fontes;

-
- *Plug* no teto da câmara de irradiação;
 - Fumaça no sistema de exaustão;
 - Pressão d'água na tubulação do sistema de incêndio;
 - Abalos sísmicos;
 - Exaustor do gás ozônio;
 - Pressão de ar-comprimido;
 - Colisão das caixas em alumínio e produtos com o sistema de proteção dos *racks* de fontes;
 - Fluxo de refrigeração d'água da piscina;
 - Níveis baixo e alto d'água na piscina;
 - Radiação na água da piscina;
 - Radiação na porta giratória dos produtos;
 - Temperaturas na água da piscina e na câmara de irradiação;
 - Teste de lâmpadas do painel eletro-eletrônico;
 - Fechar e abrir a porta giratória dos produtos;
 - Destrava colisão dos produtos e fumaça no sistema de exaustão;
 - Recolhe e eleva os *racks* de fontes 1 e 2;
 - Régua do sistema de transporte dos produtos em posição;
 - Porta giratória dos produtos destravada;
 - Intrusão na câmara de irradiação;
 - Tempo excedido no trânsito dos *racks* de fontes;
 - Excesso de dose nos produtos;
 - Início de operação do irradiador permitido;
 - *Racks* de fontes habilitados;
 - Radiação na câmara do irradiador;
 - Procedimento ilegal ou emergência e
 - Emergência no painel eletro-eletrônico.

3.2 – AQUISIÇÃO, TRANSPORTE E INSPEÇÃO DAS FONTES SELADAS DE COBALTO-60

Adquiriram-se 13 fontes radioativas seladas de ^{60}Co , modelo C-188, com atividade total de 3.407,7 TBq (92.099 Ci), em 16/11/04, 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 *Zircaloy* e aço inoxidável AISI 316L, soldadas pelo processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), com comprimento de 452 e 11,2 mm de diâmetro, conforme é mostrado na Figura 38.

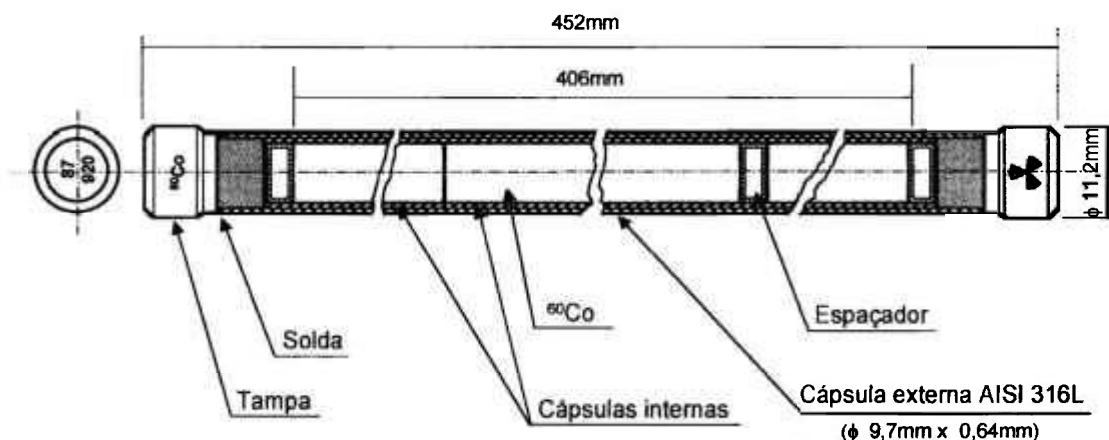


FIGURA 38 – Fonte de ^{60}Co modelo C-188, duplamente encapsulada em *Zircaloy* (cápsulas internas) e aço inoxidável AISI 316L (cápsula externa), soldada pelo processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), fabricada pela *MDS Nordion Ion Technologies*.

As 13 fontes de ^{60}Co foram transportadas da *MDS Nordion Ion Technologies* (Ottawa/Canadá) ao IPEN-CNEN/SP (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 5.445 kg, fixado em um contêiner marítimo de 6,1 m (20 pés) de comprimento e volume de 30 m³, mostrado na Figura 39. O embalado de transporte tipo B, modelo F-168, estava em conformidade com as especificações técnicas da Agência Internacional de Energia Nuclear – AIEA como embalagem tipo B(U), certificado pela *Atomic Energy Control Board* no Canadá, sob nº CDN/2063/B(U)-85 e especificado pelos requisitos definidos na *IAEA Safety Series n. 6* ³⁷.



FIGURA 39 – Embalado de transporte tipo B, modelo F-168 da *MDS Nordion Ion Technologies* e contêiner marítimo de 6,1 m (20 pés) de comprimento, utilizado no transporte das fontes seladas de ^{60}Co .

Submeteu-se o embalado de transporte tipo B, modelo F-168 ao teste de esfregaço, para se determinar a 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*), mostrado na Figura 40^{27,28,45}. Os filtros plásticos e de papel, 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 Measures*, calibrado no IPEN-CNEN/SP, em dezembro/2004.



FIGURA 40 – Testes de esfregaço e fuga (*flushing test*), realizados no embalado de transporte tipo B, modelo F-168 e nas fontes seladas de ^{60}Co , respectivamente.

3.3 - PLANEJAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES SELADAS DE COBALTO-60 NOS RACKS

No planejamento e distribuição das 13 fontes radioativas de ^{60}Co , nos magazines dos dois *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 – CTR, do IPEN-CNEN/SP ³⁸.

Depois de comprovada a não existência de contaminação superficial, no teste de esfregaço e a integridade e estanqueidade das 13 fontes seladas de ^{60}Co , no teste de fuga (*flushing test*), utilizou-se um guindaste com capacidade de 30 toneladas, para se transferir o embalado de transporte tipo B, modelo F-168, do contêiner de 6,1 m (20 pés) de comprimento para o fundo da piscina do irradiador multipropósito. Essa operação de transferência é mostrada na Figura 41. Em seguida, retirou-se a gaiola em aço inoxidável AISI 304, contendo as 13 fontes seladas de ^{60}Co , do embalado de transporte tipo B, posicionando-a em uma mesa em aço inoxidável AISI 304 instalada na piscina, a 5 m de profundidade.

Com base no planejamento elaborado pelo *Cadgamma*, iniciou-se a instalação das 13 fontes radioativas de ^{60}Co em 6 magazines e 2 *racks* de fontes, do irradiador multipropósito. As fontes de ^{60}Co foram retiradas individualmente da gaiola sobre a mesa e transferidas para os magazines, de acordo com o número de série das mesmas e suas respectivas atividades, fornecidos pela *MDS Nordion Ion Technologies*. 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 em aço inoxidável AISI 316L (*dummies*), ou seja, sem ^{60}Co sendo, em seguida, transferidos para os seus respectivos *racks* de fontes, conforme é mostrado na Figura 42. As ferramentas especiais, com comprimento regulável, de 2,5 a 7,5 m, confeccionadas e manuseadas do piso da câmara de irradiação, pelos profissionais do CTR, do IPEN-CNEN/SP são mostradas na Figura 43.

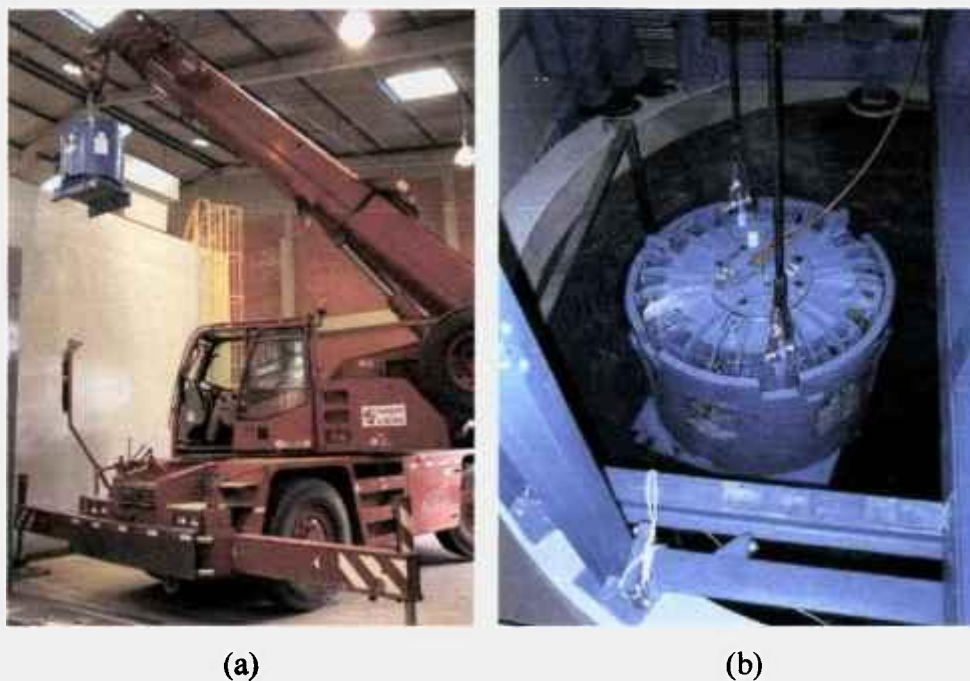


FIGURA 41 – Transferência do embalado de transporte tipo B, modelo F-168, com as 13 fontes seladas de ^{60}Co : (a) içado pelo guindaste do contêiner de 6,1 m (20 pés) de comprimento e (b) posicionado no fundo da piscina do irradiador multipropósito.



FIGURA 42 – Instalação das fontes radioativas de ^{60}Co , nos magazines dos *racks* de fontes, do irradiador multipropósito: (a) gaiola posicionada sobre a mesa, a 5 m de profundidade na piscina e (b) magazines instalados nos *racks*, com as fontes seladas de ^{60}Co , modelo C-188.



FIGURA 43 – Ferramentas reguláveis, especialmente confeccionadas para o manuseio e instalação das fontes seladas de ^{60}Co , nos magazines e nos *racks* de fontes.

3.4 - PROGRAMA DE QUALIFICAÇÃO DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO

Realizou-se o 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, baseado nas Normas *IAEA Safety Series n. 539* e *AAMI/ISO 11137* ^{32,43}.

No mapeamento de dose do irradiador multipropósito e dos produtos foram utilizados dosímetros de rotina comerciais de polimetilmetacrilato (PMMA), fabricados pela empresa inglesa *Harwell Dosimeters Limited*, avaliando-se a uniformidade de dose nos produtos com diferentes densidades. Os três tipos de dosímetros de rotina, fabricados pela *Harwell*, nas dimensões de 30 x 11mm, utilizados em processamento por radiação na indústria são apresentados na Tabela 4. Os dosímetros de rotina de PMMA escurecem ao serem irradiados e sua absorbância de luz, medida com auxílio de um espectrofotômetro, está associada à dose absorvida pelo dosímetro e, conseqüentemente, pelo produto processado pela radiação.

TABELA 4 – Dosímetros de rotina em polimetilmetacrilato (PMMA), utilizados em processamento por radiação na indústria ⁵⁰.

Dosímetros	Faixa de Dose (kGy)	Comprimento de Onda (nm)	Incerteza (%)	Espessura Nominal (mm)
<i>Red Perspex 4034</i>	5 – 50	640	± 2,0	3,0
<i>Amber 3042</i>	1 – 30	603 e 651	± 2,5	3,0
<i>Gammachrome YR[®]</i>	0,1 – 3,0	530	± 3,0	1,7

Na qualificação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto foram utilizados os próprios produtos, com densidades diferentes, disponibilizados pelo Centro de Radiofarmácia – CR (tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc) e pelo Centro de Biologia Molecular – CBM (ração animal para biotério), do IPEN-CNEN/SP.

3.5 - MAPEAMENTO DE DOSE NOS PRODUTOS

3.5.1 - Tampas e Mangueiras Poliméricas

As 60 caixas em papelão com as tampas e mangueiras poliméricas, para os geradores de ^{99m}Tc, massa de 2,9 kg e dimensões de 0,33 x 0,49 x 0,34 m por caixa foram posicionadas em 10 caixas em alumínio, 6 caixas de papelão por caixa em alumínio (comprimento de 0,69 m, por 0,65 m de largura e 1,03 m de altura, massa de 24 kg), do sistema de transporte tipo *tote box* do irradiador multipropósito. No mapeamento de dose nos produtos foram utilizados 80 dosímetros de rotina do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), 20 dosímetros por plano, posicionados em uma das 10 caixas em alumínio preenchidas com os produtos a serem esterilizados por radiação, conforme são mostrados na Figura 44.



FIGURA 44 – Posicionamento dos 20 dosímetros de rotina tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD) por plano, utilizados no mapeamento de dose nos produtos (tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc).

Na Figura 45 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 nos produtos. Os dosímetros dos planos centrais 1 e 2 foram posicionados a $1/3$ e $2/3$, respectivamente, da altura total de empilhamento de 1,03 m, dos 3 pares de caixa de papelão, com produtos para geradores de ^{99m}Tc por caixa em 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 em alumínio adjacentes, mostradas na Figura 46.

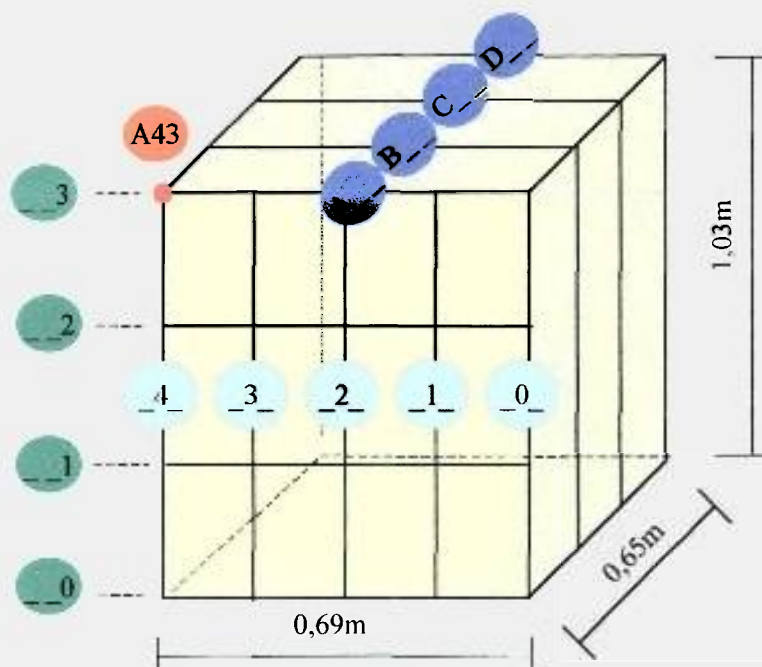


FIGURA 45 – Desenho esquemático de distribuição dos 80 dosímetros de rotina tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD), posicionados em 4 planos distintos (0, 1, 2 e 3), no mapeamento de dose nos produtos. O dosímetro posicionado no vértice superior esquerdo é o A43.



FIGURA 46 – Posicionamento dos dosímetros de referência tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD), nas regiões centrais das faces externas, da caixa em alumínio monitorada e caixas adjacentes.

Na determinação da densidade aparente do produto, correspondente às 6 caixas de papelão com tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc distribuídas na caixa em alumínio, utilizou-se uma balança digital industrial, marca DIGIMED, modelo KN1-P12/12k, com capacidade máxima de 1.000 kg, mínima de 2 kg e exatidão de ± 100 g, conforme é mostrada na Figura 47.



FIGURA 47 – Balança digital industrial, marca DIGIMED, modelo KN1-P12/12k, com capacidade máxima de 1.000 kg, utilizada na determinação das densidades aparentes dos produtos.

No cálculo da densidade aparente do produto, utilizou-se a equação 3.1:

$$d = \frac{m_t}{V} \quad (3.1)$$

na qual,

- d = densidade aparente do produto (kg/m^3);
- m_t = massa total do produto e da caixa em alumínio (kg) e
- V = volume da caixa em alumínio do sistema de transporte ($0,46 \text{ m}^3$).

Preencheu-se as 14 posições do sistema de transporte, em 2 níveis, mostrado na Figura 48, na seguinte ordem de entrada, na câmara de irradiação: 6 caixas em alumínio com sacos de 60 litros de maravalha para biotério e 8 caixas em alumínio contendo as tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc . Iniciou-se então a operação do irradiador, elevando-se os 2 *racks* de fontes de ^{60}Co com o processamento contínuo dos produtos por raios gama. A caixa em alumínio monitorada com os 80 dosímetros foi a última a entrar na câmara de irradiação. Aguardavam posicionadas no sistema de transporte, prontas para entrarem na porta giratória, as 2 caixas em alumínio restantes, com os produtos dos geradores de ^{99m}Tc . O *time setting* inicial (tempo no qual cada caixa em alumínio permaneceu parada na mesma posição, no sistema de transporte, em frente aos 2 *racks* de fontes) foi fixado em 30 minutos e 33 segundos.



FIGURA 48 - Preenchimento do sistema de transporte pelas 14 caixas em alumínio, em dois níveis, na câmara de irradiação do irradiador multipropósito, sendo 8 caixas com as tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc e 6 caixas com os sacos de 60 litros de maravalha para biotério.

Decorrido esse período, as réguas do sistema de transporte do irradiador multipropósito eram acionadas automaticamente, a porta giratória movimentava-se e retirava, pelo nível inferior, uma caixa em alumínio com os produtos, da câmara de irradiação. Essa caixa em alumínio era posicionada no nível superior do sistema de transporte, para entrar novamente na câmara de irradiação.

Após o ciclo completo, no qual as caixas em alumínio dosimetradas percorreram as 14 posições internas do sistema de transporte, efetuou-se a leitura dos 80 dosímetros de rotina e dos 3 de referência do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), no Laboratório de Dosimetria em Processos de Irradiação – LDPI, do Centro de Tecnologia das Radiações – CTR do IPEN-CNEN/SP, para o mapeamento de dose nos produtos (tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc). Após a leitura dos 83 dosímetros, fixou-se o *time setting* final em 55 minutos e 33 segundos, uma vez que a dose solicitada pelo Centro de Radiofarmácia – CR, do IPEN-CNEN/SP foi de 20 kGy.

Nas medidas da espessura dos 83 dosímetros tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), no LDPI do CTR, utilizou-se o micrômetro externo digital, faixa nominal de medição entre 0 a 25 mm, resolução de 1 μm , exatidão de $\pm 2 \mu\text{m}$, marca *Mitutoyo Corporation*, modelo 293-801, calibrado em 28/11/03. Nas leituras de absorvância dos 83 dosímetros utilizou-se o espectrofotômetro digital marca *Genesys-20*, modelo 4001/4, com comprimento de onda ajustado em 640 nm,. Os equipamentos são mostrados na Figura 49.



(a)



(b)

FIGURA 49 – Equipamentos digitais utilizados na leitura dos dosímetros *Red Perspex 4034* (lote GD): (a) micrômetro para medidas de espessura e (b) espectrofotômetro para obtenção das absorvâncias.

No cálculo da absorvância específica dos dosímetros, utilizou-se a equação 3.2:

$$K = \frac{A}{e} \quad (3.2)$$

na qual,

- K = absorvância específica do dosímetro (cm^{-1});
- A = absorvância do dosímetro e
- e = espessura do dosímetro (cm).

As curvas de calibração das doses absorvidas (D) versus absorvâncias específicas (K), medidas a 640 nm, para os dosímetros do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD) foram construídas no Laboratório de Dosimetria em Processos de Irradiação – LDPI do CTR, irradiando-se quatro dosímetros de rotina por dose, na faixa de 5 a 50 kGy e intervalos de 5 kGy, conforme Norma ASTM E 1276-93⁵¹. Com a leitura dos dosímetros, os valores obtidos para as doses absorvidas (D) e absorvâncias específicas (K), no término da irradiação e 4 horas após o término da irradiação são apresentados na Tabela 5. Os tempos definidos, entre o término da irradiação e a leitura dos dosímetros estavam relacionados aos processos operacionais de irradiação dos produtos, no irradiador multipropósito. As curvas de calibração são mostradas nas Figuras 50 e 51.

No experimento, utilizou-se o irradiador de cobalto-60 tipo *Gammacell 220*, série 142, no CTR, fabricado pela empresa *Atomic Energy of Canada Limited*. A taxa de dose de 4,53 kGy/h, do irradiador *Gammacell 220*, em 10/11/04, foi determinada por meio do dosímetro de referência Fricke, irradiando-se a solução aquosa de sulfato ferroso amoniacal $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ e posterior adição de cloridrato de ortofelantrolina, para determinação dos íons Fe^{2+} remanescente, na cor laranja, pela medida de absorvância. A energia eletromagnética (radiação gama) utilizada na oxidação de Fe^{2+} a Fe^{3+} é diretamente proporcional à dose absorvida pela água⁵²⁻⁵⁴.

O ponto central no irradiador *Gammacell 220*, no qual foram irradiados os dosímetros de rotina e de referência foi certificado pelo *International Dose Assurance Service - IDAS: Radiation Processing Dosimetry*, utilizando-se um dosímetro de transferência de alanina, fornecido pela *International Atomic Energy Agency - IAEA*. Nesse processo de intercomparação, com a emissão do Certificado *IDAS* nº 04.042, em 21/01/05 determinou-se que o valor da dose absorvida, fornecido pelo LDPI do CTR (25,2 kGy) estava 0,99% inferior ao encontrado pela *IAEA* (25,4 kGy). A diferença máxima permitida pela *IAEA*, para dosímetros de rotina é de $\pm 5\%$.

TABELA 5 - Valores das doses absorvidas (D) e absorbâncias específicas (K), medidas a 640 nm, nos dosímetros de rotina tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), utilizados na construção das curvas de calibração.

Dose (kGy)	⁽¹⁾ K (cm ⁻¹)	⁽²⁾ K 4 horas (cm ⁻¹)
5	0,670	0,683
10	1,144	1,154
15	1,569	1,577
20	1,905	1,904
25	2,211	2,223
30	2,446	2,455
35	2,685	2,680
40	2,888	2,875
45	3,042	3,035
50	3,196	3,185

⁽¹⁾ Leitura dos dosímetros no término da irradiação e

⁽²⁾ Leitura dos dosímetros 4 horas após o término da irradiação.

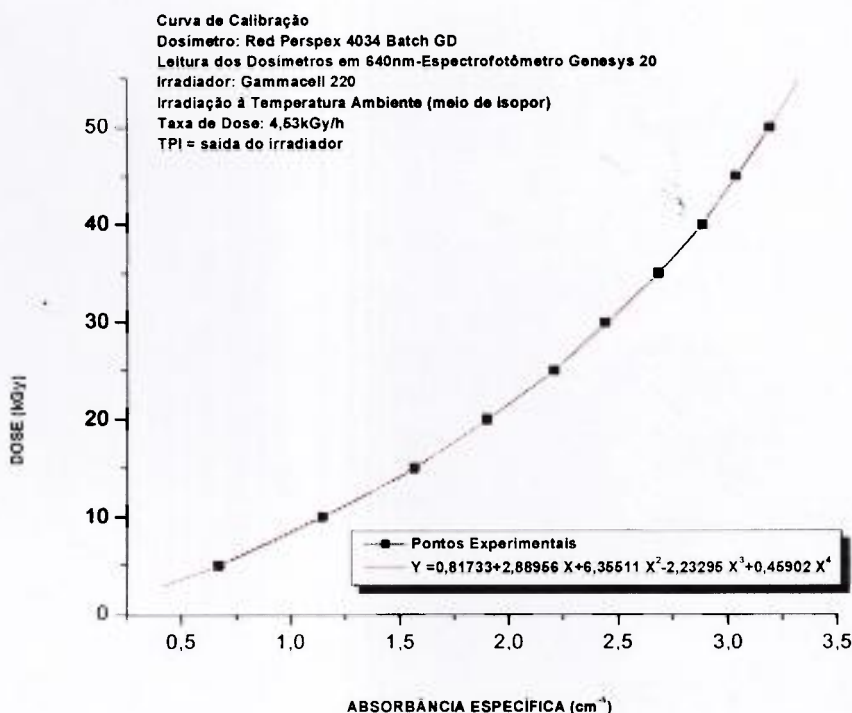


FIGURA 50 - Curva de calibração de dose (D), dos dosímetros do tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD), na qual as absorvâncias específicas (K) foram medidas a 640 nm, após o término da irradiação, no LDPI/CTR.

A partir da curva de calibração dos dosímetros do tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD), na qual as absorvâncias específicas (K) foram medidas a 640 nm, logo após o término da irradiação, determinou-se a equação polinomial de quarta ordem, por meio do aplicativo *ORIGIN 6.0* (método dos mínimos quadrados e confiabilidade de 95%). Assim, as doses absorvidas (D) pelos dosímetros podem ser obtidas pela equação 3.3:

$$D = 0,81733 + 2,88956K + 6,35511K^2 - 2,23295K^3 + 0,45902K^4 \quad (3.3)$$

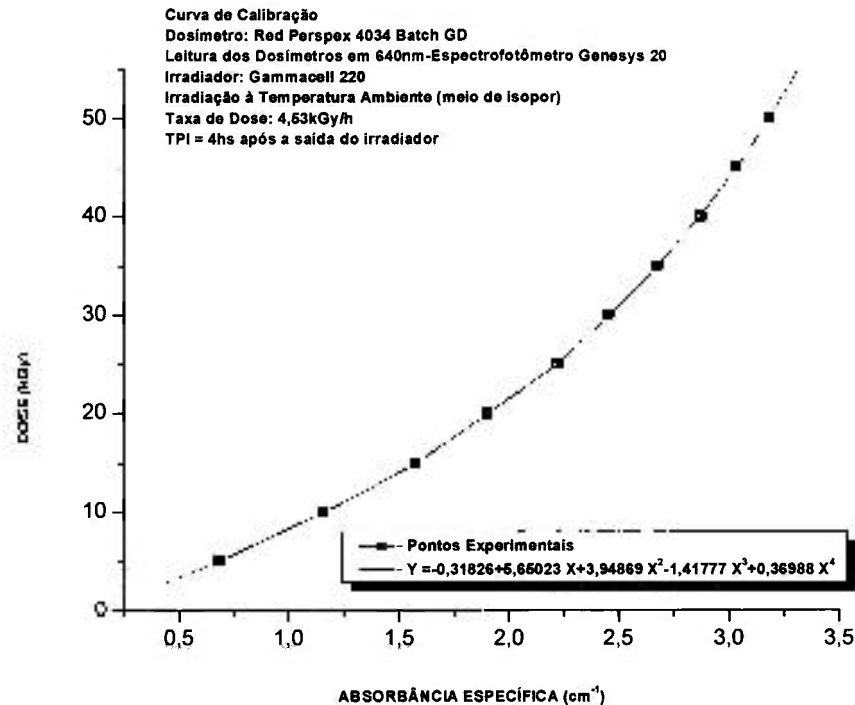


FIGURA 51 - Curva de calibração de dose (D), dos dosímetros do tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD), na qual as absorvâncias específicas (K) foram medidas a 640 nm, 4 horas após o término da irradiação, no LDPI/CTR.

A partir da curva de calibração dos dosímetros do tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD), na qual as absorvâncias específicas (K) foram medidas a 640 nm, 4 horas após o término da irradiação, determinou-se a equação polinomial de quarta ordem, por meio do aplicativo *ORIGIN 6.0* (método dos mínimos quadrados e confiabilidade de 95%). Assim, as doses absorvidas (D) pelos dosímetros podem ser obtidas pela equação 3.4:

$$D = -0,31826 + 5,65023K + 3,94869K^2 - 1,41777K^3 + 0,36988K^4 \quad (3.4)$$

No cálculo do fator de uniformidade de dose no produto, para o irradiador multipropósito de cobalto-60, utilizou-se a equação 3.5:

$$f = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \quad (3.5)$$

na qual,

- f = fator de uniformidade de dose (condição ideal: $f = 1$, ou seja, $D_{\max} = D_{\min}$);
- $D_{\max}$ = dose máxima no produto (kGy) e
- $D_{\min}$ = dose mínima no produto (kGy).

3.5.2 - Ração Animal

Os 60 sacos de ração animal para biotério, massa de 20 kg e dimensões de 0,36 x 0,58 x 0,17m por saco foram posicionados em 6 caixas em alumínio, 10 sacos por caixa (comprimento de 0,69 m, por 0,65 m de largura e 1,03 m de altura, massa de 24 kg), do sistema de transporte tipo *tote box*, do irradiador multipropósito. No mapeamento de dose no produto foram utilizados 80 dosímetros de rotina do tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), posicionados em 4 planos distintos, 20 dosímetros por plano, em uma das 6 caixas em alumínio preenchidas com os produtos a serem processados por radiação, conforme é mostrado na Figura 52.

Na Figura 53 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 nos produtos. Os dosímetros dos planos centrais 1 e 2 foram posicionados a 2/5 e 3/5, respectivamente, da altura total de empilhamento de 0,95 m, dos 5 pares de saco de ração animal por caixa em 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 em alumínio adjacentes.



FIGURA 52 – Posicionamento dos 20 dosímetros de rotina tipo *Red Perspex 4034* (lote GD) por plano, utilizados no mapeamento de dose nos produtos (ração animal para biotério).

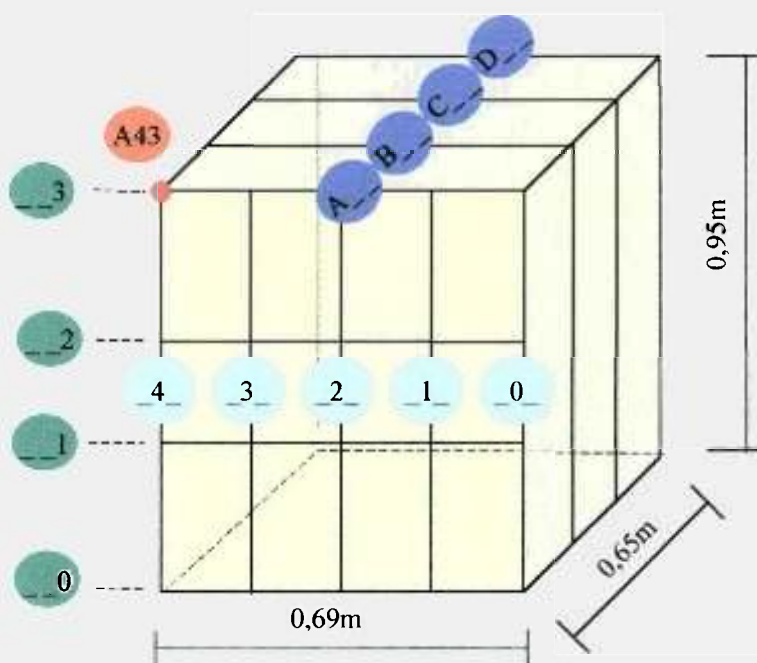


FIGURA 53 – Desenho esquemático de distribuição dos 80 dosímetros de rotina tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), posicionados em 4 planos distintos (0, 1, 2 e 3), no mapeamento de dose nos produtos. O dosímetro posicionado no vértice superior esquerdo é o A43.

Preencheu-se as 14 posições do sistema de transporte, em 2 níveis, na seguinte ordem de entrada, na câmara de irradiação: 10 caixas em alumínio com sacos de 60 litros de maravalha para biotério e 4 caixas em alumínio contendo a ração animal para biotério. Iniciou-se então a operação do irradiador, elevando-se os 2 *racks* de fontes de ^{60}Co com o processamento contínuo dos produtos por raios gama. A caixa em alumínio monitorada com os 80 dosímetros foi a última a entrar na câmara de irradiação. Aguardavam posicionadas no sistema de transporte, prontas para entrarem na porta giratória, as 2 caixas em alumínio restantes, com os sacos de ração para biotério. O *time setting* inicial foi fixado em 30 minutos e 33 segundos.

Após ciclo completo efetuou-se a leitura dos 80 dosímetros de rotina e 3 de referência do tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD), no LDPI do CTR, para o mapeamento de dose nos produtos (ração animal para biotério). Após a leitura dos 83 dosímetros, fixou-se o *time setting* final em 30 minutos e 33 segundos, uma vez que a dose solicitada pelo Centro de Biologia Molecular – CBM foi de 10 kGy.

Calculo-se a densidade aparente do produto, correspondente aos 10 sacos de ração distribuídos na caixa em alumínio, a absorbância específica dos dosímetros e o fator de uniformidade de dose no produto, processado no irradiador multipropósito de cobalto-60, utilizando-se as equação 3.1, 3.2 e 3.5, respectivamente.

3.6 - FATOR DE EFICIÊNCIA DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO

No cálculo do fator de eficiência do irradiador multipropósito de cobalto-60, utilizou-se a equação 3.6, resultante da equação 2.5:

$$F = 18,7 \frac{X.D}{A^{60}\text{Co}} \quad (3.6)$$

na qual,

- F = fator de eficiência do irradiador;
- X = *throughput* (kg/h);
- D = dose absorvida (kGy) e
- A^{60}_{Co} = atividade em ^{60}Co (Ci, 1 Ci = 37 GBq).

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS FINAIS DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO

As características finais do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, idealizadas pelo Dr. Paulo Roberto Relá e profissionais do “Grupo de Projeto, Construção e Implantação de Irradiadores de Grande Porte, Aceleradores Industriais de Elétrons e Sistemas de Irradiação” do CTR, mostradas na Figura 54 e Anexo 2 são:

- Capacidade total licenciada pela CNEN: 37 PBq (1 MCi), Categoria IV;
- Atividade inicial de operação: 3.407,7 TBq (92.099 Ci, em 16/11/04);
- Piscina: 7,0 m de profundidade e 2,7 m de diâmetro;
- Portas de concreto: 1 deslizante, para montagem e manutenção da instalação, com 4,00 m (comprimento) x 4,00 m (altura) x 2,45 m (largura) e 1 giratória, para entrada e saída dos produtos na câmara de irradiação, com 2,65 m (diâmetro) x 4,00 m (altura);
- Parede de concreto: 1,80 m de espessura (densidade = 2,35 g/cm³);
- Geometria da fonte: 2 *racks* de fontes retangulares, com capacidade para 8 magazines por *rack*, num total de 504 lápis de ⁶⁰Co;
- Dimensões da fonte: 1 *rack* de 1,4 m (comprimento) x 2,1 m (altura) e 1 *rack* de 0,7 m (comprimento) x 2,1 m (altura);
- Lápis de ⁶⁰Co por magazine: 40 (magazine para *rack* de 1,4 m) e 23 (magazine para *rack* de 0,7 m);
- Geometria de irradiação: *product overlap source*;
- Sistema de transporte: *tote box*, contínuo, duplo empilhamento de caixas, sendo que cada nível de caixa com os produtos movimenta-se na mesma direção (horizontal), mas em sentido contrário;

- Capacidade da câmara de irradiação: 14 caixas, aproximadamente 6,47 m³;
- 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 kGy em um ciclo de irradiação;
- Tempo de irradiação: variável, de acordo com o produto a ser processado;
- Tamanho das caixas em alumínio: 0,69 m (comprimento) x 0,65 m (largura) x 1,03 m (altura);
- Volume por caixa: 462 litros (0,46 m³);
- Capacidade máxima por caixa: 400 kg e
- Capacidade anual máxima do irradiador: variável, de acordo com a densidade do produto, dose absorvida requerida e atividade em ⁶⁰Co.



FIGURA 54 – Irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, com sistema de irradiação projetado, construído e implantado no IPEN-CNEN/SP, com tecnologia inteiramente nacional e apoio financeiro da FAPESP.

4.2 - CERTIFICAÇÕES E LICENCIAMENTOS JUNTO À CNEN, CETESB E IBAMA

Os Relatórios de Análise de Segurança “Aprovação Prévia” e “Licença de Construção” e o “Plano de Transporte (AT-07/04)” do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto do IPEN-CNEN/SP estão aprovados pela CNEN. O “Memorial de Caracterização do Empreendimento” e a “Solicitação de Certificado de Dispensa de Licença de Instalação (CDLI – 45001957/03)” estão também aprovados junto à CETESB. Já o “Licenciamento Ambiental para Transporte de Material Radioativo” foi concedido pelo IBAMA. Quanto ao Relatório de Análise de Segurança: “Autorização para Operação”, encontra-se em fase de análise e aprovação, na Coordenação Geral de Licenciamento e Controle – CGLC, da CNEN.

4.3 - RESULTADO DOS TESTES DE ESFREGAÇO E DE FUGA (*FLUSHING TEST*)

O teste de esfregaço no embalado de transporte tipo B, modelo F-168, para se determinar à existência ou não de contaminação radioativa superficial e o teste de fuga (*flushing test*), para se verificar a integridade e estanqueidade das 13 fontes seladas de ^{60}Co , adquiridas da *MDS Nordion Ion Technologies* 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 5 nCi (185 Bq).

4.4 - DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES SELADAS DE COBALTO-60 NOS *RACKS*

No planejamento e distribuição das 13 fontes radioativas de ^{60}Co nos magazines dos 2 *racks* do irradiador multipropósito, utilizou-se o aplicativo *Cadgamma*³⁸.

As informações técnicas fornecidas pela *MDS Nordion Ion Technologies* e a distribuição das 13 fontes seladas de ^{60}Co em 6 magazines, dos 2 *racks* de fontes do irradiador multipropósito, fornecida pelo aplicativo para a simulação das doses absorvidas em sistemas de irradiação com raios gama – *Cadgamma*³⁸ são apresentadas na Tabela 6 e mostradas na Figura 55, respectivamente.

TABELA 6 – Informações técnicas e distribuição das fontes seladas de ^{60}Co , em 6 magazines, dos 2 *racks* de fontes do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.

Fonte Selada de ^{60}Co (C-188)	⁽¹⁾ Atividade TBq (Ci)	Posição da Fonte no Rack	Posição da Fonte no Magazine
83784	159,8 (4.318)	B3	23
83786	158,5 (4.283)	B3	22
85585	423,4 (11.443)	C2	38
85586	406,2 (10.978)	D2	03
85587	420,9 (11.375)	B2	22
87898	210,2 (5.680)	D3	27
87907	236,3 (6.387)	C2	28
87908	227,3 (6.142)	C3	28
87909	229,1 (6.192)	D3	13
87910	230,2 (6.221)	D3	05
87911	232,0 (6.271)	C3	36
87914	209,9 (5.673)	C3	14
87920	264,0 (7.136)	D2	13

⁽¹⁾ Em 16/11/04.

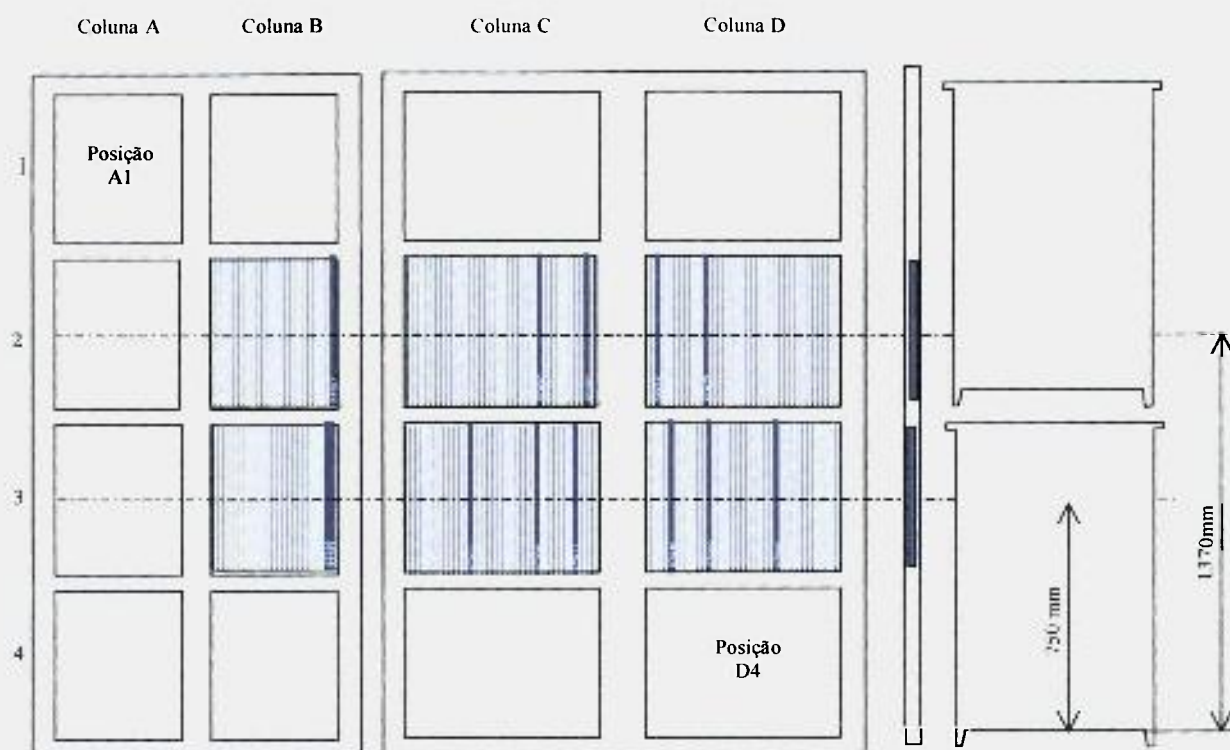


FIGURA 55 - Distribuição das fontes seladas de ^{60}Co nos 6 magazines, dos 2 racks de fontes do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP, por meio do aplicativo *Cadgamma*³⁸.

Na Figura 56 são mostradas as fontes seladas de ^{60}Co , instaladas nos 6 magazines, em 2 racks do irradiador multipropósito, conforme apresentado na Tabela 6 e mostrado na Figura 55. As 3 fontes de ^{60}Co , as quais somam 739,2 TBq (19.976 Ci), ou seja, 21,7% da atividade total de 3.407,7 TBq (92.099 Ci, em 16/11/04) foram instaladas em 2 magazines do rack de 0,7 m de largura, voltadas para o rack de 1,4 m de largura. Nesse último rack foram instaladas 10 fontes de ^{60}Co , em 4 magazines de forma balanceada, as quais somam 2.668,5 TBq (72.123 Ci), ou seja, 78,3% da atividade total.



FIGURA 56 - Fontes seladas de ^{60}Co instaladas nos 6 magazines dos 2 *racks* do irradiador multipropósito, no total de 3.407,7 TBq (92.099 Ci, em 16/11/04).

4.5 - SISTEMAS DE CONTROLE DE PROCESSO E SEGURANÇA DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO

A tela do sistema de controle de processo (transporte dos produtos), composto por Controlador Lógico Programável – CLP, do irradiador multipropósito é mostrado na Figura 57. Na tela de controle, o sistema de transporte dos produtos é mostrado em dois níveis (esteiras superior e inferior), as quais são compostas por 6 réguas numeradas (3, 5, 7, 9, 11 e 12), um elevador de carga (8) e dois sistemas de translação para as caixas em alumínio (6 e 10). O *time setting* do irradiador multipropósito foi ajustado em segundos, na janela indicada por “temporizador”, na tela de controle de processo. Ajustou-se também o “tempo para excesso de dose”, em 180 segundos. O tempo de processamento dos produtos por radiação era indicado por “tempo de máquina”.

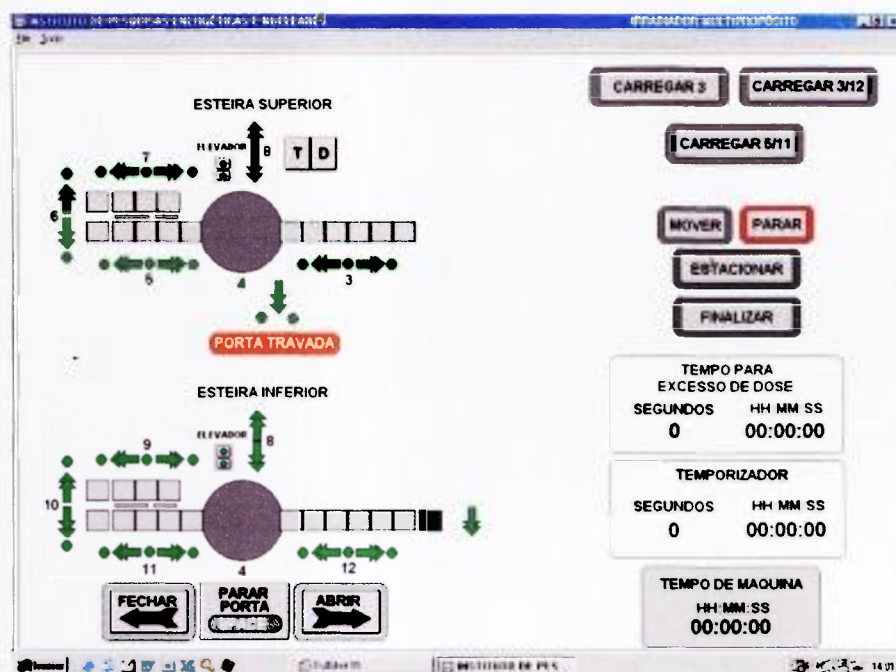


FIGURA 57 - Tela do sistema de controle de processo (transporte dos produtos), no microcomputador do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.

A tela do sistema de segurança e intertravamento, composto por CLP e interligado ao painel eletro-eletrônico, do irradiador multipropósito é mostrado na Figura 58. Nessa tela, o diagrama de blocos indica que o irradiador está em condições normais de operação (cor verde), o alarme de procedimento de partida está atuando (cor vermelha) e ambas fotocélula e corrente da porta de serviço (deslizante) estão em situações irregulares (cores vermelhas), no irradiador multipropósito. Na Figura 59 é mostrada a tela do sistema de segurança e intertravamento, indicando que a porta deslizante da câmara de irradiação está fechada e o irradiador multipropósito habilitado para início de operação.

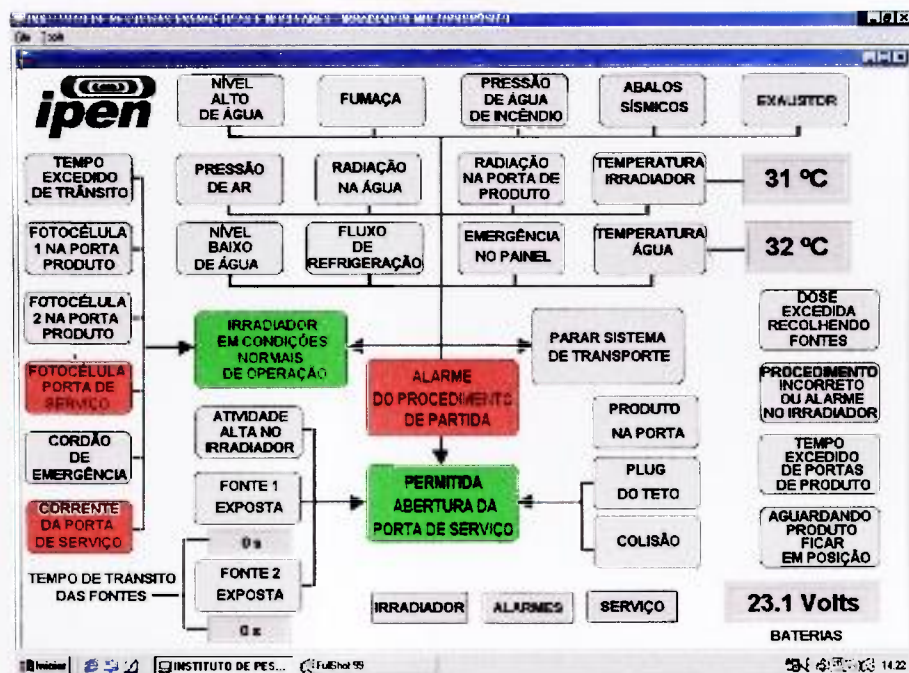


FIGURA 58 – Tela do sistema de segurança e intertravamento no microcomputador, em início de operação e condições gerais do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.

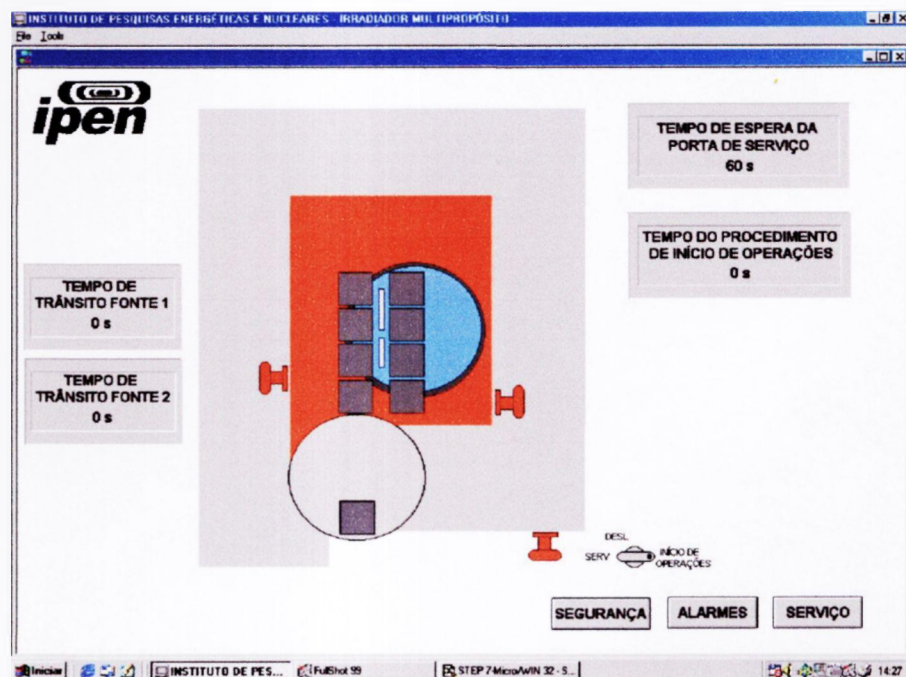


FIGURA 59 – Tela do sistema de segurança e intertravamento no microcomputador, indicando que a porta deslizante da câmara de irradiação está fechada e o irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP, está habilitado para início de operação.

As funções mais importantes da instalação são controladas por um circuito redundante de indicação de falhas, além de serem continuamente monitoradas, controladas e registradas. Na Figura 60 é mostrada a “Listagem dos Alarmes”, com os registros de data, horário e descrição das ocorrências.

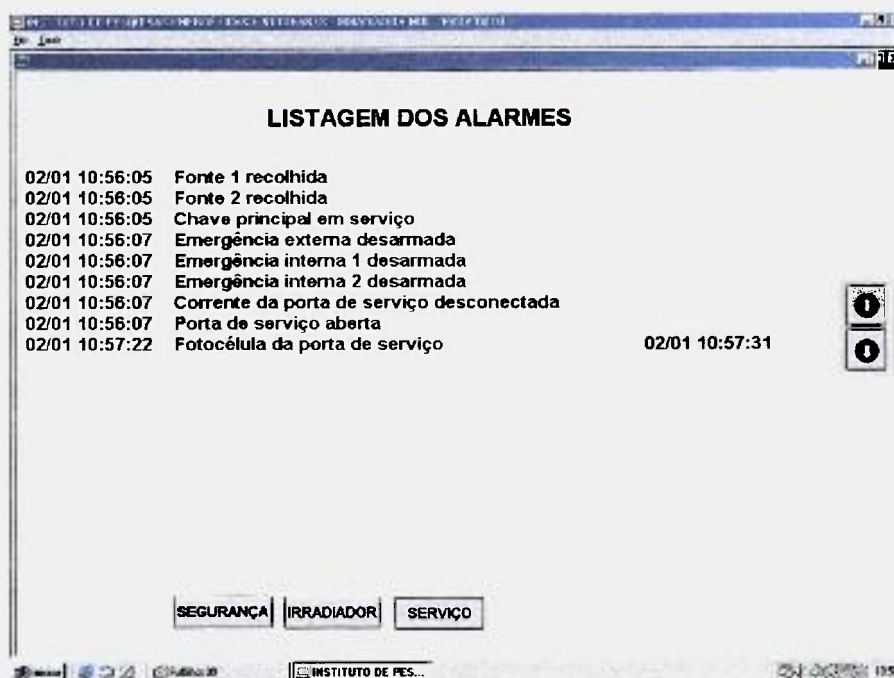


FIGURA 60 – Tela do sistema de segurança e intertravamento no microcomputador, com a listagem dos alarmes do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.

Na Figura 61 são mostradas as “Condições Gerais do Irradiador”, com as indicações de “desligado ou aguardando” (cinza), “condições de atenção ou sistema armado” (amarelo), “condição normal” (verde) e “alarme ou situação irregular” (vermelho).



FIGURA 61 – Tela do sistema de segurança e intertravamento no microcomputador, com as condições gerais do irradiador multipropósito, do IPEN-CNEN/SP.

4.6 - PROGRAMA DE QUALIFICAÇÃO DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO

4.6.1 - Mapeamento de Dose nos Produtos para Geradores de ^{99m}Tc

A massa total (m_t) das 6 caixas de papelão, com as tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc mais a caixa em alumínio é de 41,4 kg. Assim, utilizando-se a equação 3.1, o valor da densidade aparente (d) dos produtos dos geradores de ^{99m}Tc é de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$).

Os resultados das medidas de espessura (e), absorvância (A) e absorvância específica (K), da equação 3.2 e dose (D) da equação 3.3, obtidos para os 83 dosímetros tipo *Red Perspex 4034* (lote GD), após o término da irradiação, utilizados no mapeamento de dose nos produtos para os geradores de ^{99m}Tc são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

TABELA 7 – Resultado do mapeamento de dose nos produtos dos geradores de ^{99m}Tc , com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$), para os dosímetros de rotina A00 a B43, tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD).

Dosímetro (Red Perspex)	Espessura (cm)	1º Time Setting (30min33s)			2º Time Setting (55min33s)		
		Absorbância (640 nm)	K (cm^{-1})	Dose (kGy)	Absorbância (640 nm)	K (cm^{-1})	Dose (kGy)
A00	0,3000	0,291	0,970	8,0	0,619	2,063	22,5
A01	0,2679	0,280	1,045	8,8	0,590	2,202	25,0
A02	0,3149	0,316	1,003	8,3	0,634	2,013	21,7
A03	0,2898	0,262	0,904	7,3	0,604	2,084	22,9
A10	0,2988	0,290	0,971	8,0	0,624	2,088	23,0
A11	0,2960	0,303	1,024	8,5	0,645	2,179	24,5
A12	0,2735	0,283	1,035	8,7	0,571	2,088	23,0
A13	0,2824	0,266	0,942	7,7	0,597	2,114	23,4
A20	0,2917	0,282	0,967	7,9	0,602	2,064	22,5
A21	0,2735	0,279	1,020	8,5	0,593	2,168	24,3
A22	0,2794	0,274	0,981	8,1	0,583	2,087	22,9
A23	0,2749	0,277	1,008	8,4	0,591	2,150	24,0
A30	0,2913	0,271	0,930	7,6	0,579	1,988	21,3
A31	0,2810	0,275	0,979	8,1	0,583	2,075	22,7
A32	0,2872	0,275	0,958	7,8	0,596	2,075	22,7
A33	0,2887	0,291	1,008	8,4	0,604	2,092	23,0
A40	0,2710	0,241	0,889	7,1	0,514	1,897	19,9
A41	0,2861	0,273	0,954	7,8	0,579	2,024	21,9
A42	0,2843	0,265	0,932	7,6	0,576	2,026	21,9
A43	0,2769	0,270	0,975	8,0	0,563	2,033	22,0
B00	0,2971	0,267	0,899	7,2	0,588	1,979	21,2
B01	0,2712	0,267	0,985	8,1	0,570	2,102	23,2
B02	0,3169	0,302	0,953	7,8	0,611	1,928	20,4
B03	0,2765	0,250	0,904	7,3	0,559	2,022	21,9
B10	0,2662	0,247	0,928	7,5	0,533	2,002	21,5
B11	0,2895	0,289	0,998	8,3	0,612	2,114	23,4
B12	0,2942	0,286	0,972	8,0	0,587	1,995	21,4
B13	0,2798	0,261	0,933	7,6	0,571	2,041	22,2
B20	0,3218	0,286	0,889	7,1	0,625	1,942	20,6
B21	0,3051	0,287	0,941	7,7	0,618	2,026	21,9
B22	0,2822	0,268	0,950	7,8	0,568	2,013	21,7
B23	0,2916	0,275	0,943	7,7	0,590	2,023	21,9
B30	0,2767	0,248	0,896	7,2	0,537	1,941	20,6
B31	0,3077	0,285	0,926	7,5	0,612	1,989	21,3
B32	0,3132	0,289	0,923	7,5	0,628	2,005	21,6
B33	0,2659	0,258	0,970	8,0	0,537	2,020	21,8
B40	0,2957	0,247	0,835	6,6	0,552	1,867	19,4
B41	0,2893	0,264	0,913	7,4	0,567	1,960	20,9
B42	0,3236	0,289	0,893	7,2	0,633	1,956	20,8
B43	0,2871	0,266	0,927	7,5	0,562	1,958	20,8

TABELA 8 – Resultado do mapeamento de dose nos produtos dos geradores de ^{99m}Tc , com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$), para os dosímetros de rotina C00 a D43 e de referência R1 a R3.

Dosímetro (Red Perspex)	Espessura (cm)	1º Time Setting (30min33s)			2º Time Setting (55min33s)		
		Absorbância (640 nm)	K (cm^{-1})	Dose (kGy)	Absorbância (640 nm)	K (cm^{-1})	Dose (kGy)
C00	0,2728	0,243	0,891	7,1	0,533	1,954	20,8
C01	0,2864	0,271	0,946	7,7	0,592	2,067	22,6
C02	0,2937	0,286	0,974	8,0	0,572	1,948	20,7
C03	0,2887	0,266	0,921	7,5	0,587	2,033	22,0
C10	0,2762	0,249	0,902	7,3	0,546	1,977	21,1
C11	0,2909	0,273	0,938	7,6	0,592	2,035	22,1
C12	0,3320	0,312	0,940	7,7	0,647	1,949	20,7
C13	0,2851	0,271	0,951	7,8	0,586	2,055	22,4
C20	0,2627	0,238	0,906	7,3	0,517	1,968	21,0
C21	0,3205	0,302	0,942	7,7	0,646	2,016	21,8
C22	0,2935	0,285	0,971	8,0	0,597	2,034	22,1
C23	0,2877	0,274	0,952	7,8	0,590	2,051	22,3
C30	0,2959	0,262	0,885	7,1	0,569	1,923	20,3
C31	0,2933	0,272	0,927	7,5	0,588	2,005	21,6
C32	0,2649	0,252	0,951	7,8	0,541	2,042	22,2
C33	0,2846	0,276	0,970	8,0	0,579	2,034	22,1
C40	0,2613	0,219	0,838	6,6	0,479	1,833	18,9
C41	0,2805	0,257	0,916	7,4	0,551	1,964	20,9
C42	0,2861	0,264	0,923	7,5	0,570	1,992	21,4
C43	0,3075	0,287	0,933	7,6	0,609	1,980	21,2
D00	0,2757	0,249	0,903	7,3	0,553	2,006	21,6
D01	0,2708	0,264	0,975	8,0	0,584	2,157	24,1
D02	0,2876	0,288	1,001	8,3	0,586	2,038	22,1
D03	0,2853	0,275	0,964	7,9	0,613	2,149	24,0
D10	0,2758	0,252	0,914	7,4	0,563	2,041	22,2
D11	0,3000	0,294	0,980	8,1	0,646	2,153	24,1
D12	0,2919	0,301	1,031	8,6	0,605	2,073	22,7
D13	0,3002	0,301	1,003	8,3	0,656	2,185	24,6
D20	0,2881	0,272	0,944	7,7	0,586	2,034	22,1
D21	0,3003	0,293	0,976	8,0	0,644	2,145	23,9
D22	0,2908	0,315	1,083	9,2	0,643	2,211	25,1
D23	0,2932	0,296	1,010	8,4	0,637	2,173	24,4
D30	0,2720	0,250	0,919	7,4	0,535	1,967	21,0
D31	0,2848	0,281	0,987	8,1	0,590	2,072	22,7
D32	0,2737	0,286	1,045	8,8	0,583	2,130	23,7
D33	0,2762	0,280	1,014	8,4	0,595	2,154	24,1
D40	0,2700	0,234	0,867	6,9	0,499	1,848	19,1
D41	0,2660	0,263	0,989	8,2	0,551	2,071	22,7
D42	0,2913	0,289	0,992	8,2	0,601	2,063	22,5
D43	0,2709	0,268	0,989	8,2	0,556	2,052	22,4
R1	0,2955	0,340	1,151	10,0	0,703	2,379	28,3
R2	0,2766	0,325	1,175	10,2	0,667	2,411	29,0
R3	0,2848	0,338	1,187	10,4	0,686	2,409	28,9

Os valores das Tabelas 7 e 8 mostram que as doses máxima ($D_{\max}$) e mínima ($D_{\min}$) encontradas no mapeamento de dose nos produtos dos geradores de ^{99m}Tc , com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$) são de 25,1 e 18,9 kGy, respectivamente. Utilizando-se a equação 3.5, obteve-se o valor do fator de uniformidade de dose (f) de 1,33.

Na Tabela 8, o valor da dose média nos dosímetros de referência R1, R2 e R3 é de $28,7 \pm 0,4 \text{ kGy}$. Mantendo-se as dimensões das embalagens, a orientação e densidade aparente dos produtos dos geradores de ^{99m}Tc , além da orientação das mesmas nas caixas em alumínio do irradiador multipropósito, pode-se associar o valor da dose média de referência obtido, com os valores das doses máxima ($D_{\max}$) e mínima ($D_{\min}$). Assim, nos processamentos rotineiros desses produtos serão utilizados os dosímetros de referência, nas caixas em alumínio do irradiador multipropósito, principalmente, quando não for possível posicionar os dosímetros de rotina, nos pontos de doses máxima e mínima.

Na Figura 62 é mostrada a distribuição tridimensional das doses nos produtos dos geradores de ^{99m}Tc , processados no irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. A dose solicitada pelo Centro de Radiofarmácia – CR do IPEN-CNEN/SP foi de 20 kGy.



FIGURA 62 – Distribuição tridimensional das doses (kGy) nos produtos dos geradores de ^{99m}Tc , com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$) e fator de uniformidade de dose de 1,33. Os valores para as doses máxima, mínima e de referência encontram-se nas posições D22 (25,1 kGy), C40 (18,9 kGy) e R2 (29,0 kGy), respectivamente.

Conhecendo-se a massa total das 6 caixas de papelão, com os produtos dos geradores de ^{99m}Tc mais a caixa em alumínio (41,4 kg) e o *time setting* total para processamento dos produtos (85 minutos e 66 segundos), determinou-se o valor do *throughput* (X) de $28,9 \text{ kg/h}$. Assim, utilizando-se a equação 3.6, para a atividade (A^{60}_{Co}) de $3.407,7 \text{ TBq}$ (92.099 Ci) e dose (D) de $19,8 \text{ kGy}$ (valor da dose mínima de $18,9 \text{ kGy}$, majorada à imprecisão máxima do sistema dosimétrico de 5%), obteve-se o valor de 0,116 (11,6%), para o fator de eficiência (F) do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, para densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$).

4.6.2 - Mapeamento de Dose nos Produtos para Biotério

A massa total (m_t) dos 10 sacos de ração animal para biotério mais a caixa em alumínio é de 224 kg. Assim, utilizando-se a equação 3.1, a densidade aparente (d) dos produtos para biotério é de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3).

Os resultados das medidas de espessura (e), absorbância (A) e absorbância específica (K), da equação 3.2 e dose absorvida (D) da equação 3.3, obtidos para os 83 dosímetros tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD), após o término da irradiação, utilizados no mapeamento de dose nos produtos para biotério (ração animal) são apresentados nas Tabelas 9 e 10.

TABELA 9 – Resultado do mapeamento de dose nos produtos para biotério (ração animal), com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3), para os dosímetros de rotina A00 a B43, tipo *Red Perspex* 4034 (lote GD).

Dosímetro (Red Perspex)	Espessura (cm)	1º Time Setting (30min33s)			2º Time Setting (30min33s)		
		Absorbância (640 nm)	K (cm^{-1})	Dose (kGy)	Absorbância (640 nm)	K (cm^{-1})	Dose (kGy)
A00	0,2651	0,222	0,837	6,6	0,360	1,358	12,4
A01	0,3009	0,263	0,874	7,0	0,421	1,399	12,9
A02	0,2781	0,247	0,888	7,1	0,392	1,410	13,1
A03	0,3018	0,260	0,861	6,8	0,428	1,418	13,2
A10	0,2951	0,250	0,847	6,7	0,416	1,410	13,1
A11	0,2995	0,266	0,888	7,1	0,425	1,419	13,2
A12	0,2948	0,255	0,865	6,9	0,415	1,408	13,1
A13	0,3123	0,285	0,913	7,4	0,469	1,502	14,3
A20	0,2738	0,228	0,833	6,6	0,376	1,373	12,6
A21	0,2918	0,269	0,922	7,5	0,435	1,491	14,1
A22	0,2684	0,199	0,741	5,7	0,348	1,297	11,7
A23	0,3081	0,277	0,899	7,2	0,472	1,532	14,7
A30	0,2739	0,252	0,920	7,4	0,408	1,490	14,1
A31	0,3222	0,298	0,925	7,5	0,490	1,521	14,5
A32	0,2838	0,240	0,846	6,7	0,391	1,378	12,7
A33	0,2704	0,256	0,947	7,7	0,416	1,538	14,7
A40	0,2968	0,262	0,883	7,1	0,433	1,459	13,7
A41	0,2755	0,253	0,918	7,4	0,423	1,535	14,7
A42	0,2907	0,253	0,870	6,9	0,422	1,452	13,6
A43	0,3217	0,291	0,905	7,3	0,483	1,501	14,3
B00	0,2791	0,188	0,674	5,1	0,311	1,114	9,5
B01	0,3073	0,203	0,661	4,9	0,331	1,077	9,1
B02	0,2920	0,188	0,644	4,8	0,316	1,082	9,2
B03	0,2866	0,214	0,747	5,7	0,357	1,246	11,1
B10	0,2865	0,196	0,684	5,2	0,325	1,134	9,8
B11	0,2877	0,173	0,601	4,4	0,283	0,984	8,1
B12	0,2968	0,174	0,586	4,3	0,285	0,960	7,9
B13	0,2995	0,229	0,765	5,9	0,384	1,282	11,5
B20	0,3088	0,198	0,641	4,8	0,339	1,098	9,4
B21	0,3186	0,193	0,606	4,5	0,327	1,026	8,6
B22	0,2937	0,176	0,599	4,4	0,314	1,069	9,0
B23	0,3182	0,243	0,764	5,9	0,420	1,320	12,0
B30	0,3162	0,223	0,705	5,3	0,375	1,186	10,4
B31	0,2986	0,183	0,613	4,5	0,308	1,031	8,6
B32	0,3270	0,201	0,615	4,5	0,330	1,009	8,4
B33	0,2852	0,234	0,820	6,4	0,390	1,367	12,5
B40	0,2820	0,200	0,709	5,4	0,334	1,184	10,3
B41	0,2875	0,202	0,703	5,3	0,338	1,176	10,2
B42	0,2756	0,193	0,700	5,3	0,306	1,110	9,5
B43	0,2952	0,239	0,810	6,3	0,391	1,325	12,0

TABELA 10 – Resultado do mapeamento de dose nos produtos para biotério (ração animal), com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3), para os dosímetros de rotina C00 a D43 e de referência R1 a R3.

Dosímetro (Red Perspex)	Espessura (cm)	1º Time Setting (30min33s)			2º Time Setting (30min33s)		
		Absorbância (640 nm)	K (cm^{-1})	Dose (kGy)	Absorbância (640 nm)	K (cm^{-1})	Dose (kGy)
C00	0,2968	0,206	0,694	5,2	0,339	1,142	9,9
C01	0,2930	0,179	0,611	4,5	0,311	1,061	9,0
C02	0,2980	0,188	0,631	4,7	0,322	1,081	9,2
C03	0,3071	0,227	0,739	5,7	0,388	1,263	11,3
C10	0,3092	0,211	0,682	5,1	0,357	1,155	10,0
C11	0,3086	0,173	0,561	4,1	0,305	0,988	8,2
C12	0,2903	0,165	0,568	4,2	0,277	0,954	7,8
C13	0,3101	0,237	0,764	5,9	0,401	1,293	11,6
C20	0,2776	0,189	0,681	5,1	0,323	1,164	10,1
C21	0,3110	0,185	0,595	4,4	0,328	1,055	8,9
C22	0,2880	0,180	0,625	4,6	0,323	1,122	9,6
C23	0,2925	0,219	0,749	5,8	0,374	1,279	11,5
C30	0,2678	0,198	0,739	5,7	0,328	1,225	10,8
C31	0,2813	0,174	0,619	4,6	0,298	1,059	8,9
C32	0,2782	0,176	0,633	4,7	0,292	1,050	8,8
C33	0,3268	0,254	0,777	6,0	0,435	1,331	12,1
C40	0,2875	0,215	0,748	5,7	0,355	1,235	10,9
C41	0,2787	0,195	0,700	5,3	0,331	1,188	10,4
C42	0,2935	0,202	0,688	5,2	0,324	1,104	9,4
C43	0,3209	0,247	0,770	5,9	0,410	1,278	11,4
D00	0,2743	0,227	0,828	6,5	0,382	1,393	12,9
D01	0,2651	0,216	0,815	6,4	0,373	1,407	13,0
D02	0,3056	0,251	0,821	6,4	0,429	1,404	13,0
D03	0,2857	0,246	0,861	6,8	0,424	1,484	14,0
D10	0,2951	0,254	0,861	6,8	0,427	1,447	13,6
D11	0,2822	0,222	0,787	6,1	0,397	1,407	13,0
D12	0,2941	0,254	0,864	6,9	0,428	1,455	13,7
D13	0,3084	0,271	0,879	7,0	0,481	1,560	15,0
D20	0,2906	0,232	0,798	6,2	0,402	1,383	12,7
D21	0,2825	0,222	0,786	6,1	0,394	1,395	12,9
D22	0,3004	0,261	0,869	6,9	0,462	1,538	14,7
D23	0,2738	0,266	0,972	8,0	0,445	1,625	15,9
D30	0,3213	0,307	0,955	7,8	0,514	1,600	15,6
D31	0,2714	0,247	0,910	7,3	0,419	1,544	14,8
D32	0,2679	0,245	0,915	7,4	0,408	1,523	14,5
D33	0,2826	0,268	0,948	7,7	0,465	1,645	16,2
D40	0,2705	0,247	0,913	7,4	0,408	1,508	14,3
D41	0,2868	0,249	0,868	6,9	0,427	1,489	14,1
D42	0,2758	0,237	0,859	6,8	0,412	1,494	14,2
D43	0,2907	0,273	0,939	7,6	0,465	1,600	15,6
R1	0,3127	0,354	1,132	9,7	0,581	1,858	19,3
R2	0,3057	0,329	1,076	9,1	0,562	1,838	19,0
R3	0,2851	0,322	1,129	9,7	0,555	1,947	20,6

Os valores apresentados nas Tabelas 9 e 10 mostram que as doses máxima ($D_{\max}$) e mínima ($D_{\min}$) encontradas no mapeamento de dose nos produtos para biotério (ração animal), com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3) são de 16,2 kGy e 7,8 kGy, respectivamente. Utilizando-se a equação 3.5, obteve-se o valor do fator de uniformidade de dose (f) de 2,08.

Na Tabela 10, o valor da dose média nos dosímetros de referência R1, R2 e R3 é de $19,6 \pm 0,8 \text{ kGy}$. Mantendo-se as dimensões das embalagens, a orientação e densidade aparente dos produtos para biotério (ração animal), além da orientação das mesmas nas caixas em alumínio do irradiador multipropósito, pode-se associar o valor da dose média de referência obtido, com os valores de doses máxima ($D_{\max}$) e mínima ($D_{\min}$). Assim, nos processamentos rotineiros desses produtos serão utilizados os dosímetros de referência, nas caixas em alumínio do irradiador multipropósito, principalmente, quando não for possível posicionar os dosímetros de rotina, nos pontos de doses máxima e mínima.

Na Figura 63 é mostrada a distribuição tridimensional das doses nos produtos para biotério (ração animal), processados no irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. A dose absorvida solicitada pelo Centro de Biologia Molecular – CBM do IPEN-CNEN/SP foi de 10 kGy.



FIGURA 63 – Distribuição tridimensional das doses (kGy) nos produtos para biotério (ração animal), com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3) e fator de uniformidade de dose de 2,08. Os valores para as doses máxima, mínima e de referência encontram-se nas posições D33 (16,2 kGy), C12 (7,8 kGy) e R2 (19,0 kGy), respectivamente.

Conhecendo-se a massa total dos 10 sacos de ração animal para biotério mais a caixa em alumínio (224 kg) e o *time setting* total para processamento dos produtos (60 minutos e 66 segundos), determinou-se o valor do *throughput* (X) de 220 kg/h. Assim, utilizando-se a equação 3.6, para a atividade (A^{60}_{Co}) de 3.407,7 TBq (92.099 Ci) e dose (D) de 8,2 kGy (valor da dose mínima de 7,8 kGy, majorada à imprecisão máxima do sistema dosimétrico de 5%), obteve-se o valor de 0,366 (36,6%), para o fator de eficiência (F) do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, para densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3).

4.7 – 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*, para densidades aparentes de 0,09 e 0,49 g/cm³, os quais também possuem sistemas de transporte contínuo, tipo *tote box* (*JS-9500TM*, *JS-9600TM* e *JS-10000TM*) e *pallet* (*Pallet IrradiatorTM*) são apresentados na Tabela 11. As características técnicas do irradiador multipropósito, comparadas as dos irradiadores da *MDS Nordion Ion Technologies* são apresentadas na Tabela 12.

TABELA 11 – Fatores de uniformidade de dose (f) e eficiência (F) do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e dos irradiadores comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies*, para densidades aparentes de 0,09 e 0,49 g/cm³¹⁵.

Irradiadores / Fatores	Irradiador Multipropósito	Pallet Irradiator (design 8)	JS-9500	JS-9600	JS-10000 (design 1)	JS-10000 (design 2)
Densidade Aparente de 0,09 g/cm³						
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 g/cm³						
Uniformidade de dose (f)	2,08	3,15	⁽²⁾ 1,85	⁽¹⁾ 1,65	⁽²⁾ 1,85	1,90
Eficiência (F) (%)	36,6	23,4	⁽²⁾ 35,5	⁽¹⁾ 33,7	41,1	⁽²⁾ 44,9

⁽¹⁾ Densidade aparente de 0,30 g/cm³ e

⁽²⁾ Densidade aparente de 0,40 g/cm³.

Os valores dos fatores de uniformidade de dose e eficiência apresentados na Tabela 11, para os irradiadores comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies* representam a configuração de eficiência máxima das fontes de ^{60}Co , com distribuição uniforme e otimizada.

Apesar do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP possuir apenas 13 lápis de ^{60}Co , em seus 2 (dois) *racks* de fontes, os valores encontrados para os fatores de uniformidade de dose de 1,33 e 2,08 e eficiência de 11,6 e 36,6%, dos produtos com densidades de 0,09 e 0,49 g/cm³, respectivamente, demonstram que o sistema de irradiação desenvolvido nesta tese, apresenta excelente desempenho e é extremamente competitivo, quando comparado aos dos irradiadores comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies*, principalmente no processamento dos produtos com densidades maiores (0,49 g/cm³).

Os irradiadores gama de grande porte *JS-10000TM designs 1 e 2*, apresentam maiores valores de eficiência, no processamento dos produtos com densidades de 0,09 e 0,49 g/cm³, quando comparado ao irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, em função do maior número de passes dos produtos ao redor das fontes de ^{60}Co , até oito passes em dois níveis, no *JS-10000TM*.

O sistema de irradiação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto é o único que possibilita o processamento dos produtos por radiação, com densidade máxima até $0,90 \text{ g/cm}^3$, quando comparado aos dos irradiadores comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies*, apresentados na Tabela 12. Os valores obtidos para os fatores de uniformidade de dose de 2,08 e eficiência de 36,6%, nos produtos com densidade de $0,49 \text{ g/cm}^3$, associados à densidade máxima de processamento dos produtos de $0,90 \text{ g/cm}^3$, demonstram que o sistema de irradiação desenvolvido, para o irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP é ideal na preservação e desinfestação de alimentos e produtos agrícolas, por radiação ionizante.

TABELA 12 – Características técnicas do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e dos irradiadores comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies* (*Pallet Irradiator*TM, *JS-9500*TM, *JS-9600*TM e *JS-10000*TM)¹⁵.

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>
Capacidade da Instalação (MCi)	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	5,0
Quantidade de Tote Box / Pallet	14	19	47	47	48	48
Dimensões do Tote Box / Pallet (mm)	690x650x1.030	1.200x1.000x1.950	665x550x990	665x550x1.425	800x515x1.530	1.041x622x1.829
Capacidade do Tote Box / Pallet (kg)	400	1.000	145	160	378	475
Densidade Máxima do Produto (g/cm^3)	0,9	0,5	0,4	0,3	0,6	0,4
Dimensões do Bunker (m)	7,6x10,0	14,0x24,5	11,2x17,7	11,2x17,7	15,2x26,3	18,0x31,0

⁽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 das fontes de ^{60}Co e

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

Os valores dos fatores de uniformidade de dose (f) e eficiência (F) do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP, para densidades aparentes de 0,09 e 0,49 g/cm³, comparados aos irradiadores comerciais tipo compacto da *MDS Nordion Ion Technologies (BREVIONTM)*, *SteriGenics International, Inc. (MICROCELLTM e MINICELLTM)* e *Picowave Technology (BP1 Pallet IrradiatorTM)*, com processamento dos produtos por radiação em bateladas (*batches*) são apresentados na Tabela 13. As características técnicas do irradiador multipropósito, comparadas as dos irradiadores compacto comerciais são apresentadas na Tabela 14.

TABELA 13 – Fatores de uniformidade de dose (f) e eficiência (F) do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e dos irradiadores compactos comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies (BREVIONTM)*, *SteriGenics International, Inc. (MICROCELLTM e MINICELLTM)* e *Picowave Technology (BP1 Pallet IrradiatorTM)*, para densidades aparentes de 0,09 e 0,49 g/cm³ ^{6,8,15-17}.

Irradiadores / Fatores	Irradiador Multipropósito	BREVION	MICROCELL	MINICELL	BP1 Pallet Irradiator
Densidade Aparente de 0,09 g/cm³					
Uniformidade de dose (f)	1,33	⁽⁵⁾ -----	⁽¹⁾ 1,40	⁽⁵⁾ -----	⁽¹⁾ 1,30
Eficiência (F) (%)	11,6	^(1,4) 11,8 ou 12,3	⁽⁵⁾ -----	⁽¹⁾ 16,6	⁽¹⁾ 13,6
Densidade Aparente de 0,49 g/cm³					
Uniformidade de dose (f)	2,08	⁽⁵⁾ -----	⁽⁵⁾ -----	⁽⁵⁾ -----	⁽³⁾ 2,60
Eficiência (F) (%)	36,6	^(2,4) 31,0 ou 32,2	⁽⁵⁾ -----	⁽⁵⁾ -----	⁽³⁾ 31,2

⁽¹⁾ Densidade aparente de 0,10 g/cm³;

⁽²⁾ Densidade aparente de 0,40 g/cm³;

⁽³⁾ Densidade aparente de 0,45 g/cm³;

-
- ⁽⁴⁾ Mecanismo de movimentação disponível em duas configurações: 32 ou 40 *tote boxes*, respectivamente e
- ⁽⁵⁾ Não informado pelo fabricante.

Os valores encontrados para os fatores de uniformidade de dose de 1,33 e 2,08 e eficiência de 11,6 e 36,6%, dos produtos com densidades de 0,09 e 0,49 g/cm³, respectivamente, demonstram que o sistema de irradiação desenvolvido, para o irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP apresenta excelente desempenho e é extremamente competitivo, quando comparado aos dos irradiadores comerciais tipo compactos da *MDS Nordion Ion Technologies*, *SteriGenics International, Inc.* e *Picowave Technology*, principalmente no processamento dos produtos com densidades maiores (0,49 g/cm³).

TABELA 14 – Características técnicas do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP e dos irradiadores compactos comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies (BREVION™)*, *SteriGenics International, Inc. (MICROCELL™)* e *MINICELL™* e *Picowave Technology (BP1 Pallet Irradiator™)* ^{6,8,15-17}.

Irradiadores / Fatores	Irradiador Multipropósito	BREVION	MICROCELL	MINICELL	BP1 Pallet Irradiator
Capacidade da Instalação (kCi)	2.000	1.000	60	2.000	1.200
Quantidade de Tote Box / Pallet	14	⁽²⁾ 32 ou 40	4	21	4
Volume do Tote Box / Pallet (m³)	0,46	⁽²⁾ 0,27 ou 0,22	0,34	0,43	1,34
Capacidade do Tote Box / Pallet (kg)	400	88	275	204	605
Densidade Máxima do Produto (g/cm³)	0,90	0,40	0,81	0,47	0,45
Volume Processado por Batelada (m³)	⁽⁴⁾ 6,47	⁽²⁾ 8,61 ou 8,96	1,36	8,94	5,38
⁽¹⁾ Dimensões do Bunker (m)	7,6x10,0x6,0	11,3x7,3x4,9	4,0x4,0x2,7	6,1x6,4x3,7	⁽³⁾ -----

⁽¹⁾ Comprimento, largura e altura;

⁽²⁾ Mecanismo de movimentação disponível em duas configurações: 32 ou 40 *tote boxes*, respectivamente;

⁽³⁾ Não informado pelo fabricante e

⁽⁴⁾ Capacidade da câmara de irradiação, em processamento contínuo.

O sistema de irradiação desenvolvido, para o irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP possibilita uma maior capacidade instalada em Cobalto-60 e é o único que processa produtos por radiação de forma contínua, com densidade máxima até 0,90 g/cm³, quando comparado aos irradiadores comerciais tipo

compactos, apresentados na Tabela 14. Assim, torna-se ideal na preservação e desinfestação de alimentos e produtos agrícolas por radiação ionizante.

4.8 – ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO E DO IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP

Com o propósito de se obterem parâmetros financeiros do sistema de irradiação e do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, incluindo o custo unitário de processamento dos produtos por radiação ionizante (raios gama), adotou-se a metodologia descrita no *USDA Technical Bulletin n. 1762* e pela Divisão de Irradiação de Alimentos da *MDS Nordion Ion Technologies*, maior fabricante internacional de fontes industriais de ^{60}Co e irradiadores gama^{1,30,31}.

O custo total do investimento considera todos os gastos envolvidos durante as fases de projeto, construção e implantação do irradiador multipropósito, até os testes pré-operacionais. Os custos de investimento inicial da instalação radiativa, financiados pelo IPEN-CNEN/SP (aquisição de 510 m³ de concreto para blindagem radiológica, fundações, pisos e portas giratória e deslizante) e pela FAPESP são apresentados na Tabela 15.

A quantidade de homem-hora despendida na construção e implantação do irradiador multipropósito, pelos profissionais do CTR e IPEN-CNEN/SP somam 2.000 horas em engenharia mecânica, 1.000 horas em engenharia eletrônica e eletrotécnica, 12.000 horas em nível técnico e 400 horas em nível superior especializados em tecnologia nuclear. Utilizando-se os valores médios dos proventos recebidos pelos funcionários do Instituto e atribuindo-lhes o fator dois, para torná-los compatíveis com os encargos trabalhistas incidentes na iniciativa privada (US\$ 4.000,00/mês para nível superior sênior e US\$ 1.800,00/mês para nível técnico), obteve-se o valor total em mão-de-obra de US\$ 204.651,00 (US\$ 1,00 = R\$ 3,00).

TABELA 15 – Custos de investimento inicial para instalação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto no IPEN-CNEN/SP, com financiamento FAPESP.

Descrição dos Custos Iniciais	Investimentos ⁽¹⁾ (US\$)
Projeto de engenharia (10% do investimento total, exceto as fontes radioativas de ^{60}Co) ³¹	69,052
<i>Liner</i> da piscina de armazenamento das fontes de ^{60}Co	20,000
Blindagem radiológica (510 m ³ de concreto) e infra-estrutura de radioproteção	27,000
Materiais elétricos, eletrônicos, hidráulicos, mecânicos, pneumáticos e de construção civil, entre outros materiais de consumo	100,800
Máquinas, Sistemas e Equipamentos (tratamento de água da piscina, elevação dos <i>racks</i> de fontes, exaustão da câmara de irradiação, grupo motogerador (85 kVA), compressor de ar, empilhadeiras, bombas d'água, unidade hidráulica e ferramentas), entre outros materiais permanentes	30,000
Detector de sismo e sensores de radiação (câmara de ionização e Geiger-Müller)	21,224
Sistema de transporte dos produtos	50,000
Sistemas de controle de processo, segurança e intertravamento	60,000
Montagem do sistema de transporte dos produtos, <i>liner</i> da piscina, caldeiraria e montagem dos materiais estruturais para blindagem radiológica, entre outros serviços de terceiros	111,844
Galpão de armazenamento dos produtos	55,000
Fontes radioativas de ^{60}Co (3.407,7 TBq ou 92.099 Ci)	145,000
Licenciamento da instalação radiativa, junto à CNEN, CETESB e IBAMA	10,000
Mão-de-obra especializada do CTR e IPEN-CNEN/SP (construção e implantação)	204,651
Custo total do investimento	904,571

⁽¹⁾ US\$ 1.00 = R\$ 3,00.

Os custos baixos de investimento inicial do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP (US\$ 904,571.00, atividade de 92.099 Ci), quando comparado aos irradiadores compactos (US\$ 500,000.00, somente o projeto do *BPI Pallet IrradiatorTM* - *Picowave Technology*) e Comerciais (US\$ 2,5 milhões, somente o irradiador *JS-10000TM* - *MDS Nordion Ion Technologies*) existentes no mercado internacional, viabilizam a sua construção e implantação de forma integrada aos processos produtivos, nas empresas no País ^{15,17}.

Os custos operacionais do sistema de irradiação e do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP são divididos em fixos e variáveis. Na análise desses custos nos irradiadores comerciais, assume-se a atividade mínima em fontes radioativas de ^{60}Co de 18,5 PBq (0,5 MCi), para se atingir o *break-even point* da instalação. Trata-se do ponto de equilíbrio no qual a receita proveniente dos serviços prestados de irradiação é igual aos custos operacionais fixos e variáveis para realização dos mesmos. Assim, com o irradiador multipropósito operando futuramente a 18,5 PBq, a um custo de US\$ 1 Milhão em ^{60}Co , praticado pela *MDS Nordion Ion Technologies* e financiado por Agências e Órgãos de Fomento à Pesquisa no País, o custo total do investimento inicial apresentado na Tabela 15 passa a ser de US\$ 1,759,571.00.

Nos cálculos dos custos operacionais variáveis pela iniciativa privada, atribuindo-se o fator dois aos proventos com os encargos trabalhistas, a mão-de-obra direta é constituída por um coordenador de operação e manutenção (US\$ 2,400.00/mês), um supervisor de radioproteção (US\$ 2,400.00/mês), quatro operadores (US\$ 3,200.00/mês, sendo técnicos de nível médio capacitados para realizarem trabalhos de manutenção) e oito auxiliares de operação (US\$ 3,200.00/mês). Atendendo-se a Norma CNEN-NE-6.02, o coordenador de operação e manutenção acumulará a função de substituto do supervisor de radioproteção ¹⁴. Em condição real, o regime de trabalho para operação rotineira do irradiador multipropósito é constituído por 3 turnos, trabalhando 24 horas/dia, 7 dias por semana, totalizando 8.000 horas/ano. Os valores dos custos operacionais fixos e variáveis do irradiador multipropósito são apresentados na Tabela 16.

TABELA 16 – Custos operacionais fixos e variáveis do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP operando, futuramente, 8.000 horas/ano com atividade de 18,5 PBq (0,5 MCi).

Descrição dos Custos Operacionais (Anual)	Valor (¹⁾ (US\$)
Custos Fixos	
Depreciação da instalação radiativa (20 anos e taxa de juros de 5% ao ano, exceto as fontes radioativas de ⁶⁰ Co) ³¹	60,950
Custo do capital investido (taxa de juros de 5% ao ano) ³¹	87,979
Administrativos: seguros e taxas (2% do custo do investimento total) ³¹	35,191
Subtotal	184,120
Custos Variáveis	
Dcaimento radioativo das fontes de ⁶⁰ Co (reposição de 12,34% da atividade de 18,5 PBq ao ano) ³¹	125,000
Manutenção (3,5% do investimento total, exceto as fontes radioativas de ⁶⁰ Co) ³¹	26,585
Mão-de-obra direta, com encargos trabalhistas	134,400
Subtotal	285,985
Custo Operacional Total	470,105
Custo Operacional Unitário (US\$/h)	(²) 58.76

(¹) US\$ 1.00 = R\$ 3,00 e

(²) Irradiador multipropósito operando a 8.000 horas/ano.

Conhecendo-se o custo operacional unitário (US\$/h) e a quantidade processada (kg/h), obtém-se o custo unitário de processamento dos produtos no irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto. No cálculo do *throughput* (X), utiliza-se a equação 4.1, resultante da equação 2.5:

$$X = A^{60}\text{Co} \frac{F}{18,7.D} \quad (4.1)$$

na qual,

- $X = \text{throughput}$ (kg/h);
- F = fator de eficiência do irradiador;
- D = dose absorvida (kGy) e
- A^{60}_{Co} = atividade em ^{60}Co (Ci, 1 Ci = 37 GBq).

Para os produtos dos geradores de ^{99m}Tc , com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$), fator de eficiência (F) de 0,116 (11,6%) e dose (D) de 19,8 kGy, processados no irradiador multipropósito com atividade (A^{60}_{Co}) de 18,5 PBq (0,5 MCi), obteve-se o *throughput* (X) de 156,7 kg/h. Conhecendo-se o custo operacional unitário de US\$ 58.76/hora, o custo unitário de processamento das tampas e mangueiras poliméricas dos geradores de ^{99m}Tc é de US\$ 33.92/m³. Os valores praticados pelas empresas prestadoras de serviços de irradiação, para produtos médicos, cirúrgicos e biológicos, com densidades entre $0,07$ e $0,20 \text{ g/cm}^3$, encontram-se na faixa de US\$ 60.00 a US\$ 80.00 por metro cúbico.

No caso dos produtos para biotério, com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3), fator de eficiência (F) de 0,366 (36,6%) e dose (D) de 8,2 kGy, processados no irradiador multipropósito com atividade (A^{60}_{Co}) de 18,5 PBq (0,5 MCi), obteve-se o *throughput* (X) de 1.193,4 kg/h. Conhecendo-se o custo operacional unitário de US\$ 58.76/hora, o custo unitário de processamento da ração animal para biotério é de US\$ 49.24/tonelada. Os valores praticados no mercado, para desinfestação de pragas em alimentos com dose até 2 kGy, encontram-se na faixa de US\$ 10.00 a US\$ 15.00 por tonelada. Para se garantir a qualidade higiênica dos alimentos com doses altas de 10 kGy, os valores praticados estão entre US\$ 100.00 a US\$ 250.00 por tonelada ⁵⁵.

4.9 – DESEMPENHO ANUAL DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO DESENVOLVIDO PARA O IRRADIADOR MULTIPROPÓSITO DO IPEN-CNEN/SP

4.9.1 – Produtos Médicos, Cirúrgicos e Biológicos

Utilizando-se a equação 4.1, para produtos médicos, cirúrgicos e biológicos, com densidade aparente de $0,09 \text{ g/cm}^3$ ($90,4 \text{ kg/m}^3$), fator de eficiência (F) de 0,116 (11,6%) e dose (D) de 19,8 kGy, processados no irradiador multipropósito com atividade ($A^{60\text{Co}}$) de 18,5 PBq (0,5 MCi), operando a 8.000 horas/ano, obteve-se a capacidade de processamento de $13.867 \text{ m}^3/\text{ano}$.

4.9.2 – Produtos para Biotério (Ração Animal)

No caso de ração animal, com densidade aparente de $0,49 \text{ g/cm}^3$ (487 kg/m^3), fator de eficiência (F) de 0,366 (36,6%) e dose (D) de 8,2 kGy, processada no irradiador multipropósito com atividade ($A^{60\text{Co}}$) de 18,5 PBq (0,5 MCi), operando a 8.000 horas/ano, obteve-se a capacidade de processamento de 9.547 toneladas/ano.

5 - CONCLUSÕES

No projeto e construção do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP, o aplicativo *Cadgamma* foi imprescindível no planejamento da geometria de irradiação (*product overlap source*), sistema de transporte dos produtos (*tote box*, contínuo e duplo empilhamento de caixas), rota de passagem dos produtos (quatro passes, em dois níveis) 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 dos produtos.

No sistema de transporte dos produtos, do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP, os cilindros hidráulicos são fixados na parte superior externa da câmara de irradiação, evitando-se constantes degradações dos componentes poliméricos e borrachas pela radiação gama e, conseqüentemente, manutenções corretivas, além dos prejuízos com longas paradas da planta de irradiação (dificuldades e altos custos na importação das peças de reposição). O sistema de transporte dos produtos acionado por cilindros hidráulicos trabalha suavemente, quando comparado aos cilindros pneumáticos, instalados nos irradiadores compactos e de grande porte, dos fabricantes internacionais. Além dessas vantagens técnicas e econômicas, todos os manuais do sistema de irradiação e do irradiador multipropósito estão em Português, as peças sobressalentes e equipamentos utilizados são nacionais, facilitando a operação e as manutenções preventivas e corretivas.

Utilizando-se a metodologia de análise de riscos, por meio da construção das árvores de falhas ou de eventos, dois cenários de riscos são considerados para o sistema de irradiação, do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP, sob o ponto de vista de acidentes e incidentes radiológicos (Exposição Acidental de Indivíduos e Liberação de Material Radioativo). Com isso, a eficiência do sistema de segurança e intertravamento da instalação radiativa é avaliada e as deficiências apontadas são retificadas.

Nos mapeamentos de dose nos produtos, com densidades de 0,09 e 0,49 g/cm³, os valores encontrados para os fatores de uniformidade de dose de 1,33 e 2,08 e eficiência de 11,6 e 36,6%, respectivamente, demonstram que o sistema de irradiação desenvolvido nesta tese, para o irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP, apresenta excelente desempenho e é extremamente competitivo, principalmente no processamento dos produtos com densidades maiores (0,49 g/cm³), quando comparado aos irradiadores compactos comerciais e os de grande porte da *MDS Nordion Ion Technologies*, maior e mais tradicional fabricante de irradiadores gama no mercado internacional.

O sistema de irradiação do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto possibilita o processamento dos produtos por radiação, com densidade máxima até 0,90 g/cm³. Essa característica técnica, associada aos valores obtidos para os fatores de uniformidade de dose de 2,08 e eficiência de 36,6%, nos produtos com densidade de 0,49 g/cm³, demonstram que o sistema de irradiação do irradiador multipropósito é ideal na preservação e desinfestação de alimentos e produtos agrícolas por radiação ionizante.

Os custos de investimento inicial (US\$ 904,571.00, atividade de 92.099 Ci), custos operacionais fixos (US\$ 184,120.00) e variáveis (US\$ 285,985.00), custos operacionais total (US\$ 470,105.00) e unitário (US\$ 58.76/hora) e os custos unitários de processamento para produtos médicos, cirúrgicos, biológicos (US\$ 33.92/m³, dose de 19,8 kGy) e alimentos (US\$ 49.24/tonelada, dose de 8,2 kGy), obtidos de forma bastante conservadoras, confirmam a grande viabilidade técnica e econômica, do sistema de irradiação desenvolvido neste trabalho. Os baixos custos de investimento inicial do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP, quando comparado aos irradiadores compactos comerciais existentes no mercado internacional, viabilizam a sua construção e implantação de forma integrada aos processos produtivos, nas empresas no País.

A capacidade de processamento anual do sistema de irradiação desenvolvido nesta tese mostra-se competitiva, quando comparada aos irradiadores compactos comerciais internacionais. Com atividade correspondente ao *break-even point* da instalação, ou seja, 18,5 PBq (0,5 MCi), operando a 8.000 horas/ano, o irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto processa 13.876 m³ de produtos médicos, cirúrgicos e biológicos por ano

(densidade de $0,09 \text{ g/cm}^3$ e dose de $19,8 \text{ kGy}$) e 9.547 toneladas de alimentos por ano (densidade de $0,49 \text{ g/cm}^3$ e dose de $8,2 \text{ kGy}$).

Os Relatórios de Análise de Segurança: “Aprovação Prévia” e “Licença de Construção”; e o “Plano de Transporte (AT-07/04)” exigidos e já aprovados pela CNEN; “Memorial de Caracterização do Empreendimento” e “Solicitação de Certificado de Dispensa de Licença de Instalação (CDLI – 45001957/03)” 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-CNEN/SP. O Relatório de Análise de Segurança: “Autorização para Operação”; encontra-se em fase de análise e aprovação, na Coordenação Geral de Licenciamento e Controle – CGLC, da CNEN.

Com o irradiador multipropósito, vários projetos de pesquisa e desenvolvimento no IPEN-CNEN/SP serão beneficiados, bem como, os das comunidades científicas nacional e internacional, viabilizando as aplicações das radiações em processos industriais, contribuindo para a otimização dos processos produtivos, aumentando-se a competitividade dos produtos nacionais e a atualização tecnológica do País.

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 – Programa de Qualificação do Irradiador Multipropósito do IPEN-CNEN/SP

Concluir o programa de qualificação do irradiador multipropósito do IPEN-CNEN/SP, com o mapeamento de dose em, pelo menos, dois produtos com densidades aparentes (d) entre 0,20 e 0,40 g/cm³. Com base nos resultados dos fatores de uniformidade (f) e eficiência (F), obtidos para diferentes densidades aparentes (0,09 a 0,49 g/cm³), construir os seguintes gráficos, comparando-se o irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, aos irradiadores comerciais da *MDS Nordion Ion Technologies*, os quais também possuem sistemas de transporte contínuo, tipo *tote box* (*JS-9500TM*, *JS-9600TM* e *JS-10000TM*) e *pallet* (*PALLET IRRADIATORTM*):

- Densidade aparente do produto (g/cm³) versus fator de uniformidade de dose ($D_{\max}/D_{\min}$);
- Densidade aparente do produto (g/cm³) versus capacidade de processamento em volume (*volume throughput*, m³/h/MCi), para dose de 20 kGy e
- Densidade aparente do produto (g/cm³) versus capacidade de processamento em massa (*mass throughput*, tonelada/h/MCi), para dose de 1 kGy.

6.2 - Instalação Radiativa para Manipulação de Fontes Seladas de Atividade Alta

Construir, implantar e certificar a primeira instalação radiativa para manipulação de fontes seladas de atividade alta, conjugada ao irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto, do IPEN-CNEN/SP.

Nos últimos anos, o Brasil tem se mostrado o País mais avançado em termos de instalações radiativas e nucleares em operação, na América Latina e Caribe. Apesar disso, não possui uma única instalação radiativa (cela quente) adequada para manipulação direta de fontes seladas de atividade alta, o que impossibilita a inspeção e a manutenção dos equipamentos das comunidades industrial e médica, exigidas no item 5.4.6 da Norma CNEN-NN-6.04: Funcionamento de Serviços de Radiografia Industrial ⁵⁶. Essa Norma determina que os ensaios de estanqueidade nas fontes radioativas sejam realizados semestralmente.

Além disso, o Ministério da Saúde recomenda que os equipamentos de radioterapia, com a atividade inferior a 81,4 TBq (2.200 Ci) sejam substituídos nos Hospitais e Clínicas no País, até 2007. Atualmente, existem 40 equipamentos de radioterapia nessas condições no País, o que representa um investimento inicial de US\$ 6 milhões, na substituição por equipamentos novos. Somente no Laboratório de Rejeitos Radioativos – LRR, do IPEN-CNEN/SP existem 17 cabeçotes contendo fontes radioativas de atividade alta, entre 5,5 a 258,9 TBq (150 a 7.000 Ci), utilizadas anteriormente em radioterapia hospitalar e prospecção de petróleo. Essa quantidade torna-se muito maior, ao considerar-se o número grande de Hospitais, Clínicas e Indústrias espalhadas pelo País, que possuem equipamentos não operacionais.

Com a construção e implantação da instalação radiativa para manipulação de fontes seladas de atividade alta, as fontes de cobalto-60 dos equipamentos de radioterapia e prospecção de petróleo poderiam ser recuperadas e utilizadas na construção de irradiadores gama para banco de sangue, com tecnologia inteiramente nacional ou nos *racks* de fontes do irradiador multipropósito de cobalto-60 tipo compacto do IPEN-CNEN/SP, para atividades de P&D&E no País.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 RELA, P.R. *Desenvolvimento de Dispositivo de Irradiação para Tratamento de Efluentes Industriais com Feixe de Elétrons*. 2003. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 2 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Consultants Meeting on Radiation Curing of Composites*. Radiation Technology Center, IPEN-CNEN/SP, August 08-11, 2005. Sao Paulo – Brazil.
- 3 CHMIELEWSKI, A.G.; HAJI-SAEID, M. IAEA Programme in the Field of Radiation Technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, in press, 2005.
- 4 STICHELBAUT, F.; BOL, J.L.; CLELAND, M.R.; GRÉGOIRE, O.; HERER, A.S.; JONGEN, Y.; MULLIER, B. The PelletronTM: A High-Dose Uniformity Pallet Irradiator with X-Rays. *Rad. Phys. Chem.*, v. 71, n. 1-2, p. 291-295, 2004.
- 5 CORLEY, J.T. Cobalt-60 Gamma Irradiation Current Status, Trends and Insights. *Rad. Phys. Chem.*, v. 52, n. 1-6, p. 419-424, 1998.
- 6 BEERS, E.W. The Micro-Cell Irradiator: a Small Volume Gamma Irradiator for On-Site and Special Processing. *Rad. Phys. Chem.*, v. 57, p. 573-576, 2000.
- 7 McKINNEY, D.; PERRINS, R. Centurion – a Revolutionary Irradiator. *Rad. Phys. Chem.*, v. 57, p. 569-571, 2000.
- 8 CLOUSER, J.F.; BEERS, E.W. The MinicellTM Irradiator: A New System for a New Market. *Rad. Phys. Chem.*, v. 52, n. 1-6, p. 409-412, 1998.
- 9 RELA, P.R. *Diseño y Calificación de Plantas de Irradiación*. Curso Regional sobre Procedimientos, Control de Calidad y Seguridad en Procesos de Irradiación – AIEA, Santiago do Chile – Chile, Octubre 16-27, 2000.
- 10 RELA, P.R. *Utilização da Radiação Ionizante na Esterilização de Produtos Médicos e Farmacêuticos*. Sociedade Brasileira de Controle de Contaminação - SBCC, setembro/outubro, 2001.
- 11 CHMIELEWSKI, A.G.; HAJI-SAEID, M. Radiation Technologies: Past, Present and Future. *Rad. Phys. Chem.*, v. 71, n. 1-2, p. 16-20, 2004.
- 12 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities* (IAEA Safety Series n. 107, Vienna - Austria, 1992).
- 13 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Diretrizes Básicas de Radioproteção* (CNEN-NE-3.01, Posição Regulatória 3.01/001). Rio de Janeiro, 1988.

- 14 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Licenciamento de Instalações Radiativas*** (CNEN-NE-6.02, Posição Regulatória 6.02/001). Rio de Janeiro, julho/1998.
- 15 MDS NORDION ION TECHNOLOGIES. Catálogos Técnicos: GAMMA SOURCE C-188 COBALT-60, *BREVIONTM*, *PALLET IRRADIATORTM*, *JS-9500TM*, *JS-9600TM* e *JS-10000TM*, 2005.
- 16 STERIGENICS INTERNATIONAL, INC. Catálogos Técnicos: *MINICELLTM*, 1998 e *MICROCELLTM*, 1999.
- 17 PICOWAVE TECHNOLOGY. Proposta Comercial e Catálogo Técnico *BPI PALLET IRRADIATORTM*, 1988.
- 18 SMITH, M.A. Industrial Irradiator Radiation Safety Program Assessments. *Rad. Phys. Chem.*, v. 57, p. 601-603, 2000.
- 19 GIBSON, W.H.; LEVESQUE, D. How Gamma Radiation Processing Systems are Benefiting from the Latest Advances in Information Technology. *Rad. Phys. Chem.*, v. 57, p. 581-585, 2000.
- 20 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Safety Assessment Plans for Authorization and Inspection of Radiation Sources*** (IAEA Technical Reports Series n. 1113, Vienna – Austria, 1999).
- 21 KARAN JUNIOR, D. ***Estudo de Aplicação da Tecnologia “Fieldbus” nos Sistemas de Controle e Segurança de uma Planta de Radioesterilização***. 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 22 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Lessons Learned from Accidents in Industrial Irradiation Facilities***. Vienna - Austria, 1996.
- 23 KNOLL, G.F. ***Radiation Detection and Measurement***. 2 ed. New York, N. Y.: John Wiley, 1989.
- 24 TSOULFANIDIS, N. ***Measurement and Detection of Radiation***. New York, N.Y.: Harper & Row, 1983.
- 25 KORENEV, S.A. Target for Production of X-rays. *Rad. Phys. Chem.*, v. 71, n. 1-2, p. 277-278, 2004.
- 26 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Gamma Irradiators for Radiation Processing***. Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warszawa, Poland, July 2005.
- 27 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ***Radiation Protection – Sealed Radioactive Sources – General Requirements and Classification***. 1995. (ISO/DIS 2919:1995).

- 28 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ***Radiation Protection – Sealed Radioactive Sources – Leakage Test Methods***. 1992. (ISO 9978:1992(E)).
- 29 MDS NORDION ION TECHNOLOGIES. ***Irradiation Facility Management Course***. Canadian Irradiation Centre. Canada, 1997.
- 30 KUNSTADT, P.; STEEVES, C. ***Economics of Food Irradiation***. NORDION International Inc..
- 31 MORRISON, R.M. ***An Economic Analysis of Electron Accelerators and Cobalt-60 for Irradiating Food***. United States Department of Agriculture, June 1989. (Technical Bulletin n. 1762).
- 32 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Guidelines for Industrial Radiation Sterilization of Disposable Medical Products (Cobalt-60 Gamma Irradiation)***. 1990. (IAEA Technical Reports Series n. 539, Vienna-Austria, 1990).
- 33 WORLD HEALTH ORGANIZATION. ***High-dose Irradiation: Wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy***. 1999. (Report of a joint FAO/IAEA/WHO Study Group, Geneva, 1999).
- 34 AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ***Safe Design and Use of Panoramic, Wet Source Storage Irradiators (Category IV)***. ANSI-N43.10-1984, New York (1984).
- 35 TATTERSALL, P. ***Filosofia y Objetivos de la Seguridad en Procesos de Irradiación. Control Regulatorio y Inspección. Inspección de Rutina (Check List) para Facilidades de Irradiación. Otros Aspectos Relevantes en la Seguridad de Operación de Irradiadores. Experiencias Obtenidas de Accidentes y Incidentes en Instalaciones de Irradiación***. Curso Regional sobre Procedimientos, Control de Calidad y Seguridad en Procesos de Irradiación – AIEA, Santiago do Chile – Chile, Octubre 16-27, 2000.
- 36 INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. ***Relatórios de Análise de Segurança – Aprovação Prévia (2001), Licença de Construção (2002) e Autorização para Operação (2004)***. Processo de Certificação do Irradiador Multipropósito de Cobalto-60 tipo Compacto, junto à CGLC/CNEN. Centro de Tecnologia das Radiações – CTR, IPEN-CNEN/SP. São Paulo/SP
- 37 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*** (IAEA Safety Series n. 6, Vienna - Austria, 1996).
- 38 OMI, N.M. ***Geração de um Aplicativo para Simulação de Doses em Sistemas de Irradiação Gama***. 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 39 CURZIO, O.A. A Theoretical Model to Improve the Design of Gamma Irradiators. ***Rad. Phys. Chem.***, v. 47, n. 6, p. 899-902, 1996.

- 40 JAEGER, R.G.. *Shielding Fundamentals and Methods*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag – Engineering Compendium on Irradiation Shielding, v. 1, 1968.
- 41 AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. *New Gamma-Ray Buildup Factor Data for Point Kernel Calculations*, Oak Ridge, August 1991. (ANS-6.4.3 Standard Reference Data NUREG/CR-5740, ORNL/RSIC-49/R1).
- 42 MICHIELI, I.. The Use of an Expanded Polynomial Orthogonal Set in Approximation to Gamma-Ray *Buildup* Factor Data. *Nuclear Science and Engineering*, v.117, p.110-120, 1994.
- 43 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).
- 44 NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. *Structural Shielding Design for Medical Use of X-Rays and Gamma Rays of Energy up to 10 MeV*, September 1976. (NCRP-49 1976).
- 45 MALKOSKE, G. R. Total Quality Management of Cobalt-60 Sources. *Rad. Phys. Chem.*, v. 54, p. 601-608, 1999.
- 46 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Objectives and Design of Environmental Monitoring Programmes for Radioactive Contaminants*.1975. (IAEA Safety Series n. 41, Vienna, 1975).
- 47 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases*. 1982. (IAEA Safety Series n. 57, Vienna, 1982).
- 48 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Earthquake Resistant Design of Nuclear Facilities with Limited Radioactive Inventory*. 1985. (IAEA Technical Reports Series n. 348).
- 49 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Forças Devido ao Vento em Edificações*. 1988. (NBR 6123).
- 50 HARWELL DOSIMETERS LIMITED. Catálogo Técnico, 1999.
- 51 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Use of a Polymethylmethacrylate Dosimetry System*. Committee E-10, Subcommittee E10-01, April 1993 (ASTM E 1276-93).
- 52 ATTIX, F. H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. 1 ed. New York, N. Y.: John Wiley & Sons, 1989.
- 53 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Dosimetry for Food Irradiation*. Vienna, Austria, October 2002 (IAEA Technical Reports Series n. 409).

- 54 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Using the Fricke Reference Standard Dosimetry System*. Committee E-10, Subcommittee E10-07, April 1995 (ASTM E 1026-95).
- 55 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *A Irradiação de Alimentos: Ficção e Realidade*. Viena - Áustria, maio 1991.
- 56 COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Funcionamento de Serviços de Radiografia Industrial* (CNEN-NN-6.04). Rio de Janeiro, janeiro/1989.

ANEXOS

ANEXO 1 – FATORES DE DECAIMENTO RADIOATIVO PARA O COBALTO-60 (FDR^{60}_{Co}), EM DIAS, MESES E ANOS

**Fatores de Decaimento Radioativo para o Cobalto-60 (FDR^{60}_{Co}),
em Dias, Meses e Anos**

Meia-vida do ^{60}Co = 5,261 anos

Dias	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
0	1,0000	0,9996	0,9993	0,9989	0,9986	0,9982	0,9978	0,9975	0,9971	0,9968
10	0,9964	0,9960	0,9957	0,9953	0,9950	0,9946	0,9942	0,9939	0,9935	0,9932
20	0,9928	0,9924	0,9921	0,9917	0,9914	0,9910	0,9907	0,9903	0,9899	0,9896
30	0,9892									

Meses	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
0	1,0000	0,9891	0,9783	0,9676	0,9570	0,9466	0,9362	0,9260	0,9159	0,9059
10	0,8960	0,8862	0,8766	0,8670	0,8575	0,8482	0,8389	0,8297	0,8207	0,8117
20	0,8029	0,7941	0,7854	0,7768	0,7684	0,7600	0,7517	0,7435	0,7353	0,7273
30	0,7194	0,7115	0,7037	0,6961	0,6885	0,6809	0,6735	0,6662	0,6589	0,6517
40	0,6446	0,6375	0,6306	0,6237	0,6169	0,6101	0,6035	0,5969	0,5904	0,5839
50	0,5775	0,5712	0,5650	0,5588	0,5527	0,5467	0,5407	0,5348	0,5290	0,5232
60	0,5175	0,5118	0,5063	0,5007	0,4953	0,4898	0,4845	0,4792	0,4740	0,4688
70	0,4637	0,4586	0,4536	0,4487	0,4438	0,4389	0,4341	0,4294	0,4247	0,4201
80	0,4155	0,4109	0,4064	0,4020	0,3976	0,3933	0,3890	0,3847	0,3805	0,3764
90	0,3723	0,3682	0,3642	0,3602	0,3563	0,3524	0,3485	0,3447	0,3410	0,3372
100	0,3336	0,3299	0,3263	0,3228	0,3192	0,3157	0,3123	0,3089	0,3055	0,3022
110	0,2989	0,2956	0,2924	0,2892	0,2860	0,2829	0,2798	0,2768	0,2737	0,2708
120	0,2678	0,2649	0,2620	0,2591	0,2563	0,2535	0,2507	0,2480	0,2453	0,2426
130	0,2400	0,2373	0,2347	0,2322	0,2296	0,2271	0,2247	0,2222	0,2198	0,2174
140	0,2150	0,2127	0,2103	0,2080	0,2058	0,2035	0,2013	0,1991	0,1969	0,1948

Anos	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
0	1,0000	0,8766	0,7684	0,6735	0,5904	0,5175	0,4536	0,3976	0,3485	0,3055
10	0,2678	0,2347	0,2058	0,1804	0,1581	0,1386	0,1215	0,1065	0,9330	0,8180

**ANEXO 2 - PLANTA DIMENSIONAL DO PRÉDIO DO IRRADIADOR
MULTIPROPÓSITO DE COBALTO-60 TIPO COMPACTO**

(DESENHO CTR – 0101/0001-I-3.08)

