

Radioproteção em Irradiadores de Grande Porte de Categoria III

Neivaldo Costa¹, Gilberto Ribeiro Furlan¹, e Natanael Márcio Itepan²

¹CENA/USP – Av. Centenário, 303 – Piracicaba-SP,
CEP 13400-970, Brasil

neivaldo@cena.usp.br e gilfurlan@cena.usp.br
<http://www.cena.usp.br>

²Faculdade Anhanguera – Rua Santa Catarina, 1005 – Piracicaba-SP,
CEP 13425-075, Brasil

natanael.itepan@unianhanguera.edu.br
<http://www.unianhanguera.edu.br>

Abstract. This article discusses the advantages of category III large gamma irradiator compared to the others, with emphasis on aspects of radiological protection, in the industrial sector. This category is a kind of irradiators almost unknown to the regulators authorities and the industrial community, despite its simple construction and greater radiation safety intrinsic to the model, able to maintain an efficiency of productivity comparable to those of category IV. Worldwide, there are installed more than 200 category IV irradiators and there's none of a category III irradiator in operation. In a category III gamma irradiator, the source remains fixed in the bottom of the tank, always shielded by water, negating the exposition risk. Taking into account the benefits in relation to radiation safety, the category III large irradiators are highly recommended for industrial, commercial purposes or scientific research.

1 Introdução

O processamento de materiais por radiação, por exemplo, a esterilização de produtos médicos e farmacêuticos, a esterilização, desinfestação ou conservação de alimentos, o tratamento de polímeros, tem grandes vantagens tecnológicas em relação a outros processos: é realizado à temperatura ambiente, não deixa resíduos, não gera poluentes e os produtos podem ser processados na embalagem final, com custo competitivo.

Atualmente há mais de duas centenas de irradiadores gama industriais no mundo, sendo que a tecnologia de irradiação de materiais encontra-se consolidada. Os irradiadores de grande porte representam mais de 20% dos irradiadores gama em operação, e 90% deles são de Categoria IV, armazenando suas fontes de Cobalto-60 em piscinas contendo água deionizada.

Em geral, as instalações radiativas comerciais priorizam o desempenho, deixando outros aspectos, incluindo a radioproteção, em segundo plano. No entanto, estas instalações devem ser construídas de tal maneira que, durante a operação normal, a exposição de trabalhadores seja extremamente baixa e a exposição de indivíduos do público seja insignificante, pois produzem taxas de dose muito elevadas, ao ponto de, em caso de acidente, matar uma pessoa em poucos segundos. Acidentes sérios com

irradiadores já ocorreram na Itália em 1975, na Noruega em 1982, em El Salvador em 1989, em Israel em 1990, na Bielorrússia em 1991 e na Bélgica em 2006.

2 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi discutir as vantagens do irradiador de grande porte de categoria III em relação aos demais, notadamente o de categoria IV, dando ênfase aos aspectos da proteção radiológica, no âmbito industrial.

3 Metodologia

Procedeu-se uma revisão de literatura, sendo facilmente encontradas referências de fabricantes ou de laboratórios que possuem irradiadores gama das categorias I, II e IV, o mesmo não acontecendo para os de categoria III.

O sítio *google* de buscas na Internet (www.google.com.br) foi utilizado com as palavras-chave: “irradiator”, “gamma irradiator”, “category III”, “category III irradiator”, “category III gamma irradiator”, “wet irradiator” e “wet gamma irradiator”. A busca foi feita em toda a *web*, e a única referência significativa para irradiadores gama de categoria III, foi o sítio da empresa norte-americana *Gray Star Inc.*, que fabrica os modelos *Genesis*.

Pesquisou-se também os sítios dos fabricantes mais conhecidos de irradiadores gama, as empresas *MDS Nordion* (www.mdsnordion.com), do Canadá, e *Sterigenics* (www.sterigenics.com), dos EEUU, e constatou-se a inexistência de irradiadores de categoria III em seus catálogos.

4 Resultados e discussão

Segundo a *Safety Series 102* [1], da Agência Internacional de Energia Atômica (*IAEA*), irradiação de produtos em irradiadores de grande porte são práticas de alto risco. Este risco inclui exposições normais ou potenciais.

Exposições normais são as exposições à radiação decorrentes da realização normal de uma prática, que podem ser previstas com certo grau de incerteza [2]. Já as exposições potenciais são as exposições que podem ocorrer durante a rotina de uma prática, mas sem garantia de que ocorrerá de fato. Os desvios de procedimentos operacionais ou falha nos equipamentos são as causas dessas exposições.

Os riscos não podem ser eliminados, mesmo com todas as precauções tomadas em matéria de segurança. As exposições podem ser reduzidas a níveis tão baixos quanto razoavelmente exequíveis – princípio *alara* (*as low as reasonably achievable*) – uma vez que o custo da redução tende a aumentar de maneira exponencial.

As principais e mais comuns causas de desvios (acidentes) em irradiadores de grande porte são justamente as falhas de projeto; mau funcionamento; desativação ou falha nos intertravamentos; e treinamento insuficiente e/ou inadequado de trabalhadores, resultando em erro humano.

Em 1992, a IAEA publicou a *Safety Series 107 - Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities (SS-107)* [3], documento internacional compatível com a filosofia adotada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Este documento descreve as quatro categorias dos irradiadores de grande porte, a saber:

Categoria I – Irradiador, cuja fonte selada é autoblindada com armazenamento seco permanente, onde o material a ser irradiado deve ser conduzido por uma espécie de elevador até a câmara de irradiação no interior da blindagem (Fig. 1);

Categoria II – Irradiador panorâmico de armazenamento seco, cuja fonte selada é mantida blindada quando não está sendo utilizada, e é exposta em câmara de irradiação, construída em concreto (*bunker*), que possui controle de acesso (Fig. 2);

Categoria III – Irradiador, cuja fonte selada é autoblindada com armazenamento úmido permanente, normalmente tanque ou piscina com água com três a sete metros de profundidade, devendo o material a ser irradiado ser mergulhado até a fonte através de recipientes apropriados, ou seja, que não permitam o contato do material com a água (Fig. 3);

Categoria IV – Irradiador panorâmico de armazenamento úmido, cuja fonte selada é mantida no fundo de um tanque ou piscina, blindada pela água, e, quando das irradiações, é içada e exposta em câmara de irradiação, construída em concreto (*bunker*), que possui controle de acesso (Fig. 4).

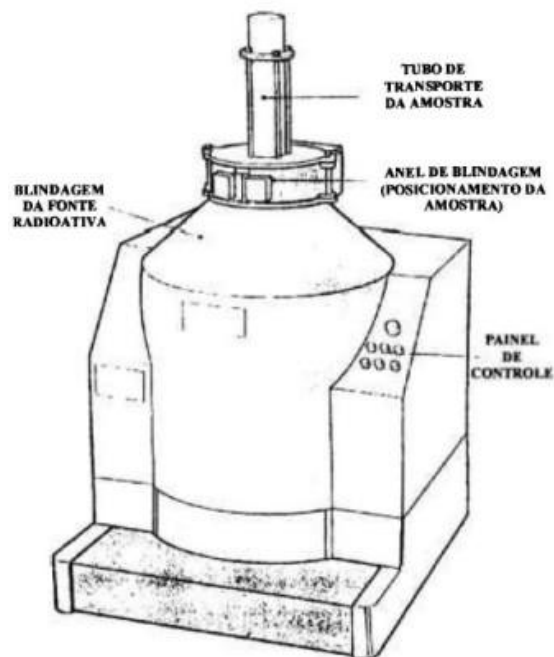


Fig. 1. Esquema de irradiador gama de Cobalto-60 de categoria I pela SS-107

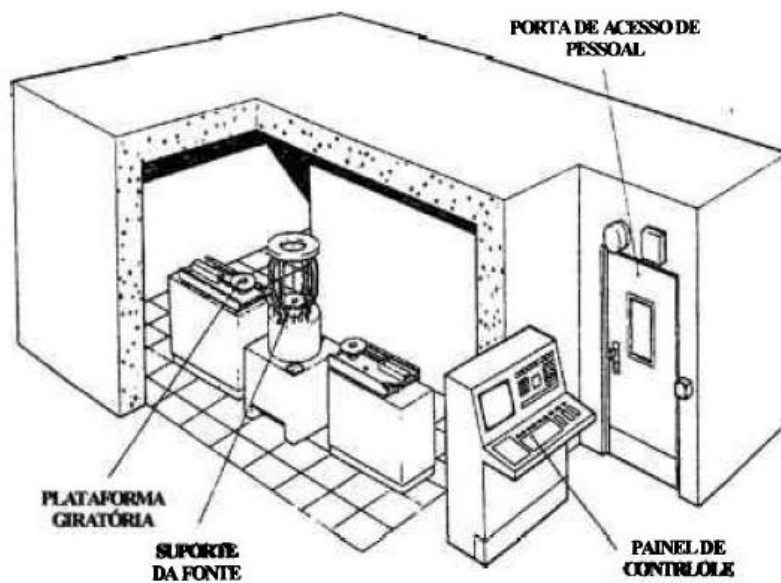


Fig. 2. Esquema de irradiador gama de Cobalto-60 categoria II pela SS-107

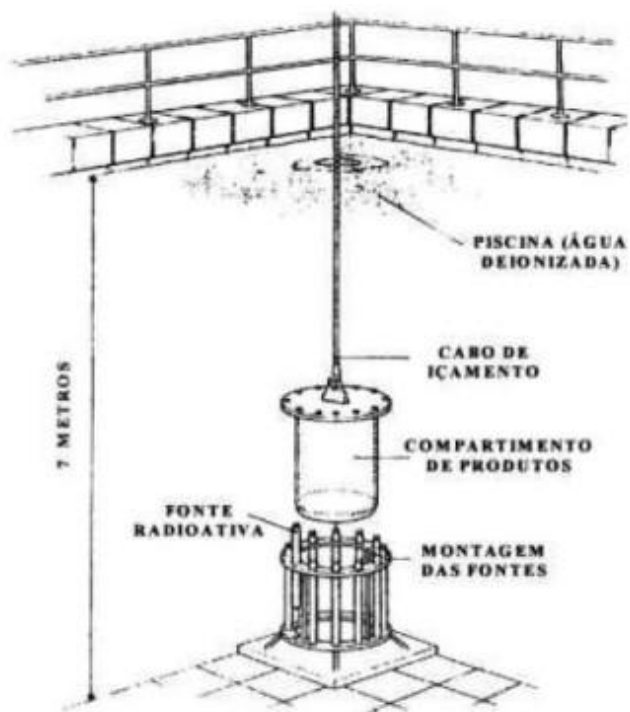


Fig. 3. Esquema de irradiador gama de Cobalto-60 categoria III pela SS-107

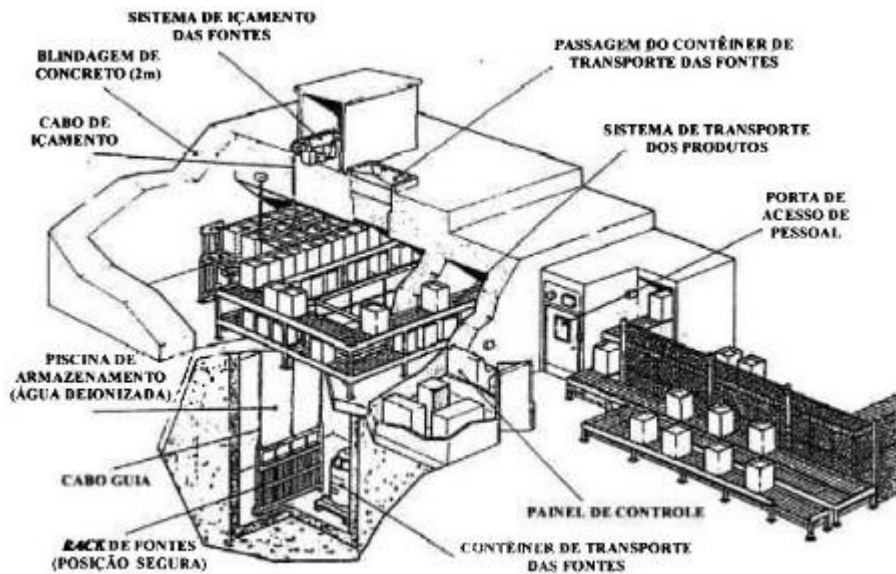


Fig. 4. Esquema de irradiador gama de Cobalto-60 categoria IV pela SS-107

Todos os irradiadores gama de grande porte devem respeitar o conceito de defesa em profundidade, para que seja obtido um alto grau de segurança numa instalação radiativa, através de sistemas que minimizem a intervenção humana. Há três níveis da defesa em profundidade, cujos objetivos são:

1º nível – Evitar desvios nas condições de operação normal, alcançado por rigoroso programa de garantia de qualidade aplicado no projeto, construção e operação;

2º nível – Detectar e responder aos desvios nas condições normais de operação, através de sistemas de detecção de qualquer evento anormal;

3º nível – Amenizar as consequências de um desvio ou acidente através de equipamentos e procedimentos específicos.

Os requisitos da defesa em profundidade são:

Redundância – Uso de mais que um número mínimo de elementos necessários para que seja cumprida uma certa função de segurança;

Diversidade – Aplicada aos elementos redundantes de origens diferentes (materiais ou fabricantes) e/ou princípios de funcionamento diferentes;

Independência – Separação física e isolamento funcional dos elementos, permitindo: independência entre os elementos redundantes; independência entre os elementos e o sistema contra acidentes; independência entre os elementos de diferentes importâncias

para a segurança; e independência entre os elementos importantes para a segurança e aqueles não importantes.

As definições e esquemas apresentados pela *SS-107* são somente didáticos e ilustrativos, haja vista a diversidade e evolução de modelos de irradiadores atuais. A própria *SS-107*, por exemplo, não permite a construção de piscina de ladrilhos como é observado na figura 3, o que poderia gerar infiltrações, comprometendo a manutenção do nível da água e, conseqüentemente, a radioproteção: "...um tanque não corrosível de aço inoxidável deverá ser usado..." (item 535).

A tendência mundial, nos dias de hoje, na construção de irradiadores industriais de Cobalto-60, segue dois caminhos: a construção de irradiadores de grande porte com capacidade de 111 a 444 PBq (3 a 12 MCi), ou a de irradiadores compactos com capacidade limitada a 74 PBq (2 MCi) [4]. Esta tendência, na prática, considera somente os irradiadores de categoria IV como sendo realmente de grande porte, pois não há ainda irradiadores de categoria III em funcionamento. Os de categoria I e II são, portanto, considerados compactos, desenvolvidos com o propósito de serem instalados de maneira integrada às instalações produtoras, tendo custos de investimento inicial e operacionais reduzidos.

Irradiadores gama de categoria I são construídos de materiais sólidos e a fonte selada e encapsulada é totalmente blindada em contêiner seco. É fisicamente impossível o acesso de pessoas ou membros, como mãos ou dedos, à posição de irradiação ou às fontes seladas, em função do seu desenho, de sua configuração. Este tipo de irradiador é comercialmente conhecido como *Gammacell*. Sua capacidade se restringe a irradiar pequenas amostras, de volumes normalmente inferiores a 2.000 mm³.

Os irradiadores gama de categoria II são panorâmicos e as fontes radioativas seladas são armazenadas blindadas em contêiner construído em materiais sólidos. Durante as irradiações, as fontes são expostas em câmara de irradiação mantida inacessível por meio do sistema de segurança e intertravamento. São comercialmente conhecidos como *Gammabeam*. A figura 5 mostra um esquema de irradiador atual desta categoria [5].

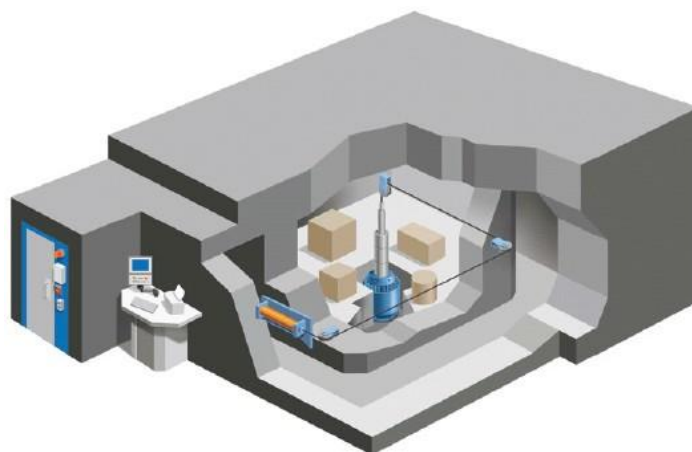


Fig. 5. Esquema de irradiador de categoria II, modelo *Gammabeam-127*

No caso do irradiador gama de categoria III, há uma piscina de estocagem para as fontes radioativas seladas, constantemente blindadas por água deionizada. Seu projeto de construção restringe consideravelmente o acesso às fontes. A figura 6 [6] mostra um esquema diferente do apresentado pela SS-107 e a figura 7, o esquema de um irradiador moderno desta categoria [7].

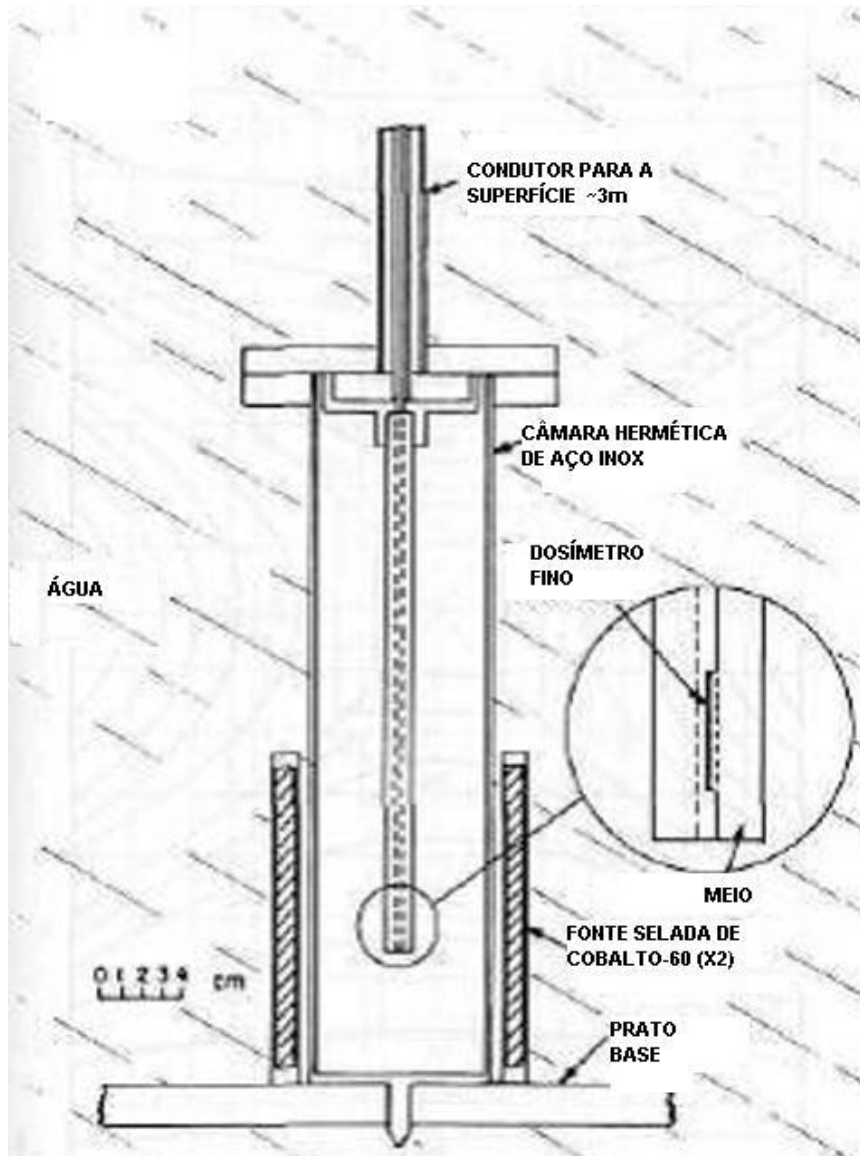


Fig. 6. Esquema de irradiador de categoria III alternativo

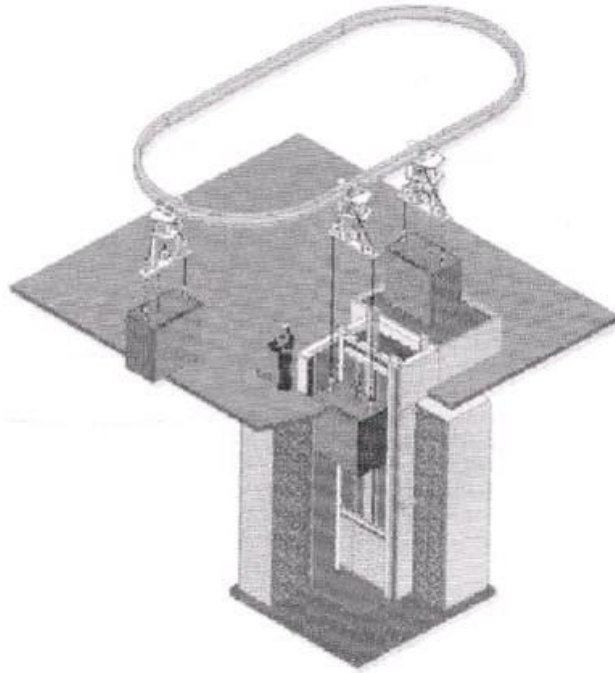


Fig. 7. Esquema de irradiador moderno de categoria III

A figura 8, abaixo, mostra uma foto da visão geral de uma instalação portando um irradiador de categoria III, modelo *Genesis* [7].



Fig. 8. Foto de instalação utilizando irradiador de categoria III

Como pode ser observado nas figuras 7 e 8, os dois lados da grade de fontes são simultaneamente utilizados para as irradiações de ambos os lados dos contêineres herméticos em sequência, tornando contínuo o processo de irradiação. Por ter as fontes armazenadas em água, suporta atividades muito maiores das suas fontes, tanto quanto os de categoria IV, visto que o aquecimento decorrente da radioatividade é dissipado pela água, que pode inclusive ser conduzida a resfriamento (*chilling*). Para se ter uma ideia, 2.490,1 TBq (67,3 kCi) de Cobalto-60 transferem 1,0 kW de energia para a água, na forma de calor. A desmineralização da água deve garantir uma condutividade elétrica menor do que 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reduzindo a possibilidade de corrosão das fontes seladas.

O material radioativo das fontes é o Cobalto-60, derivado do Cobalto-59, seu isótopo estável. Tem a forma metálica e é duplamente encapsulado. O material usado para o encapsulamento é o *SS-304 L* ou outro de propriedades metalúrgicas equivalente, incluindo resistência a ferrugem e a corrosão, atendendo aos critérios de desempenho exigidos pelas normas *ISO 2919*. As fontes seladas devem ser firmemente fixadas na grade de fontes, para que não possam ser desalojadas ou variem de posição facilmente.

A piscina ou tanque de água tem normalmente a profundidade de 3 a 7 m, construída em concreto revestido em aço inoxidável. A construção da piscina deverá levar em conta o potencial de perturbações sísmicas pertinentes às características geológicas do local, para manter a integridade da blindagem mesmo com movimentos do terreno ou sismos. Todos os componentes da piscina devem ser de materiais resistentes à corrosão, para que não haja comprometimento da integridade das fontes seladas. O topo da piscina deve prever a passagem do contêiner de blindagem de transporte das fontes, para as operações de transferência (carga ou recarga). O controle do nível da água na piscina é de extrema importância, devendo ser automaticamente controlado pela bomba d'água, que repõe a água evaporada. Este mecanismo deve estar conectado ao sistema de emergência, com alarme audiovisual, para alertar se o nível ficar aquém do nível normal, comprometendo a blindagem, ou além, causando transbordamento. A coluna deionizadora deve contar com um monitor de radiação com alarme sonoro e luminoso para detectar e alertar possível produto de fuga das fontes na água. Atenção especial deve ser dada aos tubos inseridos na piscina, para não haver sifonamento da água. Barreira física, tipo corrimão, deverá guardar as bordas da piscina, para evitar a queda acidental de trabalhadores.

Atualmente não há nenhum irradiador de categoria III em funcionamento no mundo, porém, um modelo *Genesis I* da empresa *Gray Star* foi adquirido pela empresa *CFC Logistics*, localizada na cidade de *Quakertown* (Pensilvânia, EUA) e funcionou de outubro de 2003 a maio de 2005, irradiando basicamente carne. Foi desativado por questões de mudança de estratégia comercial desta empresa: não oferecer mais alimentos irradiados [8]. Há também um *Genesis II* em processo de licenciamento no Havaí, e um pertencente à empresa *Gamma Serviços de Irradiação Ltda.*, que obteve recentemente a licença de construção nas proximidades da cidade baiana de Feira de Santana, aqui no Brasil.

Os irradiadores de categoria IV, como os da categoria III, têm as fontes de Cobalto-60 armazenadas em piscinas ou tanques com água deionizada. A diferença é que, ao invés de permanecerem no fundo, blindadas pela água, as fontes são içadas e expostas em câmara de irradiação com blindagem biológica, quando da passagem dos produtos

a serem irradiados. Além da blindagem biológica, os irradiadores de categoria IV necessitam de elaborado sistema de intertravamentos para impedir o acesso indevido durante o processo de irradiação. Todos os intertravamentos são projetados de modo que seja dificultado o descumprimento de sua eficácia. Para acentuar a segurança, devem incorporar chaves duplas conectadas em série.

A grade de fontes, ao ser içada, deve contar com uma proteção mecânica para evitar que seja danificada por impacto de caixas ou contêineres dos produtos ou dos elementos de transporte destes produtos. Qualquer dano na grade pode comprometer seu retorno à posição de blindagem no fundo do tanque, ou até mesmo arrancar lápis da grade. As proteções normalmente são capas protetoras (*shroud*) ou tubos guias.

A espessura da blindagem depende da intensidade da fonte e da propriedade blindante do material a ser utilizado, normalmente concreto especial, de maneira que a exposição na superfície externa fique abaixo do que determina a autoridade regulamentadora. São necessárias penetrações na blindagem para a entrada e saída dos produtos a serem irradiados e dos trabalhadores, para a ventilação e para outros condutos, utilizando-se de tampões blindantes e de entradas em forma de labirinto, evitando taxas altas de radiação espalhada na porta de acesso. São importantes os monitores instalados em todos os acessos ao interior da blindagem para detectar qualquer resquício de radiação ou material radioativo saindo da câmara. A blindagem biológica também deve prever uma saída de emergência e/ou um lugar devidamente sinalizado onde as taxas de dose sejam suficientemente baixas, caso alguém fique preso inadvertidamente no interior da câmara de irradiação, além de dispor de dispositivos que interrompam rapidamente o andamento da irradiação, claramente sinalizados e facilmente acessíveis.

O sistema de movimento de produtos a serem irradiados deve contar com dispositivos que detectem qualquer funcionamento indevido, com a função de impedir o choque entre contêineres ou abalos na grade de fontes ou no seu sistema de içamento, impedindo-a de retornar para a posição totalmente blindada.

Como a radiólise do ar produz gases tóxicos como ozona e óxido de nitrogênio, o irradiador categoria IV (e também os de categoria I e II, em menor escala) deve possuir um sistema eficiente de ventilação, suficiente para impedir que os trabalhadores sejam expostos a concentrações desses gases acima dos limites de tolerância estabelecidos pelas autoridades sanitárias.

Dispositivos de detecção de calor e fumaça, com alarmes audiovisuais são necessários para detectar qualquer processo de combustão na câmara de irradiação, visto que irradiações prolongadas de certos materiais pode gerar incêndio. O acionamento deste sistema deve interromper imediatamente o sistema de ventilação e recolocar a grade de fontes na posição de blindagem, além de ativar um sistema automático de extinção de incêndio. Normalmente, este sistema nebuliza água na câmara de irradiação; outras substâncias poderiam comprometer ainda mais a situação, introduzindo elementos corrosivos ao material das fontes à água da piscina.

Falhas no fornecimento de energia requerem um sistema de *no break*, que, no mínimo, possa retornar a grade de fontes para o fundo da piscina.

Assim como todos os componentes e dispositivos, sinais e símbolos de advertência colocados no interior da câmara de irradiação devem ser confeccionados de materiais que resistam a altos níveis de radiação, e devem respeitar, obviamente, as normas das entidades regulatórias.

A figura 9 mostra o esquema de um moderno irradiador gama de categoria IV, modelo JS 9600, fabricado pela empresa *MDS Nordion*, instalado na empresa CBE Embrarad, localizado em Cotia, São Paulo [9].

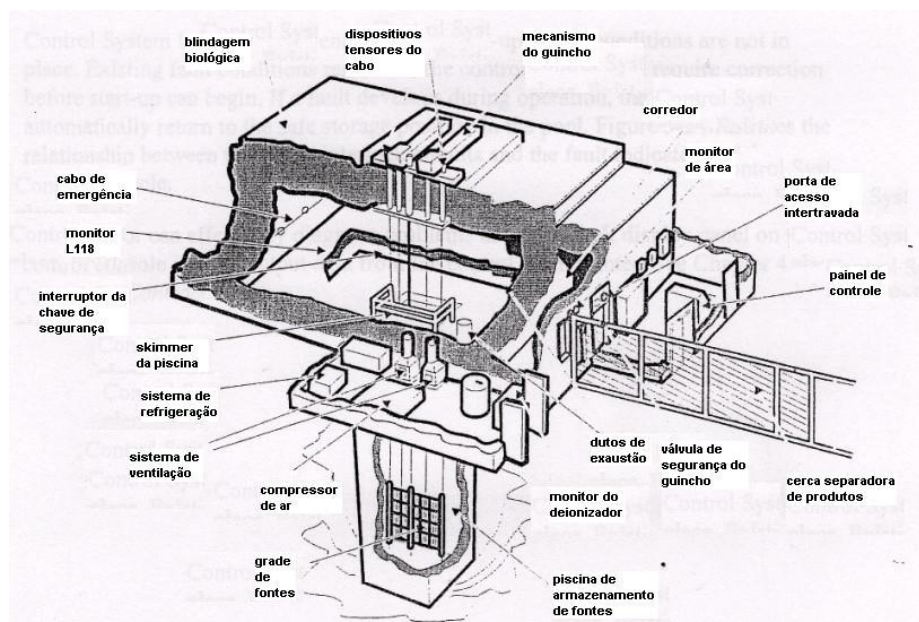


Fig. 9. Esquema de irradiador gama de categoria IV modelo JS9600

A experiência tem demonstrado que os eventos anormais mais prováveis nos irradiadores de categoria II e IV são:

- comprometimento do sistema que retorna as fontes à posição completamente blindada;
- desprendimento de parte ou partes da fonte (lápiz de Cobalto-60);
- defeito ou violação dos sistemas de controle e/ou segurança;
- desenergização do equipamento;
- incêndio no interior da câmara de irradiação.

Esses eventos anormais podem acarretar exposições aos trabalhadores.

Em 1975, na cidade de *Stimos*, Itália, ocorreu um acidente com um irradiador de categoria II utilizado para irradiar sacos com sementes de milho. Na ausência do operador e na intenção de adiantar um teste, um dos auxiliares de produção adentrou a câmara de irradiação, através da esteira de saída de produtos, para colocar uma amostra, e foi irradiado [10].

Um trabalhador norueguês de 64 anos recebeu uma grande dose de radiação gama do Cobalto-60 em setembro 1982, enquanto tentava consertar uma esteira rolante travada em um irradiador de grande porte, na cidade de *Kjeller*. Ele morreu apenas 13 dias mais tarde [10].

Na capital de El Salvador, *San Salvador*, no ano de 1989, contêineres de produtos que estavam sendo irradiados em um irradiador de categoria IV saíram da posição e prenderam a grade de fontes. Através de truques para burlar o sistema de segurança, três trabalhadores, no intuito de desvencilhar a grade, entraram no interior da câmara e foram irradiados. Dois deles faleceram após alguns meses, mesmo com todo o cuidado médico especializado que foi dispensado aos três [11].

Na cidade de *Soreq*, em Israel, no ano de 1990, um operador burlou o sistema de acesso para entrar no irradiador gama de categoria IV, cuja grade de fontes ficou presa em pedaços de papelão provenientes de caixotes com produtos que estavam sendo irradiados. O operador logo foi encaminhado a hospitais especializados, mas faleceu 36 dias depois, apesar de todo o tratamento médico despendido, que incluiu um transplante de medula [12].

Um engenheiro de 34 anos foi irradiado na cidade de *Nesvizh*, Bielorrússia, em 1991, quando tentava recolocar uma corrente que se soltou do sistema de transporte de produtos no interior da câmara de irradiação de um irradiador gama de categoria II. Segundo o que ele próprio relatou, a grade de fontes subiu sem que ele percebesse enquanto fazia o reparo. Mesmo com todo tratamento dispensado, ele faleceu após 113 dias do ocorrido [13].

Houve também um acidente, em 2006, na cidade de *Fleurus*, Bélgica, com um irradiador comercial gama de categoria IV, causando graves danos à saúde de um trabalhador que foi exposto a um feixe de radiação gama.

Nos acidentes acima citados, resumidamente, houve falha humana e/ou de equipamento: o trabalhador adentrou a sala de irradiação, a fonte estava fora da posição totalmente blindada (armazenamento seguro), e foi exposto à radiação.

Em um irradiador gama de categoria III, esta situação de risco não existe porque a grade de fontes não sai do fundo da piscina. Mesmo que uma pessoa caia na piscina, não será irradiada, a não ser que mergulhe, deliberadamente, até a posição da grade de fontes e permaneça lá por algum tempo para que receba uma dose determinística. De fato, os eventos de maior risco de exposição de seres humanos em um irradiador gama de categoria III são: esvaziamento do tanque e saída de material radioativo das fontes seladas por meio de deslocamento pelo sistema de tratamento de água. Eventos estes, passíveis de ocorrer também nos de categoria IV. Estes dois eventos são considerados de baixa probabilidade de ocorrência e, desde o início das atividades com irradiadores industriais gama, anos 50 do século passado, não há relatos de acidentes deste tipo, mesmo em irradiadores antigos, anteriores à publicação da *SS-107*.

Além de ser muito mais simples de ser construído, notadamente por dispensar a blindagem biológica, exigir investimento muito menor e menores gastos com manutenção, o irradiador de categoria III oferece notável vantagem no que diz respeito à segurança radiológica numa instalação irradiadora, seja industrial, comercial, institucional, quando comparado ao de categoria IV:

- suas fontes não têm movimentos e não saem da posição totalmente blindada;
- se houver danos à grade de fontes, os lápis de Cobalto-60 permanecerão blindados;
- defeito ou violação nos sistemas de controle não afetariam a segurança radiológica;
- se houver desenergização do sistema, a segurança radiológica será mantida;
- incêndio causado pela irradiação seria impossível;
- praticamente não há produção de gases tóxicos, pela proteção permanente da água.

5 Conclusão

Tendo em vista a simplicidade construtiva e maior segurança radiológica intrínseca ao modelo, podendo manter eficiência produtiva comparável aos de categoria IV, os irradiadores gama de grande porte de categoria III são altamente recomendáveis, tanto para uso industrial, comercial ou na pesquisa científica.

Referências

1. International Atomic Energy Agency: Safety Series 102: Recommendations for the Safe Use and Regulation of Radiation Sources in Industry, Medicine, Research and Teaching. IAEA (1990)
2. ICRP (76): Protection from Potential Exposures: Application to Selected Radiation Sources. Pergamon Press (1996)
3. International Atomic Energy Agency: Safety Series 107: Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities. IAEA (1992)
4. Chmielewski, A.G., Haji-Saeid, M.: Radiation Technologies: Past, Present and Future. Rad. Phys. Chem. (2004) 16-20
5. MDS Nordion Ion Technologies. Catálogos Técnicos: GammaBeam-127TM (2008)
6. Molins, R.A.: Food Irradiation: Principles and Applications. Na ed. John Wiley & Sons Inc. (2001)
7. Gray Star Inc. Catálogos Técnicos: GenesisTM (2003)
8. Sommers, C.H., Fan, X. Food Irradiation, Research and Technology. Na ed. Blackwell Pub. Ltd. (2006)
9. MDS Nordion Ion Technologies. Catálogos Técnicos: Gamma Source C-188 Cobalt-60, BrevionTM, Pallet IrradiatorTM, JS-9500TM, JS-9600TM e JS-1000TM (2005)
10. International Atomic Energy Agency: Lessons Learned from Accidents in Industrial Irradiation Facilities. Pergamon Press (1996)
11. International Atomic Energy Agency: The Radiological Accident in San Salvador. IAEA (1990)
12. International Atomic Energy Agency: The Radiological Accident in Soreq. IAEA (1993)
13. International Atomic Energy Agency: The Radiological Accident in Nesvizh. IAEA (1996)