

ESTUDO DE EXPOSIÇÕES EM SITUAÇÕES DE INCIDENTES ENVOLVENDO GERADORES DE RAIOS X DE USO INDUSTRIAL

Paulo B. Rios¹ e Denise A. da S. Rios^{1,2}

¹ INOVAFI Física aplicada à Inovação Ltda. (INOVAFI)
Rua Bernardo Sayão, 100, sala 206 – Cid. Universitária
13083-970- Campinas, SP
paulo@inovafi.com.br

² Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)
Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)
Rua do Matão Travessa R, 193 – Cid. Universitária
05508-000- São Paulo, SP
denise@inovafi.com.br

RESUMO

O estudo de casos de acidentes com fontes de radiação fornece valiosas informações para o aprimoramento dos equipamentos em si e dos procedimentos a serem adotados para evitar que se repitam sendo, por isso mesmo, recomendado como parte integrante dos processos de licenciamento de instalações radiativas. Entretanto, quando as máquinas são consideradas isentas dos requisitos de proteção radiológica ou não possuem registro de acidentes, um método eficaz para se apropriar deste conhecimento necessário às melhorias de processo e projeto é a investigação de incidentes relatados e a proposição de situações limite, nas quais exposições pouco prováveis e mesmo de baixa intensidade possam ocorrer. Neste trabalho são avaliados incidentes relatados em máquinas de inspeção de raios-X e medidores de espessura, além de estudadas situações emergenciais tanto neste tipo de equipamento quanto em um acelerador de elétrons autoblindado para a cura de tintas e vernizes. As estimativas de exposição são calculadas a partir de dados coletados em locais de trabalho sobre a distância e tempo em cada caso proposto. Muito embora não haja consequências severas à saúde ocupacional, os resultados obtidos podem ser empregados na melhoria da qualidade dos treinamentos aos operadores e técnicos de manutenção, na proposição de novos sistemas de alarme e procedimentos das equipes de emergência, além de servirem de alerta contra situações inadvertidas e evitáveis de exposições injustificáveis.

1. INTRODUÇÃO

No projeto de máquinas para uso industrial é preciso se considerar as mais prováveis falhas operacionais de modo que suas ocorrências não degenerem em acidentes com graves consequências econômicas e principalmente aos trabalhadores. Em particular aquelas que incorporam o emprego de fontes ou geradores de radiação ionizante devem levar em consideração as recomendações da AIEA (BSS115 [1] e SSG8 [2]).

Além das situações extraordinárias em que ocorrem os acidentes, as corriqueiras e mesmo as de difícil previsão de ocorrência podem gerar conhecimentos úteis para a otimização da proteção radiológica e por isso mesmo contribuir para a diminuição das exposições laborais decorrentes do uso destes equipamentos.

Por outro lado, a análise dos casos de acidentes e incidentes e suas causas, também fornecem informações valiosas para evitar que se repitam e para o aprimoramento dos projetos e procedimentos operacionais.

Os resultados desses estudos devem ser incluídos nos treinamentos de todos os envolvidos na operação, manutenção e gestão das instalações radiativas, conforme recomendações dos organismos oficiais de proteção radiológica (BSS115 [1] e NN 3.01 [3]).

A dificuldade em se cumprir essas exigências regulatórias se apresenta particularmente nos equipamentos isentos dos requisitos de proteção radiológica ou com características próximas (NM 3.01 PR01 [4]). São exemplos do primeiro grupo as máquinas de inspeção por raios x e do segundo os medidores de espessura por feixe de raios x e os aceleradores autoblindados de elétrons.

Neste trabalho são analisadas situações extremas de segurança nas quais se pode calcular a exposição a indivíduos em máquinas de inspeção por raios X, de medidor de espessura e em acelerador autoblindado de elétrons, cujo objetivo foi a ilustração dos riscos reais inerentes a estes equipamentos nos treinamentos das equipes operacionais, de modo a que não ficassem restritos à apresentação de casos e situações muito mais graves, uma vez que ocorridos em instalações diversas das interessadas, ainda que de objetivos semelhantes.

2. OS EQUIPAMENTOS GERADORES DE RADIAÇÃO IONIZANTE

Foram estudados três tipos diferentes de equipamentos geradores de radiação ionizantes: *i*) máquinas de inspeção por feixes de raios X; *ii*) medidor de espessura por feixe de raios X e *iii*) acelerador autoblindado de elétrons para a cura de tintas e vernizes, enquadrado como da categoria I, conforme (SSG8).

Em comum, todos eles têm o fato de que, do ponto de vista da proteção radiológica, os raios X são que causarão as maiores exposição dos indivíduos em casos de incidentes ou acidentes, e que também são, em princípio, selecionáveis para a isenção dos requisitos de proteção radiológica, de acordo com a AIEA(BSS 115), sendo de fato consideradas máquinas isentas em alguns países membros [5].

2.1. Máquinas de inspeção por raios X

São compostas por um gerador de feixe de raios X e um sensor, que captará as intensidades correspondentes à atenuação do referido feixe. A partir destas informações é construída uma imagem correspondente dos objetos inspecionados. Este feixe costuma ter energia entre 70 e 150 keV, sendo que em algumas aplicações é empregada mais de uma energia para permitir a obtenção de imagens de melhor qualidade informativa. A corrente do feixe de elétrons costumam ser abaixo de 10 mA.

Elas possuem blindagem adequada ao feixe gerado e sistemas eletrônicos de segurança para minimizar situações de operação indevida.

São empregadas nas inspeções de volumes em sistemas de transporte de massa como aeroportos, de pessoal em instalações de segurança como edifícios prisionais e também na inspeção da qualidade de produtos como no caso da indústria alimentícia para alertar sobre a presença de corpos estranhos em alimentos processados.

2.2. Medidor de Espessura por Raios X

Trata-se de um cabeçote móvel com uma fenda através da qual se passa o material a ter sua espessura controlada como variável de processo. Em um lado da fenda existe um gerador de raios X com feixe de baixa energia, tipicamente abaixo de 30 keV e corrente eletrônica abaixo de 5 mA, uma vez que se destina normalmente à medição de filme poliméricos finos de espessura menor que 1 cm. Há modelos que empregam feixes abaixo de 5 keV o que os tornam isentos dos requisitos de proteção radiológica no Brasil, conforme a norma NN 3.01 PR 001. Do lado oposto se instala um detector, usualmente uma câmara de ionização, que permite a determinação da grandeza de processo selecionada, a partir da atenuação da intensidade do feixe e das características do filme analisado.

Também incorpora circuitos eletrônicos de segurança e sua construção mecânica dificulta a exposição sequer de partes do corpo diretamente ao feixe.

2.3. Acelerador Autoblindado de Elétrons para Cura de Tintas e Vernizes

É um dispositivo que gera um feixe de elétrons de energia entre 70 e 300 keV e correntes elevadas de até 600 mA. Este feixe é disperso por uma área ampla, usualmente $1,5 \times 0,3 \text{ m}^2$, na qual se dá a cura de tintas e vernizes sobre substratos finos de polímeros ou metais.

Por serem enquadrados na categoria I conforme a SSG8, seguem todos os pré-requisitos de construção mecânica, dispositivos e circuitos de segurança independentes, em profundidade e redundantes, de modo que as exposições acidentais têm baixa probabilidade de ocorrência.

Outro traço comum aos três tipos de máquinas estudados, é que não foi relatado nenhum caso de acidente envolvendo sua operação, muito embora haja registros de incidentes de consequências desprezíveis em termos dos efeitos resultantes das exposições decorrentes. Para os aceleradores autoblindados não foram encontrados registros nem de incidentes, tampouco de acidentes.

3. INCIDENTES RELATADOS

Uma pesquisa não exaustiva identifica casos de incidentes de proporções negligíveis principalmente com máquinas de inspeção de bagagens e apenas uma com medidor de nível com feixes de raios X, sumarizados na seguinte tabela 1:

Tabela 1. Incidentes relatados com máquinas geradoras de raios X de uso industrial

Máquina	País	Ano	Dose (μSv)	Indivíduo (#)	Causa
Inspeção	EUA	2006 [6]	SR ^a	Público (1)	Procedimento
Inspeção	Austrália	2009 [7]	40	Técnico (1)	Procedimento
Inspeção	Austrália	2010 [8]	SR ^a	Público (1)	SC ^b
Inspeção	Austrália	2011 [9]	SR ^a	Público (1)	SC ^b
Inspeção	Itália	2012 [10]	SR ^a	Público (1)	Procedimento
Inspeção	Emirados Árabes Unidos	2012 [11]	SR ^a	Público (1)	SC ^b
Inspeção	China	2013 [12]	SR ^a	Público (1)	Procedimento
Inspeção	México	2013 [13]	SR ^a	Público (1)	SC ^b
Inspeção	Eslovênia	<i>s.d.</i> [14]	10000	Técnico (1)	Treinamento e Projeto
Inspeção	Reino Unido	<i>s.d.</i> [15]	40	Técnico (2)	Procedimento
Inspeção	Reino Unido	<i>s.d.</i> [16]	5	Público (2)	Procedimento

- a. Sem registro de exposição
- b. Sem controle por parte do operador

Como as máquinas de inspeção de bagagens têm de permitir o acesso de grandes volumes ao feixe, possibilitam a entrada de indivíduos no interior da câmara de irradiação durante sua operação, ainda que para isso tenham de agir deliberadamente contra o bom senso, o que explica a causa “Sem controle por parte do operador”. Decorre de tal fato a necessidade de haver procedimentos estritos e completos que contemplem este tipo de eventualidade e de treinamentos dos operadores, que devem saber como agir rapidamente diante deste tipo de situação e, sempre que possível evitá-las.

A falta de determinação de procedimentos e treinamentos mais completos foi apontada como responsável pelos incidentes que ocorreram durante a manutenção destas máquinas.

Ressalta-se o fato de que uma autoridade reconhece como relativamente alta a taxa de ocorrência deste tipo de incidente: um por ano em um aeroporto de alta circulação [10].

As analogias destas situações com outras realidades industriais poderá ajudar na elaboração dos procedimentos e treinamentos operacionais e contribuirá para a não ocorrência destes incidentes.

4. INCIDENTES PROPOSTOS

Para cada máquina foram propostas situações que levariam a exposições acidentais, tanto de corpo inteiro, quanto de extremidades ou de órgãos específicos. Nas situações descritas, como as taxas de exposição resultantes são muito baixas os tempos e condições de exposição incidentais tiveram de ser exagerados.

4.1. Exposição de Mão em um Medidor de Espessura por Raios X

Na indústria de embalagens flexíveis as espessuras dos filmes poliméricos são pequenas, usualmente abaixo de 100 μm , e este fato permite que os medidores deste parâmetro sejam projetados com uma fenda estreita o suficiente para impedir que se exponha alguma extremidade do corpo diretamente ao feixe. Além disso, o cabeçote de medição somente libera o feixe de raios X de baixa energia quando estiver em movimento transversal ao movimento do filme extrusado.

Em situação normal de operação os colaboradores ficam a cerca de 1,5 m de distância mínima da fonte em sua maior aproximação, devido ao movimento periódico na direção transversal descrito acima, necessário para a leitura da espessura por toda a sua largura.

A despeito destas impossibilidades, é proposta uma situação como a abaixo, na qual um operador consegue manter sua mão exposta diretamente ao feixe por 1 h, como ilustrado na figura 1 abaixo.

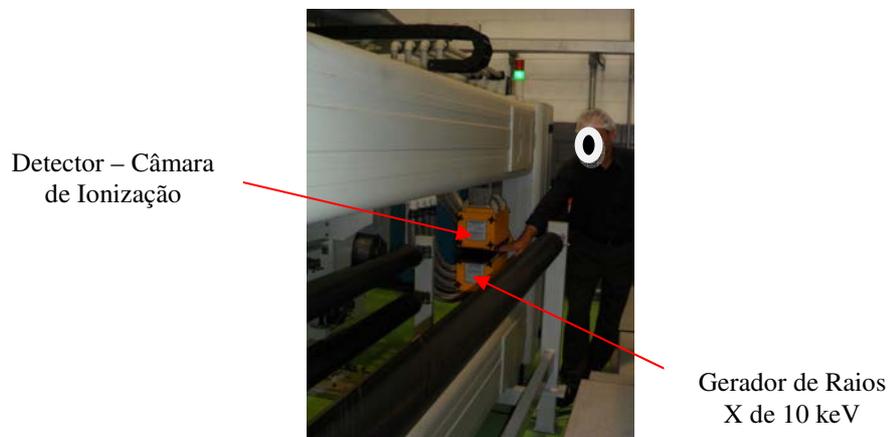


Figura 1. Situação proposta de exposição de extremidade por 1 h. A luz indicativa verde mostra que o feixe está inativo.

Na energia de 10 keV, a quase totalidade da interação dos fótons com a matéria se dará por efeito fotoelétrico, sendo desprezível a contribuição da radiação espalhada [17]. Este fato inviabiliza medições diretas da exposição, então para efeitos desta estimativa, lançou-se mão dos valores obtidos para uma aplicação de energia semelhante, porém com valor de exposição notadamente maior que é o de máquinas de inspeção por retroespalhamento, nas quais se obtém 10 nSv em 1 minuto de exposição [18], o que resulta em 0,6 $\mu\text{Sv/h}$ de taxa de dose. Deste modo a exposição da mão será estimada em:

$$X_{\text{mão}} = 0,6 \cdot 1 = 0,6 \mu\text{Sv} \quad (1)$$

Que é 833.333 vezes menor que o limite admitido para exposição de extremidades de Indivíduos Ocupacionalmente Expostos pela NN 3.01, com a ressalva de se ter adotado uma taxa de dose maior que a realmente verificada.

Não haverá sequelas e não será necessário se tomar atitudes corretivas, além de verificar e retirar as condições que permitiram que a excepcionalidade de se manter a fonte parada emitindo o feixe de raios X por períodos prolongados de tempo ocorresse.

4.2. Exposição de Mão em máquina de Inspeção de Alimentos por Raios X

Modelos compactos tem desenho mecânico que dificultam o acesso direto ao feixe através de cortinas plumbíferas, como as destacadas na figura 2 a seguir.



Figura 2. À esquerda câmara de irradiação de máquina de inspeção de produtos alimentícios aberta, com destaque para a tripla camada de cortinas plumbíferas que protegem o operador, mostrado à direita, com o equipamento em operação normal.

Em situação de produção, os operadores se posicionam a cerca de 1 m da blindagem da fonte de raios X, que é composta também pelo painel do aparelho, de modo a apresentar espessuras de até 10 mm de aço inox, que conferem um poder de atenuação considerável [19].

A intrusão da mão é de difícil diferenciação com relação a um produto a ser inspecionado, então postula-se a mesma situação extrema de exposição por uma hora sob um feixe medido de $0,5 \mu\text{Sv/h}$ e energia de 75 keV. Neste caso a dose absorvida pela mão seria de:

$$X_{\text{mão}} = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \mu\text{Sv} \quad (2)$$

Que é 1.000.000 de vezes menor que o limite estabelecido em NN 3.01.

Ressalte-se que nestas condições a operação normal do equipamento seria comprometida, uma vez que o fluxo normal de produtos a serem inspecionados seria obstruído.

4.3. Exposição de Mãos a Radiação X Espalhada de um Feixe de Elétrons de 110 keV

Neste tipo de equipamento os operadores ficam a mais de 2 m de distância e ainda protegidos pela estrutura metálica de suporte que também atua como uma blindagem de 10 mm de aço. Por se tratarem de máquinas cujas condições para funcionamento exigem ultra alto vácuo, alta tensão e alta corrente, os sistemas de controle eletrônicos são projetados de maneira a se liberar o feixe de elétrons somente depois de vários níveis de verificações de segurança e operação, que são no mais das vezes redundantes.

Um operador de empilhadeira perdeu o controle do veículo cujo garfo longo abalroou a blindagem do acelerador que estava em operação no momento. O dano à blindagem permitiu a exposição de um funcionário a um campo de radiação de 585 mSv/h a uma distância aproximada de 50 cm . Dada a localização do dano, nem as chaves de fim de curso, nem os medidores de radiação que asseguram a integridade do equipamento foram acionadas, requerendo ação externa para o desligamento do feixe. Um segundo funcionário foi exposto a um campo de radiação de $0,36 \text{ mSv/h}$, por estar blindado pela estrutura da linha de impressão e a uma distância de 3 m da origem do feixe.

A figura 3 a seguir mostra a configuração inicial da situação proposta.



Figura 3 Configuração inicial do Incidente proposto para um acelerador autoblindado, com destaque para o posicionamento dos indivíduos expostos e das máquinas envolvidas.

Ressalte-se que *i*) a empilhadeira disponível não era grande o suficiente para atingir a blindagem do acelerador; *ii*) para que a exposição ocorresse, foi necessário desprezar a atuação de duas chaves de fim de curso, três detectores Geiger e de um pressostato, que asseguram a integridade da blindagem e são controlados pelo PLC da máquina. Daí o fato de poder ser considerada uma situação praticamente impossível de se ocorrer.

Os campos de radiação foram estimados com o emprego das premissas e dados tabelados para os alcances e absorção em materiais de elétrons e raios X e serão objeto de divulgação posterior.

Do estudo das ações de mitigação do acidente concluiu-se que os indivíduos seriam expostos por 5 minutos aos campos de radiação acima descritos, o que resultaria em doses nas mãos do operador de:

$$X_{\text{mãos}} = 585 \cdot 5 / 60 = 49 \text{ mSv} \quad (3)$$

Que é aproximadamente 10 vezes menor que o limite determinado pela NN 3.01.

Já para o indivíduo do público, que teve o benefício da blindagem da estrutura da linha de impressão, a dose efetiva foi:

$$X_{IP} = 0,36 \cdot 5 = 1,8 \text{ mSv} \quad (4)$$

Que equivale a quase duas vezes o limite anual preconizado para indivíduos do público, sendo ainda assim mais baixo que a média anual decorrente de exposição à radiação de fundo natural.

Um aspecto fundamental a ser ressaltado é que para que esta situação extrema ocorresse, seria preciso que circuitos eletrônicos de segurança, como chaves de fim de curso e medidores de radiação incorporados à blindagem cessassem de funcionar simultaneamente ou fossem deliberadamente fraudados.

5. CONCLUSÕES

Os dois primeiros incidentes propostos resultaram virtualmente nos mesmos valores de exposição, com diferença resultante das aproximações realizadas no caso do medidor de espessura.

A causa controlável mais apontada para os incidentes relatados foi procedimento pobre, o que se pode solucionar com treinamento das equipes de operação e manutenção dos geradores de raios X, que tanto mais aprimorado será, quanto mais casos de situações de risco forem abordados.

Os incidentes propostos não resultaram em exposições relevantes, o que é compatível com aqueles relatados, contudo ambos ampliam a compreensão dos riscos inerentes às atividades correspondentes, o que induz a elaboração de procedimentos de operação segura mais adequados às condições reais de uso destas máquinas.

Por mais insólita que possa parecer uma determinada situação proposta para um incidente, seu estudo irá ressaltar aspectos relevantes de proteção radiológica, como por exemplo, o fato de o acelerador estar localizado em cima de um mezanino, já aumenta as distâncias dos trabalhadores com relação ao foco de radiação, do mesmo modo a própria estrutura mecânica da linha de impressão atua como blindagem, daí as doses efetivas baixas observadas.

Estes exemplos podem ser usados nos treinamentos operacionais em duas modalidades: *i*) como proposta de raciocínio dos mecanismos de segurança adotados pelos fabricantes e dos procedimentos a serem seguidos pelos operadores dos geradores de radiação e *ii*) preparação para perguntas, algumas das quais podem parecer sem propósito em princípio, mas que uma busca mais apurada revela ser fundamentada, como no caso do medidor de nível por raios X relatado que teve seu gerador trocado por outro de energia mais elevada [14].

O esclarecimento das equipes envolvidas com a operação e manutenção destes geradores de radiação sobre a correta dimensão dos riscos a que estão expostos justifica o extremo das condições apresentadas, pois são situações que muito dificilmente ocorrerão na prática industrial, o que ressalta os aspectos intrínsecos de segurança levados em consideração desde o seu projeto.

A ampliação dos casos propostos, assim como o refinamento dos cálculos das doses incorridas é uma continuação natural do presente estudo, assim como a avaliação de sua inclusão nos programas de treinamento das instalações que empreguem as referidas máquinas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas ANTILHAS Embalagens, Gráfica e Editora S.A., MAREL Food Systems do Brasil Ltda., COPACOL – Cooperativa Agroindustrial Consolata e MEIWA Embalagens Ltda. que tornaram possível a realização da coleta de dados e realização de treinamentos com os resultados obtidos em suas instalações.

D. A. da S. Rios agradece ao suporte acadêmico e financeiro do IPEN / CNEN para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. International Atomic Energy Agency “*International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources – BSS115*”, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996
2. International Atomic Energy Agency “*Radiation safety of gamma, electron and x ray irradiation facilities – SSG8*”, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010
3. Comissão Nacional de Energia Nuclear “*Diretrizes básicas de proteção radiológica*”, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Brasília, 2005
4. Comissão Nacional de Energia Nuclear “*Critérios de exclusão, isenção e dispensa dos requisitos de proteção radiológica – PR3.01/001:2011*”, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Brasília, 2011
5. Energy Sciences, Inc. Installation Manual EZ Cure TM Model EZ110/120/1000 DF for System 8197 Wilmington, EUA (2009)
6. <http://articles.latimes.com/2006/dec/20/local/me-baby20>
7. <http://www.arpansa.gov.au/pubs/RadiationProtection/arir/arir2009.pdf>
8. <http://www.arpansa.gov.au/pubs/RadiationProtection/arir/arir2010.pdf>
9. http://www.arpansa.gov.au/pubs/RadiationProtection/arir/int_arir2011.pdf
10. <http://rockable4.rssing.com/browser.php?indx=3833738&item=68>
11. <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2170845/Shocked-security-staff-spot-month-old-BABY-baggage-scanner-couple-stowed-luggage-didnt-visa.html>
12. <http://www.globaltimes.cn/content/826363.shtml#.U2JjgPldXVY>

13. <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2258273/DJ-Deadmau5-records-getting-X-rayed-airport-security-scanner.html>
14. <http://www.othea.net/index.php/en/reports/industrial/gauges/184-incident-dans-une-brasserie-suite-a-linstallation-dun-nouveau-tube-a-rayons-x-dans-une-jauge-de-niveau.html>
15. <http://www.othea.net/index.php/en/reports/other/x-ray-inspection-machines/168-exposition-dingenieurs-durant-la-maintenance-dun-systeme-dinspection-de-bagages-a-rayons-x.html>
16. <http://www.othea.net/index.php/en/reports/other/x-ray-inspection-machines/169-exposition-de-membres-du-public-par-un-systeme-dinspection-de-bagages-dans-un-aeroport.html>
17. R. Chandra “*Nuclear Medicine Physics: The Basics*”, Wolters Kluwer, 7th edition, *s.d.*, *s.l.*
18. <http://www.propublica.org/special/scanning-the-scanners-a-side-by-side-comparison>
19. American Standard Testing Methods E94 – 04(2010) “Standard Guide for Radiographic Examination”