

SEGURANÇA RADIOLÓGICA DE ACELERADORES LINEARES DE GRANDE PORTE

José de Jesús Rivero Oliva¹ e Fernando Nuno Carneiro de Sousa²

¹ Departamento de Engenharia Nuclear
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Av. Av. Horácio Macedo 2030 Bloco G, Sala 206, Cidade Universitária
21941-914, Rio de Janeiro, RJ
rivero@con.ufrj.br

² Acelétron Irradiação Industrial
Av. Brasil 19.001 – Pavilhão 200, Irajá
21530-000, Rio de Janeiro, RJ
fernandonunosousa@gmail.com

ABSTRACT

The electron linear accelerators can be used in industrial applications that require powerful sources of ionizing radiation. They have the important characteristic of not representing a radiation hazard when the accelerators remain electrically disconnected.

With the plant in operation, a high reliability defense in depth reduces the risk of radiological accidents to extremely small levels. It is practically impossible that a person could enter into the radiation bunker with the accelerators connected.

Acelétron Irradiação Industrial, located in Rio de Janeiro, offers services of irradiation by means of two powerful electron linear accelerators, with 15 kW power and 10 MeV electron energy. Despite the high level of existing radiation safety, a simplified risk study is underway to identify possible sequences of radiological accidents. The study is based on the combined application of the event and fault trees techniques.

Preliminary results confirm that there is a very small risk of entering into the irradiation bunker with the accelerators in operation, but the risk of an operator entering into the bunker during a process interruption and remaining there without notice after the accelerators were restarted may be considerably larger. Based on these results the Company is considering alternatives to reduce the likelihood of human error of this type that could lead to a radiological accident.

The paper describes the defense in depth of the irradiation process in Acelétron Irradiação Industrial, as well as the models and preliminary results of the ongoing risk analysis, including the additional safety measures which are being evaluated.

1. INTRODUÇÃO

Os aceleradores lineares de elétrons podem ser usados em aplicações industriais que precisam de fontes de radiações ionizantes potentes. Eles têm a importante característica de que, pela não utilização de substâncias radioativas, não existe perigo radiológico quando o acelerador permanece desligado.

Com a instalação em funcionamento, uma defesa em profundidade de alta confiabilidade, formada por diversas barreiras e medidas redundantes, diminui o risco de um acidente radiológico até níveis extremamente pequenos. Resulta praticamente impossível que, por erro

humano e/ou falha de dispositivos de segurança, algum funcionário consiga entrar no Bunker de irradiação com os aceleradores ligados.

A Empresa Acelétron Irradiação Industrial, localizada no Rio de Janeiro, oferece serviços de irradiação mediante dois potentes aceleradores lineares de elétrons, de 15 kW de potência e 10 MeV de energia. Não obstante o alto nível de segurança radiológica existente, um estudo de risco simplificado está em andamento para aprofundar nas possíveis sequências de acidentes radiológicos deste tipo de instalação. O estudo está baseado na aplicação combinada das técnicas de árvores de eventos e de falhas, características das Análises Probabilísticas de Segurança (APS).

Os resultados preliminares confirmam que existe um risco muito pequeno de entrada no Bunker de Irradiação com os aceleradores ligados, mas que o risco de algum funcionário ficar dentro do Bunker em estado inconsciente, depois da correção de alguma falha, e que os aceleradores sejam ligados sem se perceber que ele permanece dentro, pode ser consideravelmente maior. Baseado nestes resultados a Empresa estuda alternativas para reduzir a probabilidade de que um erro humano deste tipo possa conduzir a um acidente radiológico.

O presente trabalho descreve a defesa em profundidade do processo de irradiação industrial na Empresa Acelétron, os modelos e resultados preliminares da análise de risco simplificada em andamento e as medidas de segurança complementares que estão sendo avaliadas.

2. SEGURANÇA DE ACELERADORES LINEARES

Nas instalações com feixes de elétrons de categoria 2 existe um sistema de controle de entrada que impede o acesso dos operadores na sala de irradiação (Bunker) com o acelerador ligado [1,2]. A segurança destas instalações está baseada na aplicação do princípio de defesa em profundidade, estruturado mediante um sistema de proteção de vários níveis, que abrange tanto as barreiras e os dispositivos de segurança quanto os procedimentos e medidas organizacionais. A alta confiabilidade da defesa em profundidade parte de um projeto que integra de forma harmônica os conceitos de redundância, diversidade e independência.

Não obstante o baixo risco destas instalações, não é possível excluir completamente a possibilidade de um acidente radiológico em cenários onde coincida uma condição de acelerador total ou parcialmente ligado e a presença de um operador em uma área de alta radiação. Estes cenários se reduzem basicamente a três possibilidades:

1. Alguém entra nas áreas de alta radiação para investigar uma falha de equipamento e/ou realizar alguma tarefa de manutenção com o acelerador inadequadamente (ou apenas parcialmente) desligado [1].
2. Alguém permanece preso / presente dentro das áreas de alta radiação, enquanto o feixe de elétrons é ligado [3].
3. Alguém consegue entrar inadvertidamente nas áreas de alta radiação com o acelerador funcionando.

Na Tabela 1 são apresentados vários acidentes que já aconteceram até 1992. No acidente na França foi realizada uma entrada indevida com o acelerador parado, mas sem desligar a alta tensão para ganhar tempo (cenário 1). No Vietnã se tratava de um acelerador de pesquisa onde, por falta de sistemas de segurança e procedimentos adequados, um pesquisador ficou lesionado quando ajustava uma amostra enquanto o operador ligou o acelerador (cenário 2).

Tabela 1. Acidentes radiológicos ocorridos em aceleradores de partículas [4]

País / localidade	Ano	Causa principal	Pessoas afetadas	Consequências
URSS	1978	----	1	Dose localizada de 20 Gy nas mãos
USA	1978	----	1	Exposição localizada de abdômen, mãos e coxas
França / Forbach	1991	Entrada inadequada. Exposição a corrente escura	3	Lesões na pele
Vietnã / Hanoi	1992	Entrada inadequada	1	Amputação de dedos e uma mão

Nos aceleradores modernos existem intertravamentos (interlocks) redundantes e diversos, que são acionados automaticamente quando acontece um acesso indevido às áreas de alta radiação, produzindo o desligamento total do acelerador e da alta tensão. Desta forma o risco dos cenários 1 e 3 resulta atualmente muito pequeno.

Adicionalmente, os novos projetos mantêm sempre presa uma das duas chaves de acesso que determinam a segurança da instalação: 1) A chave para ligar o acelerador; 2) A chave de acesso às salas de alta radiação. Deste modo nunca resulta possível usar as duas chaves simultaneamente.

Assim, quando a chave de acesso aos locais de alta radiação é liberada, a chave para ligar os aceleradores fica presa em posição “off” e resulta impossível ligar os aceleradores. Isto dificulta a ocorrência dos cenários 1 e 2.

Por outro lado, somente com as portas das salas fechadas e intertravadas, e a chave de acesso presa no painel de controle do acelerador, este pode ser ligado. Desta forma, enquanto o acelerador está funcionando a chave de acesso aos locais não pode ser retirada por ninguém. Isto reduz o risco de ocorrer o cenário 3.

De fato, nos últimos 20 anos não têm acontecido acidentes radiológicos em aceleradores de uso industrial. Não obstante, resulta necessário manter um sistema de gerenciamento de riscos suficientemente desenvolvido para garantir que as instalações deste tipo mantenham um nível de risco residual, muito pequeno.

3. A SEGURANÇA NA ACELÉTRON

A Figura 1 mostra o layout básico do sistema de irradiação da Acelétron, mediante dois aceleradores lineares denominados Torre (acelerador superior) e Poço (acelerador inferior).

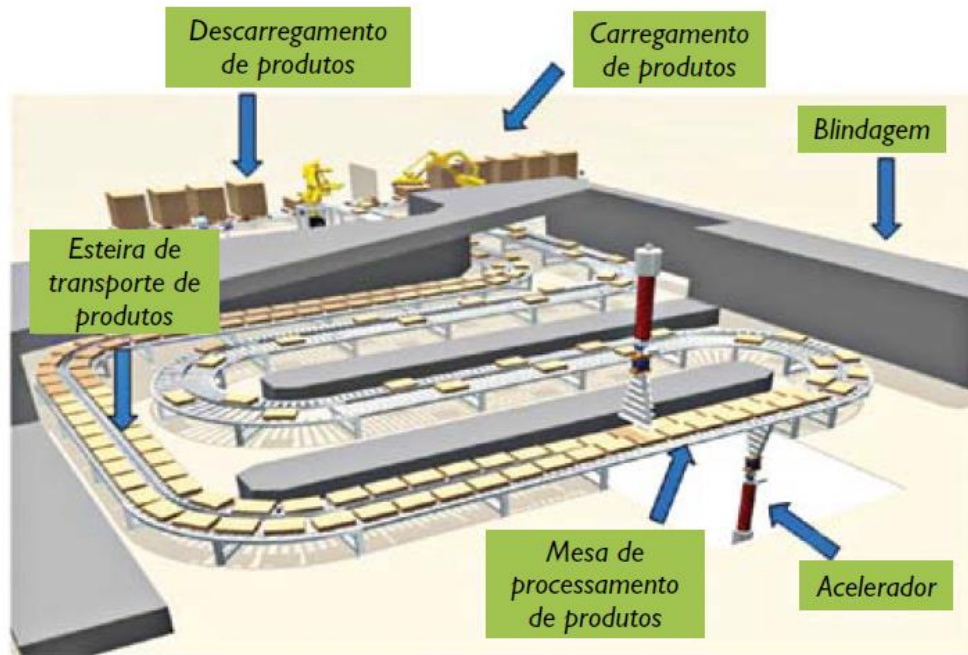


Figura 1. Layout básico do sistema de irradiação [5]

A instalação conta com dispositivos de segurança redundantes e diversos para garantir a parada de emergência e impedir o acesso às áreas com altos níveis de radiação com os aceleradores em operação [6]. Estes dispositivos são:

1. **Chave de acesso.** Existe uma única chave de acesso aos locais com altos níveis de radiação em operação. Para esta chave estar liberada, necessariamente as chaves de acionamento dos aceleradores devem estar inseridas e travadas (cativas) no console da mesa de controle, localizada na sala de controle, sem possibilidade de ligar o feixe.
2. **Intertravamentos** que desligam automaticamente o acelerador por:
 - a) Falhas no mecanismo de transporte do produto (parada da esteira)
 - b) Acionamento de cabos de segurança e/ou botões de emergência
 - c) Acionamento de interruptor de porta de acesso à sala de alto nível de radiação
 - d) Acionamento de cortina de luz
 - e) Acionamento de tapete de pressão
3. **Sinais luminosos e sonoros**, anunciando a sequência de partida do acelerador, para alertar a uma pessoa que eventualmente possa ter ficado dentro de uma área de alta radiação.
4. **Parada de emergência:** Desligamento manual do acelerador mediante:
 - a) Botões de emergência localizados em múltiplos lugares.
 - b) Cabos de segurança dentro das áreas com altos níveis de radiação.

Os intertravamentos, assim como os botões e cabos de parada manual de emergência são testados trimestralmente mediante um programa escalonado, de modo que todo mês é testada uma parte dos dispositivos de segurança.

4. ANÁLISES DE RISCO

Quando se analisam possíveis acidentes radiológicos em aceleradores, a tendência é considerá-los muito pouco prováveis, praticamente desprezíveis, devido a grande redundância e diversidade dos intertravamentos que desligariam os aceleradores em caso de uma entrada ilegal.

Uma vez reconhecido este fato indiscutível, resulta importante não se deixar levar pela autocomplacência e considerar com maior atenção outros tipos de acidentes possíveis onde o pessoal não tem que entrar senão aqueles que já se encontram dentro, realizando tarefas de correção de falhas ou manutenção, com os aceleradores desligados. Nestas condições poderia acontecer um acidente radiológico se a alta tensão permanece ligada ou acontece a partida do acelerador por erro humano.

De fato, os três tipos de cenário mencionados anteriormente poderiam ser possíveis também na Acelétron se coincidisse circunstâncias especiais com erros humanos. Embora a probabilidade resulte muito pequena, existe um risco residual de acidente radiológico que não pode ser ignorado. Especificamente, têm sido identificadas as seguintes possibilidades:

1. Realização de tarefa especial de acondicionamento ou manutenção com a alta tensão ligada. Isto exige ter que contornar temporariamente os intertravamentos das portas de acesso às salas de alta irradiação. Nestas circunstâncias, a presença inadequada de algum operador próximo da mesa de processamento poderia produzir um acidente radiológico devido a uma corrente escura. Uma corrente escura resulta possível inclusive com o cabo de alta tensão do canhão de elétrons desligado.
2. Durante uma interrupção prolongada que demande o trabalho de vários operadores, alguma pessoa poderia passar mal, sofrer desmaio por acidente (queda, colisão, etc.) ou fadiga, induzida pelo esforço físico em condições adversas (alta temperatura, local fechado, etc.), e ficar inconsciente sem que isto seja percebido pelo chefe do turno de operação. Este poderia iniciar a sequência de partida do acelerador com a pessoa dentro do Bunker.
3. Não foi considerada a entrada intencional a uma sala de alta radiação com os aceleradores ligados. Apenas foi avaliada a possibilidade de ingresso indevido por erro humano, embora seja um evento muito pouco provável. Um operador inexperiente e/ou mal treinado poderia errar de porta e conseguir entrar em uma área de alto nível de radiação por falha simultânea do fechamento da porta e dos intertravamentos de segurança existentes nesse ponto. O cenário mais verossímil seria na sala do acelerador denominado Torre, por tratar-se de uma porta relativamente isolada. A entrada no Poço é menos provável por que resultaria necessário descer depois de remover uma tampa de grande peso.

Neste trabalho são analisados de forma comparativa os riscos dos cenários 2 e 3, ou seja, serão avaliados e comparados os riscos de entrada ilegal e de partida dos aceleradores com uma pessoa dentro do Bunker. O cenário de manutenção com a alta tensão ligada resulta infrequente (de fato até agora nunca aconteceu) e não tem sido analisado nesta etapa devido a sua maior complexidade.

4.1. Entrada ilegal à Torre com os aceleradores ligados

Neste caso o evento iniciador seria um erro humano de Entrada Ilegal (EI) por parte de um operador inexperiente. Será considerado que em média 2 novos operadores começam a trabalhar na Acelétron por ano, conjuntamente com um valor de probabilidade de erro humano de 10^{-1} , ou seja, um de cada 10 operadores comete um erro deste tipo durante seu primeiro ano de trabalho (valor de “screening”). Assim a frequência do evento iniciador (f_{EI}) seria:

$$f_{EI} = 0,2/\text{ano (em média 1 evento cada 5 anos)}.$$

Para determinar o risco de acidente radiológico devido a este evento iniciador, a defesa em profundidade é modelada mediante a árvore de eventos da Figura 2.

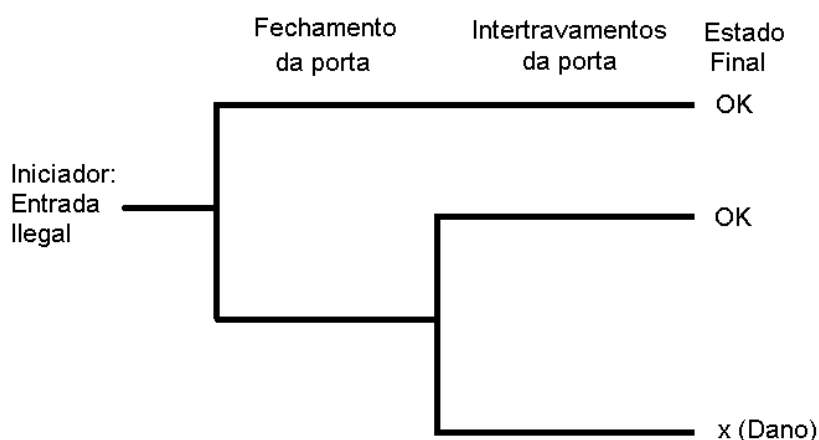


Figura 2. Árvore de eventos da entrada ilegal na Torre

O primeiro cabeçalho da árvore de eventos corresponde à falha de um único dispositivo, o fechamento magnético da porta (FM). O segundo cabeçalho representa a falha simultânea de todos os intertravamentos da porta: interruptor (IP), tapete de pressão (TP) e cortina de luz (CL). Da integração destas falhas na sequência acidental de acidente radiológico, resulta a árvore de falhas para a determinação do risco, representado na Figura 3.

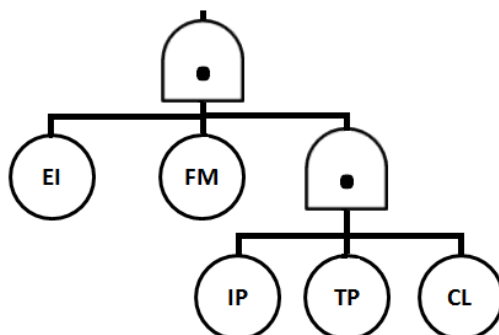


Figura 3. Árvore de Falhas da Sequência acidental de dano

A indisponibilidade destes dispositivos se calcula avaliando a progressão de falhas ocultas durante o tempo médio entre testes periódicos ou ciclos de acionamento, mediante a expressão:

$$q = \frac{1}{2} \lambda T \quad (1)$$

Onde q é a probabilidade média de falha (indisponibilidade), λ é a taxa de falhas (h^{-1}) e T é o tempo médio de progressão das falhas (h).

Foram consultadas várias fontes e bases de dados [7, 8, 9] para a seleção dos valores das taxas de falha, selecionando-se os valores maiores que conduzem aos resultados mais conservadores. A Tabela 2 mostra os dados utilizados.

Tabela 2. Dados para a determinação do risco de entrada ilegal na Torre

Componente	Taxa de falhas (h^{-1})	Tempo médio entre testes (h)	Indisponibilidade média
Fechadura da porta (FM)	$1,0 \cdot 10^{-6}$	360	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Interruptor da porta (IP)	$8,0 \cdot 10^{-6}$	2160	$8,64 \cdot 10^{-3}$
Tapete de pressão (TP)	$8,0 \cdot 10^{-6}$	2160	$8,64 \cdot 10^{-3}$
Cortina de luz (CL)	$8,0 \cdot 10^{-6}$	2160	$8,64 \cdot 10^{-3}$

Avaliando numericamente a árvore de falhas da Figura 3, o valor de risco de acidente radiológico por entrada ilegal na Torre é:

$$R_{EI} = f_{EI}q_{FM}q_{IP}q_{TP}q_{CL} = (0,2)(1,8 \cdot 10^{-4})(8,6 \cdot 10^{-3})^3 = 2,29 \cdot 10^{-11}/\text{ano} \quad (2)$$

Este resultado significa um evento a cada $4,37 \cdot 10^{12}$ anos, ou seja, um valor extramente pequeno, não obstante ter usado estimativas altas e muito conservadoras das taxas de falha dos dispositivos.

4.2. Partida do acelerador com uma pessoa dentro do Bunker

O evento iniciador seria um operador em estado inconsciente dentro do Bunker (OI). A frequência deste iniciador é determinada pela ocorrência de uma interrupção prolongada com uma carga importante de manutenção corretiva seguida da indisposição de um dos operadores.

Uma estimativa razoável da frequência de uma interrupção deste tipo seria um evento por ano. Já estimar a probabilidade de acontecer um desmaio de um operador resulta um pouco mais complicado pela falta de dados. Para a determinação desta probabilidade foi considerado que 40% das pessoas pode sofrer desmaio alguma vez na sua vida [10] e que uma pessoa vive em média aproximadamente 80 anos. Com estes dados, a taxa de desmaios para um homem médio seria:

$$\lambda_d = \frac{0,4}{80 \cdot 8760} = 5,710^{-7} h^{-1} \quad (3)$$

Se a interrupção de manutenção dura aproximadamente uma hora, a probabilidade de desmaio seria $5,7 \cdot 10^{-7}$, ou seja, uma estimativa de que 57 de cada 100 milhões de pessoas sofreria um desmaio ao realizar um trabalho intenso em condições de calor e ambiente fechado, durante um tempo de uma hora. As causas do desmaio poderiam ser uma queda ou uma síncope (falta de sangue no cérebro) por problemas da pressão ou do coração.

A frequência do iniciador f_{OI} será, portanto, $f_{OI} = (1/\text{ano}) (5,7 \cdot 10^{-7}) = 5,7 \cdot 10^{-7} / \text{ano}$.

Para este iniciador a sequência de acidente radiológico se completa apenas com o erro humano (EH), por parte do chefe turno de operação, de não perceber que um homem ficou dentro de Bunker. Ele realizaria normalmente as atividades de intertravamento e partida do acelerador e desta forma se completaria a sequência de eventos necessária para o acidente. Considerando que se trata de uma falha na inspeção visual de um evento fácil de observar, segundo um procedimento estabelecido, a probabilidade pode ser estimada como $p_{eh}=10^{-2}$ [11], ou seja, o operador erraria uma de cada 100 vezes que se apresente um cenário deste tipo.

Em consequência, o risco de acidente radiológico por partida do acelerador com uma pessoa dentro do Bunker pode ser estimado como:

$$R_{OI} = f_{OI}p_{eh} = (5,7 \cdot 10^{-7})(1,0 \cdot 10^{-2}) = 5,7 \cdot 10^{-9} / \text{ano} \quad (4)$$

Ou seja, um evento cada $1,75 \cdot 10^{10}$ anos, também um valor muito pequeno, mas com um risco 40 vezes maior do que o acidente de entrada ilegal na Torre.

5. CONCLUSÕES

Foram analisados dois eventos iniciadores contribuintes ao risco de acidente radiológico na Empresa Acelétron: entrada ilegal com os aceleradores funcionando e partida dos aceleradores com uma pessoa dentro da sala de irradiação. Os resultados demonstram que o risco radiológico é extremamente pequeno nos dois casos, mas que deve ser prestada maior atenção à prevenção do cenário de partida do acelerador com um operador dentro da sala de irradiação, cujo risco estimado é 40 vezes maior.

A Empresa avalia medidas adicionais de monitoramento e vigilância, para manter estes riscos limitados a valores residuais sumamente pequenos, como parte do programa de gerenciamento de risco e fortalecimento da cultura de segurança. Em específico, se estudam alternativas para um controle automatizado da entrada e saída de pessoas nas salas com altos níveis de radiação.

REFERÊNCIAS

1. *Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities*, IAEA Safety Series No. 107, Vienna, Austria (1992)
2. Kovács, A. *Radiation Safety at Gamma and Electron Irradiation Plants*, IAEA-TECDOC-1386, Vienna, Austria, 28-30 April, pp. 105-116, (2003)
3. “Atomic Energy Regulatory Board. *Safety Guidelines on Accelerators*. AERB/SG/IS-5. Mumbai, India”, <http://www.aerb.gov.in/T/PUBLICATIONS/CODESGUIDES/IS-5.PDF> (2005)
4. “UNSCEAR Annex E: Occupational radiation exposures,” <http://www.unscear.org/docs/reports/annexe.pdf> (2000)
5. Nuno, F.C.S., Rivero, J., Marnet, L., Prado, S., Suelen, S. “Validade de esterilização de placas de petri utilizando feixe de elétrons”, partes I e II, *Controle de Contaminação*, **Volumes 133 e 134**, pp. 26-30, 31-33, (2010)
6. Acelétron Irradiação Industrial. *Plano de Radioproteção* (2006)
7. *Component Reliability Data for use in Probabilistic Safety Assessment*. IAEA TECDOC-478, Vienna, Austria (1988)
8. *Generic Component Reliability Data for Research Reactor PSA*. IAEA TECDOC-930, Vienna, Austria (1997)
9. “STSARCES. Standards for Safety Related Complex Electronic Systems. Quantitative Analysis of Complex Electronic Systems using Fault Tree Analysis and Markov Modelling. Final Report of WP2.1. Michael Dorra & Dietmar Reinert. BIA,” <http://users.khbo.be/catrysse/annex6.pdf> (1999)
10. “Syncope Trust And Reflex anoxic Seizures (STARS). La lista de posibilidades de pérdida de conocimiento,” http://www.stars-international.org/files/file/STARS_Blackout_Checklist_Spanish_stg4.pdf (2010)
11. *Hazard and Barrier Analysis Guidance Document*, EH-33 Rev. 0, United States Department of Energy (DOE), Washington D.C., USA, (1996)