



ESTUDO DE UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA DE DECISÃO FMEA ASSOCIADO A MANUTENÇÃO PREVENTIVA NA INDÚSTRIA.

USE STUDY OF FMEA DECISION METHODOLOGY ASSOCIATED WITH PREVENTIVE MAINTENANCE IN THE INDUSTRY.

Ana Paula de Freitas Alves ¹

Bruno Gomes de Santana ²

Carla Adriane Ramos Segatto Fontoura ¹

¹ UNEF - Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana, Av. Luís, Av. Eduardo Magalhães - Aviário, Feira de Santana - BA, 44079-002. anapaulafreitasa11@gmail.com

¹ UNEF - Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana, Av. Luís, Av. Eduardo Magalhães - Aviário, Feira de Santana - BA, 44079-002. carladriane.segatto@gmail.com

² UNIFAN - Av. Maria Quitéria, 2116 - Centro, Feira de Santana - BA, 44001-008. brunosantana.engmecanica@gmail.com

RESUMO

Este estudo propõe a utilização da metodologia Modos de Falha e Análise de Efeitos (FMEA) como ferramenta de decisão na priorização de um protocolo de manutenção preventiva do sistema de acesso do bunker onde se localiza um acelerador linear em uma indústria fictícia. Foram considerados 4 riscos hipotéticos associados ao cenário de acesso ao bunker, classificados conforme ocorrência, severidade e detectabilidade em uma escala de 1 a 5. O maior número de prioridade de risco foi estimado para o risco de fragilidade inerente de fabricação do sistema de intertravamento da porta ($NPR = 30$). Os demais riscos demonstraram ser controláveis pelos protocolos padrões de segurança ou pelo sistema interlock de interrupção do feixe. O método resultou na proposição de um protocolo de manutenção preventiva para os pontos críticos associados ao sistema de intertravamento das portas do bunker.

Palavras-chave: Acelerador linear, FMEA, manutenção-preventiva, segurança, indústria.

ABSTRACT

This study proposes the use of the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) methodology as a decision tool in prioritizing a preventive maintenance protocol for the bunker access system where a linear accelerator is located in a fictitious industry. Four hypothetical risks associated with the bunker access scenario were considered, classified according to occurrence, severity and detectability on a scale of 1 to 5. The highest risk priority number was estimated for the risk of inherent manufacturing fragility of the door interlock system ($RPN=30$). The other risks proved to be controllable by standard safety protocols or by the interlock system through beam

interruption. The method resulted in the proposition of a preventive maintenance protocol for the critical points associated with the bunker door interlocking system.

Keywords: Linear accelerator, FMEA, preventive maintenance, safety, industry.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta um estudo baseado em um cenário fictício. O propósito deste estudo é demonstrar como a utilização da metodologia Modos de Falha e Análise de Efeitos (FMEA) pode ser útil como ferramenta de decisão na priorização de um protocolo de manutenção preventiva. A análise aqui apresentada foi restrita ao sistema de acesso ao bunker onde se localiza um acelerador linear.

Aceleradores lineares são objeto de estudo e pesquisa em diversas áreas, desde a física nuclear e de alta energia, até microcircuitos, radioterapia e aplicações industriais. É um equipamento capaz de gerar artificialmente a radiação de alta energia, através da emissão de raios-x ou partícula beta, ambos advindos da conversão de energia elétrica em energia radiante (KUTSAEV, 2021; BRESSAN, 2010).

Sua aplicação industrial é através do uso de feixes de elétrons ou raio gamas (Fig. 1) diretamente direcionados à área de interesse. Podem ser empregados na esterilização de artigos hospitalares, na técnica de tratamento de pedras preciosas, na conservação de alimentos, ou quando se faz necessário a utilização de fontes de radiações ionizantes potentes (OLIVEIRA et al., 2017). Sua principal vantagem em relação ao uso de material radioativo é a não aplicação de partículas radioativas, gerando, assim, uma maior segurança em relação aos riscos radiológicos quando o equipamento se encontra desligado (OLIVA; SOUSA, 2013).

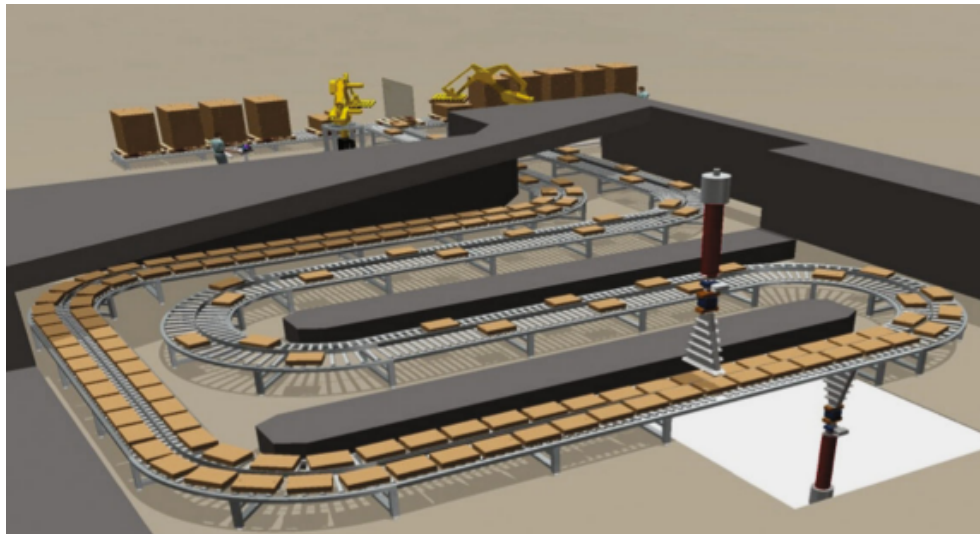


Figura 1 – Ilustração de um modelo industrial clássico utilizado para irradiação de objetos. Uma esteira transporta o objeto até o acelerador linear que desinfeta e esteriliza o material (KUTSAEV, 2021).

Tomando como base uma indústria hipotética, considerou-se neste trabalho que o mecanismo pelo qual um possível acidente radiológico poderá ocorrer é através da negligência na manutenção preventiva em um dos componentes do protocolo de segurança padrão, a fechadura *interlock*. A partir do pressuposto da ocorrência de tal falha, se faz necessário a aplicação de um protocolo de segurança que elimine o possível acontecimento e garanta a segurança dos operadores.

REFERENCIAL TEÓRICO

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão regulador responsável pela radioproteção, licenciamento e fiscalização da produção e uso de energia nuclear. Na norma 6.04, a CNEN estabelece requisitos de segurança e proteção radiológica para serviços de radiografia industrial (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2013). Esta norma prevê a obrigatoriedade de manutenção preventiva e corretiva, tanto de equipamentos quanto de instrumentos relacionados à proteção radiológica.

Art. 33 - Devem ser observados, quanto aos equipamentos e à instrumentação relacionados à proteção radiológica, os procedimentos e parâmetros de operação e

manutenção em conformidade com os manuais dos fabricantes, devendo todos os monitores e medidores de radiação ser calibrados anualmente por um laboratório de metrologia acreditado pela CNEN, conservando-se os respectivos registros.

Art. 36 - Os equipamentos de proteção radiológica devem sofrer ações de manutenção preventiva e corretiva. (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2013).

A utilização de radiações ionizantes na área da indústria engloba setores além dos irradiadores, como é o caso dos ensaios não destrutivos (END), transporte de material radioativo, aceleradores lineares, instrumentação de processo e no controle de qualidade (ANDREUCCI, 2017).

Ambientes industriais que utilizam radiação ionizante, embora regidos por fortes protocolos de segurança definidos em normas nacionais e internacionais, estão sempre sujeitos a falhas potencialmente graves. Entre 1920 e 2018, por exemplo, as causas mais frequentes de acidentes com uso de radiação no campo industrial foram quebra e/ou negligência de protocolo e defeito no maquinário (DIAS, 2019).

Neste sentido, a Manutenção Produtiva Total (do inglês *Total Productive Maintenance* – TPM) tem papel fundamental na segurança radiológica industrial. Esta metodologia de prevenção de falhas já vem sendo amplamente adotada em diversas áreas industriais, demonstrando ser uma forma eficaz de reduzir os custos de operação. Sua função é assegurar que um determinado equipamento está em perfeitas condições para ser utilizado, observando as suas especificações, prevenindo falhas e garantindo, por consequência, a segurança do ambiente laboral (YANG et. al., 2018). Para isso, a TPM se baseia em um conjunto de ações interrelacionadas que garantem a eficiência produtiva na indústria, abrangendo a manutenção preventiva e preditiva, além de programas de treinamento para que os operadores (indivíduos ocupacionalmente expostos – IOE's) adquiram a capacidade de identificação de falhas e/ou operações básicas de manutenção (ALMEIDA, 2015).

Programas de TPM devem conter manutenções preventivas regulares. A administração das manutenções preventivas requer um inventário dos equipamentos, registros de intervenções de manutenção anteriores com lista de materiais utilizados, peças substituídas e profissionais envolvidos, além de um cabeçalho com o nome da empresa, setor, fabricante, nome, modelo e ano de

fabricação da máquina, bem como observações de segurança (ALMEIDA, 2016). Esses dados permitem que o setor localize rapidamente os registros das operações e defina ações para garantir a eficiência do serviço.

Uma ferramenta complementar utilizada nos programa de TPM para a tomada de decisão é a Modos de Falha e Análise de Efeitos (do inglês *Failure Mode and Effects Analysis* – FMEA) (Fig. 2) cujo intuito principal é analisar os modos de falha prováveis e respectivas causas, permitindo destinar ações corretivas (para eliminar o problema) e preventivas (para prevenir o problema). Na metodologia FMEA os prováveis modos de falha, efeitos e causas potenciais são identificados, medidas de controle para cada falha são atribuídas, e os dados são analisados através de níveis de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D). O produto $S \times O \times D$ fornece o número de prioridade de risco (NPR) utilizado para ranquear as falhas potenciais, determinar ações para reduzir os níveis de risco e implementar as ações recomendadas (ALMEIDA, 2016; BAYNAL; SARI; AKPINAR, 2018).

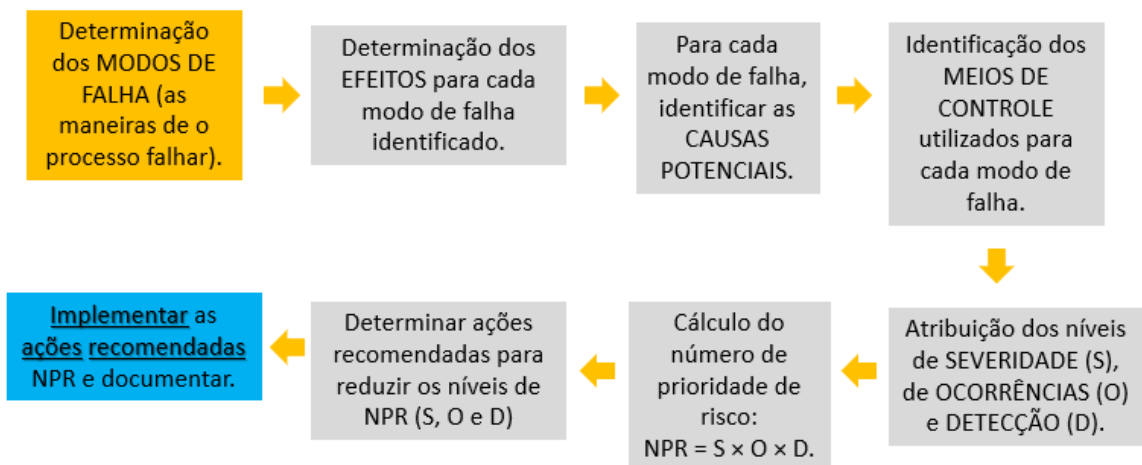


Figura 2 – Fluxo de ação na metodologia FMEA (Adaptado de ALMEIDA, 2016).

No contexto da radiologia industrial, um plano de manutenção preventiva de um acelerador industrial associado a análise de risco FMEA é de suma importância para o funcionamento do setor e garantia dos requisitos de proteção radiológica dos trabalhadores. No plano de manutenção preventiva do acelerador linear devem estar contempladas: as ações necessárias para incumbir a condição pós manutenção que atendam às condições de uso de acordo com suas especificações, e a periodicidade

das manutenções preventivas, devendo ser fundamentada na exigência do serviço, nas anotações realizadas para o apontamento do serviço (arquivadas no registro histórico do equipamento) baseando-se nas orientações do fabricante, sendo que, o registro histórico deve servir como base para a realização da manutenção atual (MAIA *et. al.*, 2020).

Tanto nas aplicações industriais quanto médicas, os aceleradores garantem a segurança dos trabalhadores ao serem alocados em um gabinete blindado (*bunkers*), cujo projeto deve favorecer uma entrada segura, bem como atenuação da radiação, através de labirintos longos fechados por portas blindadas.

Baseado em protocolos já existentes (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2013; BRASIL, 2019) um sistema de segurança de um acelerador linear possui barreiras de proteção associadas a dispositivos de acionamentos, caso ocorra algum tipo de acesso a alguma área de risco durante o funcionamento do acelerador. O sistema de segurança padrão é composto por inúmeros itens para que ele possua sua total eficiência. Programas de controle de qualidade são responsáveis pelos testes de funcionamento desses itens. O intuito dos programas de qualidade é garantir o efetivo funcionamento dos protocolos, de forma a evitar possíveis acidentes. Esse programa define o período de realização de testes em cada setor do protocolo (diários, mensais, trimestrais e anuais) e prevê equipamentos de emergência a serem empregados em caso de falha para conter os danos (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2022).

O sistema de segurança padrão contempla sinais sonoros e luminosos, que são transmitidos para anunciar quando o acelerador está entrando em funcionamento. O intuito dos sinais sonoros e luminosos são de alerta para pessoas que pretendam acessar a área de risco (sala com acelerador linear). Caso ocorra alguma possibilidade de acidente ou instabilidade, no regulamento de segurança padrão também está incorporada paradas de emergência, que são acionadas manualmente, através de botões e cabos de segurança, que são instalados em múltiplos lugares. Legalmente uma instalação radiológica possui um sistema de segurança padronizado, a fim de evitar possíveis acidentes (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2022).

O sistema de intertravamento (*interlock*) das portas é um item de segurança obrigatório (BRASIL, 2019) que desliga imediatamente o acelerador quando ocorre a parada na esteira de transporte do produto, acionamento dos botões de emergência ou cabos de segurança, de modo que o interruptor da porta de acesso a sala com alto índice de radiação é acionado. O controle de acesso ao *bunker* é dado pelo sistema *interlock* que atua interrompendo o feixe de radiação sempre que a porta for aberta (KURKIEWICZ, 2020). Alguns acidentes relatados na história ocorreram justamente por falha ou falta deste sistema (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2006). É evidente, portanto, que a garantia da radioproteção dos envolvidos está ligada a um sistema de intertravamento projetado de modo a assegurar a inviabilidade de adulteração, bem como a prevenção de falhas. Uma falha nesse sistema, logo, pode levar a consequências potencialmente graves, de modo que requer uma atenção especial no decurso da manutenção (KURKIEWICZ, 2020).

METODOLOGIA

Este trabalho contém uma revisão integrativa da literatura baseada em artigos científicos publicados e livros relevantes na área. Tratando-se de situações pouco prováveis, a falha foi baseada em conhecimentos de engenharia mecânica associados a estudos primários de situações hipotéticas relatadas em artigos, onde em uma situação duvidosa, é de extrema importância uma condução adequada dessas possíveis eventualidades.

Os critérios de busca das fontes de referência abrangem as bases de dados SciELO e Google Acadêmico. Foram selecionados 70 artigos escritos em língua portuguesa ou inglesa cujos temas envolvam as palavras-chaves acelerador linear, indústria, FMEA, manutenção preventiva e segurança. Após análise sumária, 28 foram descartados pela fuga do tema. Os trabalhos escolhidos foram conciliados e tratados com uma específica análise de dados, os quais passaram a ser

classificados como prioridades ao apresentarem FMEA e protocolos de manutenção preventiva em suas discussões.

Foi criado um cenário hipotético no qual uma indústria fictícia A trabalha com a esterilização de produtos por meio de radiação ionizante. O setor onde se localiza o acelerador linear está seguro por um *bunker* blindado, cujo acesso é dado por uma porta blindada que contém sistema de intertravamento.

Para estimar um índice de priorização, este cenário considerou 4 exemplos de riscos associados ao acesso ao *bunker*, tais como entrada inesperada de pessoal não autorizado durante funcionamento do acelerador linear, permanência de pessoal não autorizado no interior do *bunker* durante funcionamento do acelerador linear, obstrução na porta do *bunker*, e fragilidade inerente de fabricação do sistema de intertravamento da porta. Os incidentes, danos associados estimados e meios de controle encontram-se listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplos de riscos associados ao acesso ao *bunker*, considerando o incidente e dano resultante.

Risco	Incidente	Dano	Meio de Controle
Entrada inesperada de pessoal não autorizado durante funcionamento do acelerador linear	Interrupção automática do procedimento	Subdosagem do esterilização incompleto	ou <i>Interlock</i> da porta
Permanência de pessoal não autorizado no interior do <i>bunker</i> durante funcionamento do acelerador linear	Irradiação mantida	Exposição potencial	Protocolo de verificação visual da cabine de comando
Obstrução na porta do <i>bunker</i>	Impedimento do procedimento de irradiação	de Não realização da esterilização	<i>Interlock</i> da porta

Fragilidade inerente de fabricação do sistema intertravamento da porta Quebra ou perda da integridade do sistema de sistema Sobredosagem do material. Exposição da equipe a valores elevados de dose Manutenção preventiva

No cenário hipotético em questão foi escolhida uma escala variável de 1 à 5, ao invés da escala tradicional que considera valores entre 1 e 10 (ALMEIDA, 2016). Foram adotados critérios de escolha na escala baseados na probabilidade de ocorrência de dano, desde improvável até certo, na severidade sem efeito danoso até casos de efeito danoso severo alto, com exposição da equipe, e na detectabilidade desde muito fácil à impossível, conforme o esquema ilustrativo da Figura 3.

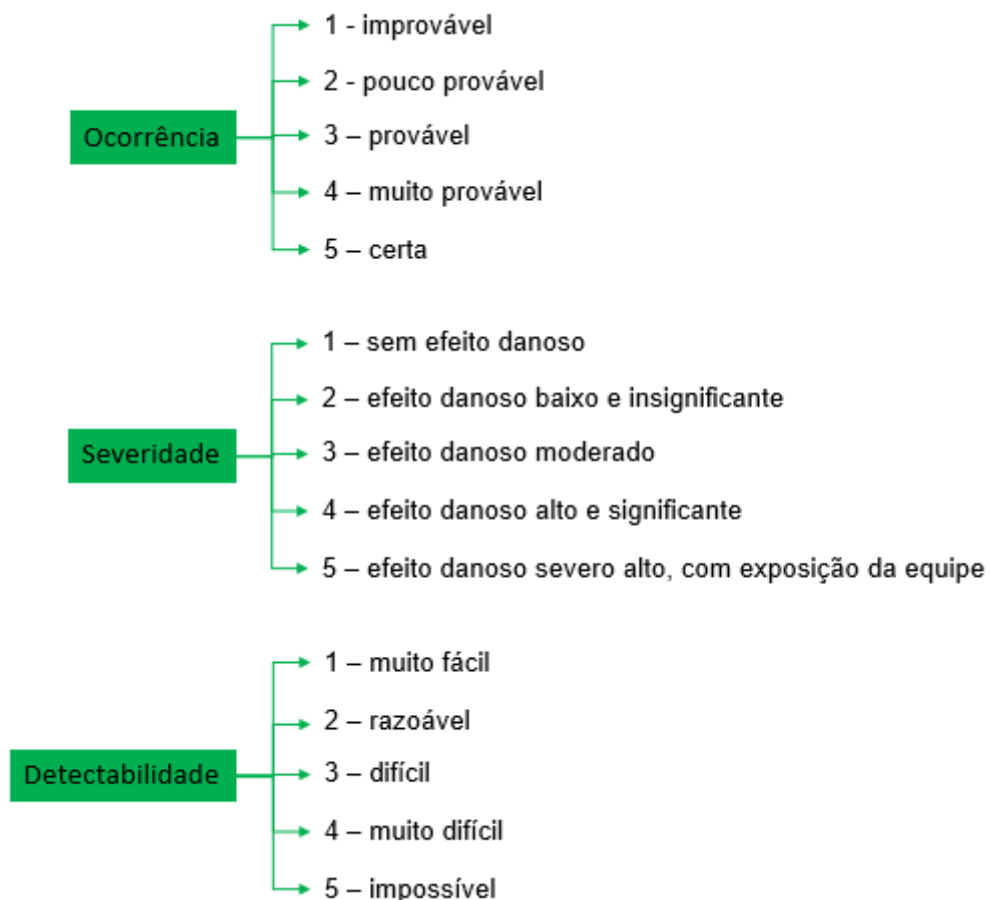


Figura 3 – Escala variável de 1 a 5 adotada para ocorrência, severidade e detectabilidade do risco (Fonte: Próprio autor 2022).

Foi considerada uma indústria hipotética A, cujo sistema de intertravamento consiste em 2 interruptores de limites redundantes conforme NBR 14153 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) assegurando a segurança de máquinas e pessoas através da repetição de componentes com a mesma função.

A proposta de protocolo de manutenção preventiva foi baseada no estudo de caso apresentado por Almeida (2016, pág. 20) originalmente aplicado a um setor de usinagem convencional, adaptado para uma aplicação industrial com acelerador linear.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os riscos foram classificados conforme o índice NPR obtido a partir de valores de severidade, ocorrência e detectabilidade adotados (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificação dos riscos de acesso ao *bunker* da indústria hipotética A em ordem crescente de NPR.

Posição	Risco	S	O	D	$NPR = S \times O \times D$
1	Fragilidade inerente de fabricação do sistema de intertravamento da porta	5	3	2	30

2	Permanência de pessoal não autorizado no interior do <i>bunker</i> durante funcionamento do acelerador linear	4	2	1	8
3	Entrada inesperada de pessoal não autorizado durante funcionamento do acelerador linear	1	2	1	2
4	Obstrução na porta do <i>bunker</i>	1	2	1	2

O menor *NPR* foi encontrado para o risco de obstrução na porta do *bunker*. Os valores adotados foram baseados na obrigatoriedade de serviços que utilizam radiação ionizantes possuem número adequado de funcionários qualificados e com treinamento acerca da proteção radiológica, riscos associados e protocolos de segurança a serem seguidos em caso de incidente/acidente, em todos os setores necessários (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2022).

Uma instalação radiológica, seguindo as normas da CNEN, possui um sistema padronizado de segurança composto por níveis de segurança instalados linearmente. Neste sentido, uma instalação seguindo um protocolo padrão contém diversos acionamentos de emergência que impede que uma pessoa não autorizada acesse a área de risco com o acelerador em funcionamento. O sistema de intertravamento de acesso aos locais com alto nível de radiação são acionadas enquanto o acelerador está em funcionamento. Para o acionamento de acesso dessa chave, obrigatoriamente, as chaves de acionamento do acelerador devem

estar ativas (inseridas e travadas), na mesa de controle, para que não ocorra o acionamento dos feixes do acelerador.

Considerando a exclusiva circulação de funcionários no local do *bunker*, a probabilidade de ocorrência de uma obstrução na porta por parte de um trabalhador treinado, entrada e permanência de pessoal não autorizado durante funcionamento do acelerador é pouco provável, muito embora não se descarte esta possibilidade, uma vez que o indivíduo é constantemente submetido a um ritmo de trabalho estressante e cansativo (GONÇALVES; SAKAE; MAGAJEWSKI, 2018).

No caso de obstrução na porta por parte de um trabalhador treinado e entrada de pessoal não autorizado durante funcionamento do acelerador, a severidade é baixa, uma vez que o *interlock* da porta irá interromper o feixe de radiação sem ocasionar dano tanto ao indivíduo ocupacionalmente exposto quanto ao produto. Já no caso de permanência de pessoal não autorizado no interior do *bunker* durante funcionamento do acelerador linear, considerou-se a severidade do risco como de efeito danoso alto e significativo. Este cenário é presumível quando um trabalhador entra no *bunker* para realizar limpeza ou solucionar falhas, por exemplo, e o operador não percebe que o trabalhador permaneceu no ambiente após o fechamento da porta e inicia a irradiação. Neste caso, o trabalhador sofrerá exposição. No entanto, é provável que o operador perceba o erro em pouco tempo e interrompa o feixe, de modo que o trabalhador não sofrerá exposição muito alta. Ainda, considerando o treinamento obrigatório da equipe no ambiente, um segundo desfecho possível é o próprio trabalhador interromper o feixe de dentro do *bunker* através do botão de emergência (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2022).

Exceto o risco de fragilidade inerente à fabricação do sistema de intertravamento da porta, considerou-se que todos os demais riscos possuem detectabilidade muito fácil, visto que o operador consegue facilmente inspecionar a área diretamente do comando.

O risco de fragilidade inerente de fabricação do sistema de intertravamento da porta é, sem dúvida, o risco de maior grau ($NPR = 30$). Quebras ou perda da integridade do sistema, por se tratarem de incidentes intrínsecos à vida útil do

material, são considerados de ocorrência provável e detectabilidade razoável. O contrapeso entre ocorrência e detectabilidade se dá pela adesão à um protocolo adequado de manutenção preventiva. A ocorrência deste risco acarreta em sobredosagem do material e provável exposição da equipe a valores elevados de dose, visto que o sistema de prevenção de acidentes não detecta o problema. Além disso, o alto *NPR* associado se justifica pelo fato de que 2 dos 3 demais riscos considerados neste trabalho dependem do funcionamento deste sistema de proteção para conter o dano. Considerando-se o fato de que o caso hipotético atual é simplificado e não considera todas as variáveis prováveis envolvidas em um cenário real, a ocorrência deste risco pode produzir uma gama de efeitos danosos severos altos, com potencial exposição da equipe.

Neste contexto, um protocolo adequado de manutenção preventiva pode assegurar que o sistema de intertravamento das portas está em perfeitas condições para ser utilizado, prevenindo falhas e garantindo a segurança da equipe. A proposta de plano de manutenção preventiva descrita a seguir visa contribuir para este cenário.

Em conformidade com a literatura, o relatório de manutenção apresentado na Tabela 3 foi desenvolvido exclusivamente para análise do sistema *interlock* das portas do *bunker* em um setor industrial que opere com radiação ionizante. Contempla o nome, setor, fabricante, modelo, código e ano de fabricação do equipamento. A referência normativa ISO 9001:2015 - Item 7.1.3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), se refere a gestão de qualidade na infraestrutura de operação de processos.

Tabela 3 - Proposta de relatório de manutenção preventiva do sistema *interlock* da porta do *bunker*.

INFORMAÇÕES TÉCNICAS		
Profissional:		
Equipamento:		Setor:
Código do equipamento:	Fabricante:	Ano de fabricação:

Referência normativa: ISO 9001:2015 - Item 7.1.3*				
* ABNT NBR ISO 9001:2015, Sistemas de Gestão da Qualidade – Requisitos.				
RELATÓRIO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA				
Nº do item	Descrição	Item verificado	Valores encontrados	Diagnóstico
1	Inspeção sensitiva	Visual		
		Odor		
		Ruido		
		Vibração		
		Temperatura de trabalho		
2	Inspeção eletrônica	Cabos		
		Conectores		
		Tensões elétricas		
3	Limpeza e descontaminação	Conectores		
		Trilhos		
		Molas		
		Engrenagens		
4	Lubrificação	Trilhos		
		Molas		
		Engrenagens		
5	Ajustes técnicos	Alinhamento		
		Molas		
		Engrenagens		
Materiais utilizados/peças substituídas:				
Data da última inspeção:			Data atual:	
Assinatura do responsável:				

Na coluna valores encontrados o condutor do teste deve informar as condições do item e na coluna diagnóstico, se aprovado ou reprovado. Após a inspeção, os materiais utilizados e/ou peças substituídas devem ser relatadas.

Finalizar pelo preenchimento da data da última inspeção, data atual e assinatura do responsável pelo teste.

Tendo em vista o risco de fragilidade inerente de fabricação do sistema de intertravamento da porta apresentado, foi proposto um planejamento de manutenção preventiva que visa minimizar a probabilidade de ocorrência de tal ameaça. Sugere-se que as inspeções sensitiva e eletrônica sejam realizadas a cada 3 meses, e que a limpeza e descontaminação, lubrificação e ajustes técnicos sejam desempenhados pelo menos uma vez ao ano, exceto nos casos em que, no momento da inspeção visual, se detecte a necessidade destas operações antes do prazo.

Tabela 4 – Plano de manutenção preventiva do sistema *interlock* da porta do *bunker*.

PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA		
Nº da operação	Operação da Manutenção	Frequência
1	Inspeção sensitiva	A cada 3 meses
2	Inspeção eletrônica	A cada 3 meses
3	Limpeza e descontaminação	A cada 12 meses
4	Lubrificação	A cada 12 meses
5	Ajustes técnicos	A cada 12 meses

Por fim, esta proposta de plano de manutenção preventiva tem a finalidade de ajustar-se as boas práticas a serem adotadas por um setor industrial que opere com radiação ionizante. Neste sentido, ele constitui um protocolo de ação a ser seguido regularmente, no caso de adoção na rotina. Os registros de intervenções de manutenção devem ser mantidos, juntamente com a lista de materiais utilizados, peças substituídas e profissionais envolvidos, para fins de consulta e análise nas próximas manutenções.

CONCLUSÃO

Um protocolo de segurança padrão de instalações que utilizam aceleradores lineares apresenta uma boa eficiência em sua função, que é de evitar um possível acidente radioativo. O controle de acesso ao *bunker* se dá por diversas formas, muitas dessas baseadas no sistema *interlock* da porta.

Foram analisados 4 riscos prováveis em uma instalação industrial hipotética A que trabalha com a esterilização de produtos por meio de radiação ionizante, e avaliados os supostos incidentes, danos e meios de controle associados através do método de análise de risco FMEA.

Os riscos de entrada de pessoal não autorizado ou obstrução da porta no *bunker* durante o funcionamento do acelerador linear apresentaram baixo *RPN* devido ao acionamento imediato do sistema de *interlock* que interrompe o feixe de radiação e não acarreta em exposição da equipe.

O risco de permanência de pessoal não autorizado no interior do *bunker* possui um número de prioridade de risco um pouco maior devido a exposição potencial associada. No entanto, este risco é contornado pelo treinamento permanente e adequado da equipe, associado aos protocolos adicionais de segurança, tais como botão de emergência e inspeção visual do comando.

A falha da manutenção preventiva nas chaves de segurança *interlock*, que dão acesso a operadores em locais não permitidos durante o funcionamento do acelerador mostrou ser um risco relevante. A metodologia FMEA, evidenciada pelo aparente alto *NPR* mostrou ser adequada e objetiva para demonstrar a importância da manutenção preventiva como meio de controle deste risco.

A conclusão deste trabalho se dá pela apresentação de um protocolo de manutenção preventiva para o sistema de intertravamento das portas coerente com a instalação industrial hipotética considerada, conforme determinação do fabricante, afim de dirimir os riscos de acidentes radiológicos. Entende-se que este protocolo pode contribuir para a maior durabilidade do sistema *interlock*, refletindo positivamente na segurança da equipe.

REFERÊNCIAS

ANDREUCCI, R. Radiologia Industrial. São Paulo: Abendi, 2017. *E-book*: Disponível em: http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/radiologia_maio_2017.pdf

ALMEIDA, P. S. D. **Manutenção Mecânica Industrial - Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015.

ALMEIDA, P. S. D. **Manutenção Mecânica Industrial - Princípios Técnicos e Operações**. São Paulo: Editora Saraiva, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14153: Segurança de máquinas – Partes de sistemas de comando relacionados à segurança – Princípios gerais para projeto**. 2013.

_____. NBR ISO 9001: Sistemas de Gestão da Qualidade – Requisitos. 2015.

BAYNAL, K.; SARI, T.; AKPINAR, B. **Risk management in automotive manufacturing process based on FMEA and grey relational analysis: A case study**. *Advances in Production Engineering And Management*, v. 13, n. 1, p. 69–80, 2018.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. 2019.

BRESSAN, Aparecida Izabel. **A disponibilidade de aceleradores lineares para o tratamento do câncer no Brasil e as teses de focalização e simplificação do SUS**. 2010. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de., Fundação Oswaldo Cruz. Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/2344>. Acesso em: 10 mai. 22.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **NN 3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. 2014.

_____. **NN 6.02: Licenciamento de instalações radiativas**. 2022.

_____. **NN 6.04: Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Radiografia Industrial.** 2013.

DIAS A. J. R., VILELA A. N., VICENTE R., DELLAMANO J.C.. **Acidentes radiológicos: dados que auxiliam a proteção radiológica.** International Joint Conference Radio 2019: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. 2019. Disponível em:
<https://www.sbpr.org.br/portal/files/radio2019/anais/902-3977-1-RV.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

GONÇALVES, S. B. B.; SAKAE, T. M.; MAGAJEWSKI, F. L. **Prevalência e fatores associados aos acidentes de trabalho em uma indústria metalmecânica.** Revista Brasileira de Medicina do Trabalho, v. 16, n. 1, p. 26–35, 2018.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Lessons Learned from Accidents in Industrial Radiography.** Safety Reports Series No. 7. 2006.

KURKIEWICZ, Jaroslaw et al. **Radiation shielding swing door drive control system for linear accelerator bunkers.** Letters in Oncology Science, v. 17, n. 1, p. 11-15, 2020.

KUTSAEV, S.V. **Novel Technologies for Compact Electron Linear Accelerators (Review).** Instrum Exp Tech, v. 64, p. 641–656, 2021.

MAIA, France Anne Reinaldo et al. **Elaboração de protocolo eletrônico de gerenciamento de aceleradores lineares contemplados pelo plano de expansão da radioterapia no SUS (PER-SUS).** Universidade Estadual Da Paraíba. 2020.

OLIVEIRA, J. S.; CAMPOS, I. C.; SILVA, J. F.; GOMES, A. S.. **Caracterização dos serviços de irradiação industrial operantes no estado do Rio de Janeiro.** 2017. 5 f. Monografia (Especialização) - Curso de Curso Superior de Tecnologia em Radiologia, Universidade do Grande Rio (Unigranrio), Duque de Caxias - Rj, 2017. Disponível em:
<https://pdfs.semanticscholar.org/f79d/9529f17f218d568b99126bf955db7da24cf1.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022

OLIVA, José de Jesús Rivero; SOUSA, Fernando Nuno Carneiro de. **Segurança Radiológica de Aceleradores Lineares de Grande Porte.** 2010. 9 f. Curso de Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em:



<https://docplayer.com.br/11765871-Seguranca-radiologica-de-aceleradores-lineares-de-grande-porte.html>. Acesso em: 11 jun. 2022.

YANG, L., YE, Z., LEE, C.-G., YANG, S., & PENG, R. **A two-phase preventive maintenance policy considering imperfect repair and postponed replacement.** European Journal of Operational Research. 2018.