INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Revisão e otimização do sistema de proteção radiológica de um acelerador de
elétrons usado em cura de tintas e vernizes em filmes poliméricos**

DENISE APARECIDA DA SILVA RIOS

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Janete C. G. Gaburo Carneiro**

**São Paulo
2019**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Revisão e otimização do sistema de proteção radiológica de um acelerador de
elétrons usado em cura de tintas e vernizes em filmes poliméricos**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

DENISE APARECIDA DA SILVA RIOS

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Janete C. G. Gaburo
Carneiro**

**São Paulo
2019**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

SILVA RIOS, D. A. d. ***Revisão e otimização do sistema de proteção radiológica de um acelerador de elétrons usado em cura de tintas e vernizes em filmes poliméricos.*** 2019. 131 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva Rios, Denise Aparecida da
Revisão e otimização do sistema de proteção radiológica de
um acelerador de elétrons usado em cura de tintas e vernizes
em filmes poliméricos / Denise Aparecida da Silva Rios;
orientadora Janete Cristina Gonçalves Gaburo Carneiro. -- São
Paulo, 2019.

131 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Proteção radiológica. 2. Otimização. 3. Exposição
ocupacional. 4. Acelerador de elétrons autoblandado. I. Gaburo
Carneiro, Janete Cristina Gonçalves, orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Ao meu marido Paulo, companheiro de vida e de sonhos.

À minha mãe, *in memoriam*, exemplo maior de dedicação e superação.

Aos meus filhos, fonte inesgotável de amor e alegria.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Janete Cristina Gonçalves Gaburo Carneiro, pela orientação, confiança, dedicação e cuja disponibilidade possibilitou a conclusão deste trabalho;

Ao Dr. Gian Maria Agostino Angelo Sordi, cujos ensinamentos e colaborações foram imprescindíveis durante todo o desenvolvimento desta dissertação;

À Antilhas Embalagens Flexíveis Ltda. em especial ao seu Diretor Presidente Valter Marques Baptista cujo profissionalismo e preocupação com a segurança de seus funcionários permitiram a realização deste trabalho;

À Cyclobras Industria Comercio e Serviços Laboratoriais Ltda. pelo apoio prestado;

Às empresas Valfilm – MG Ind. de Embalagens Ltda e Descartável Embalagens Ltda. que empregam aceleradores de elétrons autoblindados em seus processos produtivos e também apoiaram este projeto;

Ao Prof. Dr. Vitor Vivolo e Profa. Dra. Linda V. Caldas, pelas sugestões de aprimoramento;

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN-SP pela oportunidade de realização deste trabalho;

Ao Serviço de Radioproteção do IPEN e todos os seus servidores que direta ou indiretamente colaboraram para a concretização deste trabalho.

À Ana Paula Rios pelo carinho com que acompanhou essa jornada.

Nada na vida deve ser temido,
somente compreendido. Agora é hora
de compreender mais para temer
menos.

Marie Skłodowska Curie

RESUMO

RIOS, D. A. S. **Revisão e otimização do sistema de proteção radiológica de um acelerador de elétrons usado em cura de tinta e vernizes em filmes poliméricos**. 2019. 131 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica sugere uma reflexão estruturada para a realização da otimização da proteção radiológica. Neste contexto, propõe-se revisar o Plano de Proteção Radiológica de uma instalação que utiliza um acelerador de elétrons autoblindado do tipo cortina na cura de tintas e vernizes em substratos poliméricos. Para este tipo de aplicação, o acelerador necessita estar acoplado a uma impressora flexográfica onde a cura é realizada por radiação com feixe de elétrons. O trabalho avalia o controle eletrônico de segurança do equipamento, as probabilidades de falha e antevê as situações mais prováveis de emergência. Por meio de medições da taxa de dose no entorno do acelerador em regime de operação normal e análise dos registros dosimétricos da instalação, avaliou-se a dose dos trabalhadores, a classificação das áreas da instalação e a aderência às normas nacionais e internacionais. Além disso, foram realizadas duas simulações de acidentes que poderiam acarretar exposição potencial aos indivíduos e suas consequências. Concluiu-se que no período analisado nenhum trabalhador recebeu dose superior aos limites anuais para indivíduos do público e que o equipamento é intrinsecamente seguro em consequência das baixas probabilidades de ocorrência de falhas e das pequenas doses decorrentes delas. Em função dos resultados, sugere-se a reclassificação da área onde funciona o acelerador de supervisionada para área livre e a substituição do monitoramento individual pelo de área. A construção das árvores analíticas, ferramentas de otimização, evidenciou a relevância dos treinamentos periódicos específicos de proteção radiológica para os trabalhadores e indicou a necessidade de incluir as brigadas de incêndio como medida eficiente para tratar de acidentes neste tipo de equipamento. Por fim, as estimativas de falha no sistema de segurança consideradas nulas e as doses obtidas demonstraram a conformidade aos requisitos de proteção radiológica e obediência às normas nacionais e internacionais.

Palavras-chave: Proteção Radiológica, otimização, exposição ocupacional, exposição ocupacional.

ABSTRACT

RIOS, D. A. S. **Radiological protection system revision and optimization of an electron accelerator for ink and varnish curing in polymeric films.** 2019. 131 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

The International Commission on Radiation Protection suggests a structured reflection for the realization of the radiological protection optimization programs. In this context, this project aims to review the Radiological Protection Plan of a facility that uses a self-shielded electron accelerator, curtain-type, to cure inks and varnishes on polymeric substrates. For this type of application, the accelerator needs to be coupled to a flexographic printer line where the electron beam curing process is performed. The work includes evaluating the equipment safety electronic control, estimating the failure probabilities, and predicting the most likely emergency situations involving this kind of accelerator. By measuring the dose rate at selected points around the accelerator under normal operation and evaluating the facility dosimetric records, allowed evaluation of the occupational dose worker, the classification of the facility areas and the adherence to national and international standards. In addition, there were simulated two accident which could lead to potential exposure to individuals, as well as their consequences. It was concluded that during the analyzed period, no worker received a dose higher than the annual limit for the public individuals. The present study also support that this equipment is intrinsically safe as a result of the small probability of failure and the low resulting doses. Based on the results, the supervised area should be reclassified as a free area where the accelerator operates and the individual dosimetry should be replaced by area dosimetry. The construction of analytical trees, used as optimization tools, highlights the relevance of specific periodic radiological protection training for occupationally exposed individuals and public individuals, including the fire brigades, as an efficient measure in case of accidents in this type of equipment. Finally, the safety system failure estimates considered zero and the doses obtained proved compliance with the radiological protection requirements and with national and international standards.

Keywords: Radiation Protection, optimization, occupation exposure, self-shielded electron accelerator.

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1 – Limites de doses anuais.....	24
Tabela 2 – Representação de secagem de tinta tradicional com formação de filme de menor espessura causada pela perda dos solventes.....	35
Tabela 3 – Descrição dos pontos P1 a P6 de coleta de dados.....	51
Tabela 4 – Descrição dos pontos P7 a P13 de coleta de dados.....	53
Tabela 5 – Descrição dos pontos P14 a P14sb	57
Tabela 6 – Medições da taxa de dose da radiação de fundo nos pontos P1 a P14	61
Tabela 7 – Medições da taxa de dose nos pontos P1 a P14, com o acelerador operando a 110 kV e corrente de 100 mA.....	62
Tabela 8 – Medições obtidas da taxa de dose nos pontos P1 a P14, com o acelerador operando a 110 kV e corrente de 200 mA.....	63
Tabela 9 – Medições da taxa de dose nos pontos P1 a P14, com o acelerador operando a 110 kV e corrente de 300 mA	64
Tabela 10 – Comparação das taxas de dose mínima, máxima e média nos pontos P1 a P14, com o acelerador operando a 110 kV e com correntes estabelecidas em 100, 200 e 300 mA	65
Tabela 11 – Comparação das taxas de dose com o acelerador funcionando com tensão de 110 kV e correntes estabelecidas em 100, 200 e 300 mA.....	66
Tabela 12 – Diferença percentual entre os valores da taxa de dose média e a taxa de dose da radiação de fundo média dos pontos P1 a P9	67
Tabela 13 - Diferença percentual entre os valores da taxa de dose média e a taxa de dose da radiação de fundo média dos pontos P10 a P14 sb.....	68
Tabela 14 – Diferença percentual entre os valores da taxa de dose média e a taxa de dose da radiação de fundo para cada corrente utilizada.....	69
Tabela 15 – Características dos raios X detectados na fenda de entrada de produto em função da corrente de feixe para energia de 110 keV...	79

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 – Acelerador tipo cortina autoblindado, marca ESI modelo EZ Cure DF	16
Figura 2 – Esquema de operação de um acelerador tipo cortina.....	17
Figura 3 – Representação esquemática de secagem de tinta tradicional com formação de filme de menor espessura em consequência da perda dos solventes	34
Figura 4 – Esquema comparativo entre os processos de cura de tinta por feixe de elétrons e radiação ultravioleta	37
Figura 5 – Planta de nível da parte da instalação ilustrando as 03 impressoras, o espaço de armazenagem e o acelerador (5).....	41
Figura 6 – Escadas de acesso ao acelerador	42
Figura 7 – Posição de operação e dos circuitos de segurança e alta tensão do acelerador.	42
Figura 8 – Sinalização das escadas de acesso à área supervisionada	43
Figura 9 – Área supervisionada da instalação	44
Figura 10 – Placa de sinalização das portas de acesso à área supervisionada	44
Figura 11 – Planta de nível com a localização dos dosímetros de área.	45
Figura 12 – Localização dos dosímetros de área.....	46
Figura 13 – Localização do dosímetro de área	46
Figura 14 – Esquema de entrada e saída do produto com localização das sondas Geiger-Muller do sistema de segurança	47
Figura 15 – Localização dos medidores Geiger-Muller no corpo do acelerador	48
Figura 16 – Placa do circuito dos medidores Geiger-Muller.....	48
Figura 17– Esquema de sonda Geiger-Muller do sistema de segurança, com indicação da distância de posicionamento da fonte de aferição	49
Figura 18 – Localização dos pontos P1 a P6 de coleta de dados.....	50
Figura 19 – Localização dos pontos P7 a P11 de coleta de dados.....	52
Figura 20 – Localização dos pontos P12 e P13 de coleta de dados.....	52
Figura 21 - Localização da blindagem extra na máquina.....	56

Figura 22 – Local de onde foi retirada a blindagem extra e blindagem retirada	56
Figura 23 – Componentes de apreciação de um programa de Proteção Radiológica	58
Figura 24 – Teste do circuito de segurança do acelerador com fonte radioativa de Cs - 137.....	70
Figura 25 – Indicação da posição do IOE, do operador da empilhadeira e o local da perfuração da blindagem no primeiro cenário de acidente	71
Figura 26 – Representação esquemática do primeiro cenário de acidente simulado com as posições dos envolvidos em relação à fonte	72
Figura 27 – Indicação da posição do IOE e do local de perfuração da blindagem no segundo cenário de acidente.....	75
Figura 28 – Representação esquemática do segundo cenário de acidente simulado com a posição do IOE.....	76
Figura 29 – Posicionamento do identificador de radionuclídeos para obtenção dos espectros de raios X na fenda de entrada.....	78
Figura 30 – Tela de travamento do sistema indicando o resultado dos testes de controle e segurança do acelerador com os grupos testados.....	80
Figura 31 – Diagrama de teste dos componentes do grupo de alta tensão com os componentes do sistema de segurança do acelerador de elétrons destacados em vermelho	81
Figura 32 – Árvore de falhas para exposição potencial com três eventos iniciadores, os quais podem levar à exposição acidental de pessoas no acelerador de elétrons	85
Figura 33 – Desenvolvimento do primeiro evento iniciador da árvore de falhas - circuito de segurança adulterado de maneira a possibilitar a liberação do feixe de elétrons	86
Figura 34 – Desenvolvimento do segundo evento iniciador da árvore de falhas - pessoa coloca parte do corpo em uma das fendas de entrada ou de saída de produto com o acelerador ligado	88
Figura 35 – Desenvolvimento do terceiro evento iniciador da árvore de falhas - blindagem avariada de maneira a permitir escape de radiação não detectável pelo do circuito de segurança	90

Figura 36 – Árvore porfiriana positiva para obtenção de um programa de proteção radiológica adequado e efetivo para um acelerador de elétrons autoblindado de baixa energia.	92
Figura 37 – Componentes para avaliação do controle do radiológico dos IOE...	94
Figura 38 – Componentes para avaliação da qualificação dos IOE.....	95
Figura 39 – Componentes para avaliação do treinamento dos IOE.....	97
Figura 40 – Compilação das respostas dos IOE às questões referentes à localização do acelerador de elétrons na instalação e reconhecimento do acelerador em operação	98
Figura 41 – Compilação das respostas dos IOE às questões referentes à localização da área supervisionada e frequência de acesso	99
Figura 42 – Compilação das respostas dos IOE às questões referentes ao uso e guarda dos dosímetros individuais	99
Figura 43 – Compilação das respostas dos IOE referentes às questões de ter presenciado situação anormal e saber identificar situações de risco no acelerador de elétrons	100
Figura 44 – Compilação das respostas dos IOE às questões referentes ao desligamento do acelerador de elétrons em caso de emergência e participação em treinamentos	101
Figura 45 – Componentes para avaliação dos medidores portáteis	102
Figura 46 – Componentes para avaliação dos dosímetros	103
Figura 47 – Componentes para avaliação do controle radiológico dos indivíduos do público.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS

Abaixo do Nível de Registro (ANR)

Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA)

Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA)

Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR)

Comissão Internacional de Medidas e Unidades de Radiação (CIUR)

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)

Compostos Orgânicos Voláteis (COV)

Conselho Nacional de Proteção Radiológica e Medidas dos Estados Unidos (CNPR)

Contador Geiger-Muller (GM)

Controlador Lógico Programável (CLP)

Dosímetro de Luminescência Opticamente Estimulada (OSLD)

Dosímetro Termoluminescente (TLD)

Electron Beam (EB)

Equipamento de Proteção Individual (EPI)

Feixe de Elétrons (FE)

Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE)

National Institute of Standards and Technology (NIST)

Plano de Proteção Radiológica (PPR)

Serviço de Proteção Radiológica (SPR)

Radiação Ultravioleta (UV)

Temperatura Ambiente (T_{amb})

Umidade Relativa do Ar (UR)

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Descrição da máquina e sua utilidade – considerações gerais	15
1.2 Finalidades e objetivos	19
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	20
2.1 Proteção radiológica e segurança laboral.....	20
2.2 Monitoramento radiológico	24
2.3 Níveis de referência.....	26
2.3.1 Nível de registro	26
2.3.2 Nível de Investigação	26
2.3.3 Nível de Intervenção	26
2.3.4 Níveis de ação	26
2.4 Classificação das áreas de trabalho.....	27
2.5 Principais grandezas radiológicas e unidades	28
2.5.1 Exposição e taxa de exposição	28
2.5.2 Dose absorvida e taxa de dose absorvida	29
2.5.3 Dose equivalente	29
2.5.4 Dose efetiva	29
2.5.5 Dose coletiva	30
2.6 Radiação ionizante produzida no acelerador de elétrons autoblindado	30
2.7 Descrição do acelerador de elétrons, categoria I	31
2.8 Processos de secagem e cura de tintas e vernizes	32
2.8.1 Secagem tradicional	33
2.8.2 O processo de cura por radiação ultravioleta	35
2.8.3 O processo de cura por feixe de elétrons	36
2.9 Otimização da proteção radiológica	38
2.9.1 Procedimento de otimização da proteção radiológica aplicado à operação	38

2.9.2	Apreciação de um sistema de proteção radiológica por meio da técnica da árvore porfiriana	38
3	METODOLOGIA	41
3.1	Localização e descrição do acelerador	41
3.2	Classificação das áreas da instalação	43
3.3	Avaliação do sistema de segurança do acelerador	47
3.4	Descrição dos 13 pontos de coleta de dados	49
3.5	Avaliação e controle radiológico	53
3.5.1	Monitoramento de área - do local de trabalho	54
3.5.2	Monitoramento individual	55
3.6	Avaliação da blindagem	55
3.7	Otimização da proteção radiológica	57
3.8	Situações de exposição potencial e suas consequências	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Monitoramento do local de trabalho	59
4.2	Verificação da taxa de dose nos pontos P1 a P14	60
4.3	Teste do circuito de segurança	69
4.4	Análise das situações de exposição potencial e suas consequências	70
4.4.1	Cenário 1 - Colisão da empilhadeira contra a blindagem	70
4.4.2	Cenário 2 - Peça contundente danifica a blindagem do acelerador	75
4.5	Verificação de escape de raios X por meio das fendas de entrada e saída de produto	77
4.6	Avaliação da blindagem extra	79
4.7	Estudo do circuito de segurança do acelerador	80
4.8	Estimativa da probabilidade de falha no sistema de segurança do acelerador	82
4.9	Avaliação da proteção radiológica no caso de exposições potenciais	84
5.0	Revisão do plano de proteção radiológica e otimização	91
5	CONCLUSÕES	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	LISTA DE ANEXOS	115

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição da máquina e sua utilidade – considerações gerais

Os aceleradores de elétrons estão entre as principais fontes industriais de radiação ionizantes sendo, para taxas de dose elevadas, os mais amplamente utilizados ao redor do mundo [1]. Neles, os elétrons são gerados por efeito termoelétrico e acelerados no vácuo em um campo elétrico de intensidade elevada. Os elétrons adquirem energia cinética e o feixe resultante é usado para irradiar diretamente o produto ou para atingir um alvo e gerar raios X, que são usados para o mesmo fim. A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) classifica esses equipamentos, geradores de radiação, em duas categorias [1]:

- Categoria I - Compreende as unidades de irradiação que são integralmente blindadas e possuem travas de segurança que impedem a exposição do indivíduo;
- Categoria II - Compreende os equipamentos que necessitam permanecer em salas blindadas, inacessíveis durante a operação por causa de um sistema de controle de entrada.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) por sua vez, classifica no grupo 7 as instalações que utilizam aceleradores de partículas ou quaisquer outros aparelhos geradores de raios X e no subgrupo 7B os equipamentos geradores de radiação ionizante que produzam feixe com energia maior que 100 keV e menor ou igual a 600 keV [2], como é o caso das indústrias que utilizam este tipo de equipamento na cura de tintas para revestimentos e embalagens. Neste tipo de aplicação, são utilizados aceleradores com tensão entre 80 e 180 kV, pois a energia necessária para a cura de tintas em embalagens é da ordem de 100 keV [3].

Na indústria flexográfica, o acelerador necessita estar acoplado a impressoras que trabalham com velocidades grandes e onde a cura deve ser feita simultaneamente em toda largura do filme que pode variar de 0,80 a 1,40 m. Para atender a essas necessidades o acelerador de elétrons autoblindado, tipo cortina, Categoria I, é o mais indicado por aliar grande potência, pequena energia e maior largura do feixe.

No Brasil existem nove instalações que operam um total de 14 aceleradores de elétrons autoblindados de energia menor que 500 keV, sendo que 8 dessas máquinas encontram-se no estado de São Paulo.

Estes aceleradores autoblindados são fabricados de acordo com normas internacionais de segurança, em particular a “Radiation safety of gamma, electron and x ray irradiation facilities, Specific Safety Guide n° SSG-8” [1], de modo que as diretrizes básicas de segurança operacional do sistema de controle desses equipamentos são as mesmas.

Para o presente estudo foi escolhida uma instalação representativa das condições de operação segura para este tipo de equipamento, utilizado para a cura de tintas e vernizes aplicados em substratos poliméricos.

O acelerador objeto deste trabalho, representado na Figura 1, é fabricado pela Energy Science Inc. – ESI, modelo EZ Cure DF e opera com tensão máxima de aceleração de 110 kV e corrente de feixe de 500 mA [4].

Figura 1 – Acelerador tipo cortina autoblindado, marca ESI modelo EZ Cure DF

Fonte: ENERGY SCIENCES INC., 2011 [4].

De acordo com os parâmetros sugeridos pelo Conselho Nacional de Proteção Radiológica e Medidas dos Estados Unidos (CNPR), esse acelerador pode ser classificado segundo sua tecnologia de aceleração e sua aplicação rotineira como sendo de alta tensão com transformador de núcleo isolado de processamento por irradiação com elétrons [5].

Neste tipo de acelerador, os elétrons são produzidos por efeito termiônico no filamento que funciona como catodo. As grades de controle e extração formam o feixe que é atraído pela janela de cobre que funciona como anodo e está ligada à fonte de alta tensão. Esta janela é vazada e sobre ela é fixada uma folha fina de

titânio com cerca de 10 μm de espessura, que ao mesmo tempo mantém o canhão de elétrons sob vácuo de aproximadamente 3 μTorr e permite a passagem dos elétrons sem perda considerável de energia [6].

O feixe extenso e contínuo, assemelhado a uma cortina, é obtido pela associação em paralelo de diversos filamentos, 18 no caso estudado. O produto a ser curado é irradiado ao passar no espaço entre a folha de titânio e o absorvedor do feixe, que é um trocador de calor refrigerado a água, que absorve não só os elétrons que atravessam o produto irradiado, mas também boa parte dos raios X produzidos [6].

Na Figura 2 é apresentado o esquema elétrico do canhão de elétrons e uma vista tridimensional da montagem dos vários filamentos paralelos que compõem um acelerador do tipo cortina [7].

Figura 2 – Esquema de operação de um acelerador tipo cortina

Fonte: RPC TECHNOLOGIES, 1998 [7].

Existe uma demanda tanto por parte do governo quanto dos usuários finais por processos industriais que diminuam os impactos ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva. A reavaliação dos processos produtivos considerando os aspectos ambientais auxiliará as empresas gráficas na busca de uma maior participação nos mercados nacional e internacional, tornando-as aptas a competir e ampliar o volume de produtos gráficos elaborados dentro dos princípios do desenvolvimento sustentável [8].

A indústria de embalagens possui uma forte necessidade de adequar-se, pois ainda que não seja a atividade mais poluidora da cadeia produtiva recai sobre ela uma parcela apreciável da percepção de culpa pelos danos ambientais. Os consumidores estão tornando-se cada vez mais conscientes de que o consumo de produtos e serviços afetam o suprimento de recursos naturais e a qualidade do meio ambiente. Esta conscientização leva cada vez mais o consumidor comum a ter maior preocupação com a preservação da natureza e consequentemente a exigir medidas mais eficazes neste sentido [9].

A embalagem constitui uma barreira entre o produto e o ambiente. O processo de aplicação e de cura da tinta em uma embalagem constitui uma importante etapa de sua industrialização, pois define tanto a aparência do produto final quanto algumas de suas características de resistência física e química, influenciando seu nível de aceitação no mercado.

A maioria dos processos existentes emprega tintas e vernizes que necessitam ser diluídos em solventes agressivos aos trabalhadores e ao meio ambiente. Existe uma tendência crescente nesse ramo da indústria em diminuir as emissões de produtos poluentes no ambiente. Para tanto, são utilizados sistemas de recuperação de solventes pelos quais os efluentes gasosos emitidos são tratados com o intuito de permitir sua reutilização. Conforme a variedade de solventes utilizados o seu tratamento é feito por meio da incineração, o que torna o processo dispendioso e sem benefícios industriais, além de aumentar a emissão de gases de efeito estufa.

A utilização de tintas baseadas em água reduz o uso de solventes residuais, porém ainda demanda espaço, tempo e energia térmica para secagem. A cura por radiação ultravioleta (UV) é rápida, mas apresenta limitações relativas à cor e à espessura do revestimento além de envolver o emprego de fotoiniciadores, que são compostos químicos necessários para iniciar o processo de polimerização, que permanecem no filme curado [10,11].

Isso faz com que a tecnologia de cura por feixe de elétrons (FE) seja bastante competitiva, pois além de reduzir ainda mais a emissão de componentes orgânicos voláteis economiza energia, possibilita uma taxa de produção mais elevada e melhora as propriedades do revestimento obtido. Além disso, não apresenta dificuldades relativas à cor e à espessura do revestimento e dispensa o uso de fotoiniciadores [10].

1.2 Finalidades e objetivos

Este trabalho tem como finalidades:

1. Otimizar, em caso de necessidade, a exposição de trabalhadores em linhas de cura de tintas e vernizes curáveis por FE de aceleradores autoblindados;
2. Revisar o plano de proteção radiológica (PPR) de uma instalação radiativa, grupo 7, subgrupo 7B conforme classificação pela CNEN;
3. Determinar a lógica mais conveniente de segurança para o sistema de controle eletrônico de aceleradores autoblindados, classificação categoria I pela AIEA;
4. Antever as situações mais prováveis de emergência envolvendo este tipo de acelerador.

Para alcançar as finalidades elencadas, deverão ser conseguidos os seguintes objetivos que via de regra seguirão em ordem cronológica a menos dos casos onde possam ser realizados concomitantemente:

- a) Avaliar a exposição laboral dos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE) e demais trabalhadores por meio da determinação da exposição nas áreas da instalação estudada;
- b) Estudar o plano de radioproteção da instalação radiativa;
- c) Analisar situações de exposição potencial e suas possíveis consequências;
- d) Verificar a aderência da operação de aceleradores autoblindados às normas nacionais e internacionais vigentes que regem sua fabricação, licenciamento e operação;
- e) Estudar eventuais causas de falhas no sistema de controle eletrônico de segurança desse tipo de acelerador autoblindado;
- f) Propor modificações ou atualizações, se necessário, no plano genérico de radioproteção da instalação examinada.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Proteção radiológica e segurança laboral

A finalidade da proteção radiológica é proporcionar um padrão apropriado de proteção aos seres humanos em práticas que fazem uso das radiações ionizantes sem limitar indevidamente o benefício prático proporcionado pela exposição à radiação. O principal objetivo da proteção radiológica no ambiente laboral é obter e manter um ambiente de trabalho aceitavelmente seguro e saudável evitando a exposição, prevenindo ou reduzindo a possibilidade de exposições potenciais e atenuando as consequências de acidentes e incidentes [12].

Para a realização de uma prática, ou fontes associadas a essa prática, devem ser consideradas todas as ações e etapas envolvidas desde o projeto, construção, comissionamento, operação, manutenção até o descomissionamento da instalação. O cumprimento dessas etapas visa garantir que os princípios básicos de proteção radiológica sejam alcançados [13, 14].

O estabelecimento de um sistema e de uma cultura de segurança na instalação que inclua sua estrutura, organização, prática, habilidades, treinamento e conhecimento promove a consciência necessária para a execução das rotinas, o que é importante para o estabelecimento de um nível adequado de proteção.

As recomendações de segurança para aceleradores de elétrons são estabelecidas pela AIEA [1], porém a publicação não inclui aceleradores autoblindados em seu escopo pelo fato de não haver registro de acidentes radiológicos com este tipo de equipamento.

A proteção radiológica à pessoa envolve dois grupos distintos de indivíduos: a proteção ao IOE, definido como todo indivíduo cuja atividade profissional envolva radiações ionizantes ou material radioativo e a proteção ao indivíduo do público, grupo de indivíduos que não está diretamente envolvido em atividades que envolvam radiação ionizante, mas que podem vir a sofrer as consequências delas em caso de vazamento de radiação por meio da blindagem ou pela liberação de material radioativo no ambiente. Entre estes, considera-se a pessoa representativa, o conjunto homogêneo nos hábitos e costumes de pessoas que poderão vir a receber a maior dose de radiação em virtude daquela atividade [15].

A CNEN define exposição como o ato ou condição de estar sujeito à radiação ionizante [16]. A Publicação 21 da AIEA, por sua vez, define exposição laboral como todas as exposições de trabalhadores ocorridas durante seu trabalho, com exceção das exposições excluídas das normas vigentes e as exposições de práticas ou fontes consideradas isentas por estas normas [17].

Do ponto de vista da proteção ao trabalhador, a exposição laboral [12] pode ser dividida em:

- Exposição normal - exposição decorrente de prática autorizada, planejada ou não, mas que são oriundas de eventos com probabilidade de ocorrência entre 10^{-2} a 10^{-1} por ano e cujas doses não ultrapassem os limites anuais.
- Exposição potencial - exposição não pretendida para qual existe uma probabilidade de ocorrência que pode ser estimada, mas não pode ser prognosticada em detalhes. Esta probabilidade deve ser inferior a 10^{-2} por ano. Este conceito tem como base o fato de que nem todas as exposições ocorrem de acordo com as previsões. O equipamento pode falhar e pode haver desvios dos procedimentos operacionais planejados que causam acidentes. Estes eventos podem ser previstos e sua probabilidade de ocorrência pode ser estimada, mas eles não podem ser preditos em detalhes [18].

Os aceleradores de elétrons autoblindados enquadram-se no caso onde qualquer exposição potencial somente afetaria indivíduos que também estão ocupacionalmente sujeitos a exposições normais em decorrência de seu trabalho ou indivíduos do público. O número de indivíduos afetados nesse caso seria pequeno e o único detrimento envolvido é o risco à saúde das pessoas diretamente expostas [18].

A avaliação de exposições potenciais com propósito de planejar ou julgar medidas de proteção é usualmente baseada na elaboração de cenários para representar a sequência de eventos que levam às exposições, na determinação das probabilidades de cada uma dessas sequências, na determinação da dose resultante, na avaliação do detrimento associado àquela dose, na comparação dos resultados com algum critério de aceitabilidade e otimização da proteção radiológica [18].

Existem três meios para controle e proteção à exposição: tempo, distância e blindagem.

a. Tempo: A dose acumulada por uma pessoa numa área sujeita a determinada taxa de dose é proporcional ao tempo que ela permanece nessa área [19]. Portanto pode-se prevenir o acúmulo de dose desnecessária, reduzindo-se o tempo de permanência nas proximidades de uma fonte de radiação.

b. Distância: Para uma fonte puntiforme de radiação o fluxo, grandeza definida como energia por unidade de tempo por unidade de área, é inversamente proporcional ao inverso do quadrado da distância. Logo, quanto mais afastado de uma fonte puntiforme, menor a dose recebida. Um estudo recente na área de radiologia convencional e mamografia mostra que mesmo no caso de fontes extensas o aumento da distância diminui a dose de radiação recebida [20].

c. Blindagem: É norma de proteção radiológica que as instalações radiativas e nucleares sejam, na medida do possível, autoblindadas. O uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI) só é permitido como um complemento quando não é possível uma instalação completamente autoblindada [15].

A AIEA [21] estabelece que os padrões de proteção e segurança devem ser baseados em dez princípios:

1. Responsabilidade pela segurança: A principal responsável pela segurança deve ser a pessoa ou organização responsável pelas instalações e atividades que dão origem a riscos de radiação;

2. Papel do governo: Um quadro jurídico e governamental eficaz para a segurança, incluindo um órgão regulador independente, deve ser estabelecido e sustentado;

3. Liderança e gestão de segurança: A liderança efetiva e a gestão para a segurança devem ser estabelecidas e sustentadas em organizações interessadas e instalações e atividades que dão origem aos riscos de radiação;

4. Justificação de instalações e atividades: As instalações e atividades que dão origem a riscos de radiação devem produzir benefícios;

5. Otimização da proteção: A proteção deve ser otimizada para fornecer o mais alto nível de segurança que possa ser razoavelmente alcançado;

6. Limitação de riscos para indivíduos: As medidas para controlar os riscos de radiação devem garantir que nenhum indivíduo esteja sujeito a um risco inaceitável de danos;

7. Proteção das gerações presentes e futuras: Pessoas e meio ambiente, presente e futuro, devem ser protegidos contra riscos da radiação;

8. Prevenção de acidentes: Todos os esforços práticos devem ser feitos para prevenir e mitigar a acidentes nucleares ou radiológicos;

9. Prontidão e resposta de emergência: Devem ser tomadas providências para a preparação e a resposta em caso de emergência para incidentes nucleares ou radiológicos;

10. Ações de proteção para reduzir os riscos de radiação existentes ou não regulamentados devem ser justificadas e otimizadas.

A CNEN [13], por sua vez, estabelece que as práticas devem seguir três requisitos básicos de PR, justificação, limitação de dose e otimização, requisitos estes que estão contemplados nos princípios 4, 5, 6 e 10 da AIEA [21].

1. Princípio da Justificação: Nenhuma prática ou fonte associada a essa prática será aceita pela CNEN, a não ser que a prática produza benefícios para os indivíduos expostos ou para a sociedade suficientes para compensar o detrimento correspondente, tendo-se em conta fatores sociais e econômicos, assim como outros fatores pertinentes.

2. Otimização: Em relação às exposições causadas por uma determinada fonte associada a uma prática, salvo no caso das exposições médicas, a proteção radiológica deve ser otimizada de forma que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições mantenham-se tão baixas quanto possa ser razoavelmente exequível, tendo em conta os fatores econômicos e sociais. Nesse processo de otimização, deve ser observado que as doses nos indivíduos decorrentes de exposição à fonte devem estar sujeitas às restrições de dose relacionadas a essa fonte.

3. Limitação de dose individual: A exposição normal dos indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, causadas pela possível combinação de exposições originadas por práticas autorizadas, excedam o limite de dose especificado na Tabela 1 salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela CNEN. Esses limites de dose não se aplicam às exposições médicas.

Tabela 1 – Limites de doses anuais

Grandeza	Órgão	IOE	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv ^[a]	1 mSv ^[b]
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv ^[a]	15 mSv
	Pele ^[c]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

[a] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

[b] Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos não exceda a 1 mSv por ano.

[c] Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada.

Fonte: COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2014 [13].

Os valores de dose efetiva se aplicam à soma das doses efetivas, causadas por exposições externas, com as doses efetivas comprometidas (integradas em 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para crianças), causadas por incorporações ocorridas no mesmo ano.

2.2 Monitoramento radiológico

De acordo com a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR), cabe aos grupos gerenciais das instalações que realizam as operações causadoras de exposições o planejamento e a implementação das medidas para controle satisfatório das exposições laborais. A instalação deve ter um PPR que inclua os métodos que serão utilizados para controlar as exposições, a designação das áreas controladas e supervisionadas, as regras que deverão ser seguidas pelos IOE, as disposições sobre os monitoramentos dos trabalhadores e do local de trabalho, as responsabilidades locais e as necessidades de treinamento [22, 23].

O monitoramento é uma técnica de proteção radiológica que consiste na medição de grandezas e parâmetros para fins de controle ou de avaliação da exposição à radiação, incluindo a interpretação dos resultados e tem por finalidade avaliar o controle das exposições externas e internas do indivíduo [21, 23].

Um programa de monitoramento deve ser projetado com base em avaliação radiológica prévia tendo em conta as exigências regulatórias, ter objetivos e projeto

claramente definidos e registrados, incluir bases para interpretação dos resultados em função dos objetivos da proteção e deve ser revisado regularmente com o propósito de garantir sua adequação [21].

Na publicação 75 a CIPR recomenda dividir o programa de monitoramento em diferentes tipos [22]. Num primeiro nível, de acordo com seus objetivos, em:

a) Monitoramento de rotina: De natureza confirmatória, relacionado com a operação contínua e rotineira da instalação, sustenta o programa de monitoramento. É idealizado para demonstrar que as condições de trabalho e as doses individuais permanecem satisfatórias e atender as normas regulatórias. Seus resultados devem ser usados como entrada ao reavaliar a demarcação das áreas designadas;

b) Monitoramento relacionado com a tarefa: É aplicado a tarefas específicas, fornece dados para o gerenciamento da operação e dá suporte para ações de otimização;

c) Monitoramento especial: De natureza investigativa, é idealizado para fornecer dados para elucidar qualquer problema quando não há informações para que se tenha controle adequado da situação e definir procedimentos futuros.

Num segundo nível, os tipos de monitoramento podem ser subdivididos de acordo com sua localização:

a) Monitoramento do local de trabalho: Compreende medições realizadas no ambiente de trabalho e se subdivide em monitoramento da radiação externa, de contaminação de superfície e contaminação do ar;

b) Monitoramento individual: Compreende a realização de medições por equipamentos utilizados pelos trabalhadores ou medições de material radioativo sobre ou dentro de seu corpo, bem como a interpretação dessas medições. Este monitoramento pode ser para exposição externa, de contaminação de pele e de roupas e para contaminação interna.

O monitoramento do local de trabalho possui caráter preventivo, pois pode ser implementado antes que o trabalhador venha a receber a dose, enquanto o monitoramento individual possui caráter confirmatório, pois confirma as doses previstas pelo monitoramento do local de trabalho. Para ambos, se aplicam os três tipos de monitoramentos: de rotina, relacionados com a tarefa e especial [24].

2.3 Níveis de referência

Nível de referência é um valor de radiação pré-determinado a partir do qual é mandatório que seja tomada uma ação ou decisão pré-determinada por parte da PR. Os níveis de referência sugeridos pela CIPR são nível de registro, nível de investigação, nível de intervenção e nível de ação [22].

2.3.1 Nível de registro

Valor de dose, ou grandeza a ela relacionada, obtido em um programa de monitoramento, cuja magnitude seja relevante para justificar o seu registro. O nível de registro para monitoramento individual mensal de IOE é de 0,10 mSv para dose efetiva [13, 25].

2.3.2 Nível de Investigação

Nível de referência que, quando atingido ou excedido, torna necessária a avaliação das causas e consequências dos fatos que levaram à detecção deste nível, bem como a proposição de ações corretivas necessárias. O nível de investigação para monitoramento individual de IOE deve ser, para dose efetiva, 6 mSv por ano ou 1 mSv em qualquer mês. Para o cristalino é de 6 mSv por ano ou 1 mSv em qualquer mês [13, 25].

2.3.3 Nível de Intervenção

Nível de dose evitável, que leva à implementação de uma ação remediadora ou protetora específica, em uma situação de emergência ou de exposição crônica [13].

2.3.4 Níveis de ação

Valores de taxa de dose ou de concentração de atividade, estabelecidos com base em modelo de exposição realista da situação, acima dos quais devem ser adotadas ações protetoras ou remediadoras em situações de emergência ou de exposição crônica, de modo que sua adoção implique em certeza da observância dos níveis de intervenção correspondentes [13].

2.4 Classificação das áreas de trabalho

A delimitação de tipos de locais de trabalho simplifica e torna mais eficaz o controle das exposições laborais. Para fins de gerenciamento da PR, os titulares devem designar as áreas de trabalho com radiação ou material radioativo em áreas controladas e áreas supervisionadas conforme apropriado, sendo que no caso de não haver risco de contaminação por material radioativo a demarcação pode ser feita em termos da taxa de dose em seus contornos [13, 25].

Uma área deve ser classificada como área controlada quando for necessária a adoção de medidas específicas de proteção e segurança para garantir que as exposições ocupacionais normais estejam em conformidade com os requisitos de otimização e limitação de dose, bem como prevenir ou reduzir a magnitude das exposições potenciais [13].

Nessas áreas o acesso deve ser restrito a trabalhadores treinados, pois as condições normais de trabalho exigem que sigam procedimentos e práticas bem estabelecidos, elaborados especificamente com o propósito de controlar as exposições. Sua designação é necessária quando os controles de engenharia são insuficientes para proporcionar o grau apropriado de proteção e deve ser determinada por avaliação radiológica prévia, estar baseada no valor provável das exposições normais e na probabilidade de exposições acidentais. Estes dispositivos, geralmente introduzidos na fase de projeto têm por propósito separar fisicamente a fonte do trabalhador [13, 22, 25].

Uma área deve ser classificada como área supervisionada quando, embora não requeira a adoção de medidas específicas de proteção e segurança, devem ser feitas reavaliações regulares das condições de exposições ocupacionais, com o objetivo de determinar se a classificação continua adequada. As áreas assim designadas devem ser delimitadas e sinalizadas em seus acessos, de tal maneira que qualquer trabalhador possa adentrá-la com formalidade mínima e as revisões devem considerar a necessidade de adoção de programas de monitoramento rotineiro de área e dos indivíduos que nela trabalham [13, 25].

Fora das áreas designadas como controladas ou supervisionadas, a taxa de dose e o risco de contaminação devem ser baixos o suficiente para assegurar que, em condições normais, o nível de proteção para aqueles que trabalham no local seja comparável com o nível de proteção necessário para as exposições do público.

Tais áreas são denominadas áreas livres, do ponto de vista de proteção radiológica ocupacional [25].

2.5 Principais grandezas radiológicas e unidades

O estudo das grandezas e unidades utilizadas em proteção radiológica é importante para a quantificação dos efeitos da radiação, na determinação e avaliação dos riscos e benefícios advindos de sua utilização, para a otimização dos procedimentos operacionais e para a tomada de decisões. Para a medição da radiação utilizam-se tanto propriedades do campo de radiação quanto efeitos e subprodutos de sua interação com a matéria.

As grandezas e unidades mais relevantes à proteção radiológica e à segurança são definidas pela Comissão Internacional de Medidas e Unidades de Radiação (CIUR), pela CIPR e adotadas pela CNEN.

Neste trabalho as principais grandezas e unidades utilizadas são:

2.5.1 Exposição e taxa de exposição

Exposição (X) é o quociente entre o valor absoluto da carga total (dQ) de íons de mesmo sinal produzidos no ar, quando todos os elétrons e pósitrons liberados ou criados pelos fótons incidentes em uma massa (dm) de ar seco são totalmente freados nessa massa de ar [26]. Essa grandeza só é definida para radiação eletromagnética no ar e sua unidade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Coulomb por quilograma ($C.kg^{-1}$).

$$X = dQ/dm \quad (1)$$

Taxa de exposição ($\dot{X}$) é o quociente entre um incremento de exposição dX durante o intervalo de tempo dt [26]. A unidade no SI é o coulomb por quilograma por segundo ($C.kg^{-1}.s^{-1}$).

$$\dot{X} = dX/dt \quad (2)$$

2.5.2 Dose absorvida e taxa de dose absorvida

Dose absorvida (D) é o quociente entre a energia média ($d\mathcal{E}$) transmitida pela radiação ionizante a um volume de massa dm . A unidade no SI é o joule por quilograma (J.kg^{-1}) que nesse caso é tratado como uma unidade especial e recebe o nome de gray (Gy) [26].

$$D = d\mathcal{E}/dm \quad (3)$$

Taxa de dose absorvida ($\dot{D}$) é o quociente entre um incremento da dose absorvida D durante o intervalo de tempo dt . Sua unidade é o joule por quilograma por segundo ($\text{J.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) ou gray por segundo (Gy.s^{-1}).

$$\dot{D} = dD/dt \quad (4)$$

2.5.3 Dose equivalente

A dose equivalente (H_T), expressa pelo produto entre a dose absorvida média D no órgão ou tecido e um fator adimensional de ponderação da radiação w_r , mede a equivalência entre doses de diferentes radiações que produzem o mesmo efeito biológico. Sua unidade no SI é o joule por quilograma (J.kg^{-1}), denominada sievert (Sv). Para os elétrons e raios X produzidos durante a operação do acelerador, o fator de ponderação é igual a um [19, 27].

$$H_T = D \cdot w_r \quad (5)$$

2.5.4 Dose efetiva

A dose efetiva (E) é a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos, onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão e w_T é um fator adimensional de ponderação de órgão ou tecido. A unidade no SI é o joule por quilograma (J.kg^{-1}), denominada sievert (Sv) [27].

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (6)$$

2.5.5 Dose coletiva

A dose coletiva (S) é a expressão da dose efetiva total recebida por uma população ou um grupo de pessoas, definida como o produto do número de indivíduos expostos a uma fonte de radiação ionizante, pelo valor médio da distribuição de dose efetiva desses indivíduos. Sua unidade é expressa em pessoa-sievert (pessoa.Sv) [13, 27].

$$S = \sum_i N_i \cdot E_i \quad (7)$$

Onde, E_i é a dose efetiva média para um subgrupo i e N_i é o número de indivíduos neste subgrupo.

2.6 Radiação ionizante produzida no acelerador de elétrons autoblindado

A função do acelerador é gerar um FE para ser utilizado no processamento de produtos. Para isso, o feixe atravessa filmes plásticos da ordem de 20 μm de espessura e é totalmente blindado pelo aparador de feixe constituído de aço [6].

Do ponto de vista da PR, o FE em si não constitui problema, já que, ainda que haja qualquer escape, a sua energia máxima de 110 keV fornece um alcance da ordem de 0,16 m no ar [28].

No entanto quando os elétrons do feixe atravessam o aparador podem excitar os átomos que o constitui. Ao retornarem ao estado fundamental liberam raios X característicos que recebem este nome por terem energia relacionada com o material que o gerou. No caso do aço, formado majoritariamente por ferro e carbono, esses raios X têm energia máxima de 7 keV [29].

Ao atravessar o aparador, os elétrons do feixe também são freados e ao reduzir sua energia cinética e mudar sua direção de propagação, emitem a diferença de energia sofrida na forma de radiação eletromagnética, conhecida como raios X de frenamento ou raios X de *bremsstrahlung*. Os raios X assim gerados espalham-se em todas as direções e é a maior preocupação do ponto de vista da segurança radiológica da instalação [19].

2.7 Descrição do acelerador de elétrons, categoria I

O objeto desse estudo é um acelerador de elétrons autoblindado, do tipo cortina marca ESI modelo EZ Cure DF com largura de feixe de 1,2 m, com energia máxima de aceleração de 110 keV. De acordo com a AIEA [1] esse tipo de gerador de radiação, totalmente blindado com travas segurança, é classificado como categoria I e na norma da CNEN está classificado no grupo 7 e subgrupo 7B [2].

Na indústria, esse tipo de equipamento é utilizado para promover mudanças em sua estrutura física ou iniciar reações químicas. O FE gerado pelo acelerador estudado é utilizado para cura de tintas e vernizes sobre substratos poliméricos e celulósicos diversos.

Trata-se de uma máquina robusta que transfere energia cinética aos elétrons gerados no catodo, acelerando-os por meio de alta tensão dentro da câmara de aceleração a uma pressão da ordem de 10^{-6} Torr em direção ao aparador do feixe, por onde passa o filme com a tinta a ser curada no final de uma linha de impressão.

A alta tensão necessária ao processo é gerada por um transformador de núcleo isolado, retificada por circuitos eletrônicos e pode ser selecionada entre 70 e 110 kV. A corrente do feixe é controlada pela velocidade de impressão e pode chegar a 500 mA, corrente esta que permite o processo de cura por radiação até 400 m/min. Nesse caso, sendo U a tensão em volts e i a corrente em amperes, pode-se calcular a potência máxima, P_{max} , do feixe, em watt, por meio da relação:

$$P = U \cdot i \quad (8)$$

$$P_{max} = U_{max} \cdot i_{max}$$

$$P_{max} = 110 \cdot 10^3 \cdot 0,500$$

$$P_{max} = 55 \text{ kW}$$

O sistema de segurança é descrito no manual de instalação do equipamento, onde são detalhados os dispositivos e os níveis de atuação que garantem a operação segura do acelerador [6].

Para ser operado no ambiente industrial a que se destina o equipamento foi projetado para garantir um nível de exposição de no máximo de 2 $\mu\text{Sv/h}$ em sua superfície [6].

A blindagem do equipamento retém tanto o FE quanto os raios X gerados dentro da câmara de vácuo e da área de processamento do material. Três medidores do tipo Contador Geiger-Muller (GM) são instalados no entorno da blindagem e ligados ao sistema eletrônico de controle para detectar qualquer ocorrência como, por exemplo, constatação da falta de sinal de radiação natural de fundo ou detecção de nível de radiação acima do nível de segurança pré-estabelecido.

Além disso, toda operação do acelerador é feita por meio de Controlador Lógico Programável (CLP) que monitora as funções de segurança do equipamento.

Um sistema de travas automáticas constituído por pares de interruptores eletromecânicos normalmente abertos só permite a emissão de feixe quando toda a blindagem está corretamente fechada.

Os medidores de radiação e os sensores de fim de curso conferem dois graus de redundância e garantem diversidade de princípio de funcionamento para certificação do correto fechamento da blindagem da câmara de irradiação.

2.8 Processos de secagem e cura de tintas e vernizes

De modo geral, a tinta é uma composição pigmentada que pode se apresentar na forma líquida, sólida ou pastosa e é composta por uma parte sólida que formará uma película comumente chamada de filme aderente à superfície a ser pintada que recebe o nome de substrato.

Os componentes voláteis da mistura podem ser água, solventes orgânicos e aditivos em menores quantidades que os outros componentes. Os aditivos conferem propriedades importantes ao revestimento, dado que a função da pintura é proporcionar acabamento, resistência e proteção ao substrato [8].

Quando a formação do filme sobre o substrato ocorre pela simples evaporação dos solventes do sistema, provocando a emissão deles na atmosfera,

o processo é denominado secagem. O processo de cura, por sua vez, envolve reações químicas irreversíveis entre os componentes da tinta, produzindo a polimerização. É comum que na formação do filme sobre o substrato, os dois processos de secagem e cura ocorram como consequência da composição da tinta.

2.8.1 Secagem tradicional

Segundo Yamasaki [11], os componentes básicos de uma tinta convencional que utiliza solventes orgânicos em sua formulação, também chamadas "tintas base solvente", são os seguintes:

Pigmentos: Substâncias sólidas, minerais ou orgânicas, utilizadas para conferir cor, opacidade da cobertura. É o componente mais importante de uma tinta;

Solventes: Veículo volátil, utilizado para reduzir a viscosidade e dissolver as resinas, possibilitando sua aplicação sobre o substrato. É responsável pela emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) na atmosfera, o que é danoso tanto ao meio ambiente quanto aos trabalhadores que os inalam;

Resina: Parte não volátil da tinta, responsável pela ligação dos pigmentos e adesão da tinta ao substrato, permanecendo nele após a secagem;

Aditivos: Usados para conferir propriedades específicas à tinta, tais como brilho, resistência à abrasão, seleção do coeficiente de fricção.

Após a aplicação da tinta líquida ocorre a secagem pela evaporação dos solventes por aquecimento em estufa, por infravermelho ou mesmo em temperatura ambiente (T_{amb}). Durante esse processo não há mudanças químicas no polímero formado, o qual está dissolvido nos solventes e endurece pela evaporação.

Após a secagem, permanecem aderidos ao substrato as resinas, os aditivos e os pigmentos de maneira que, no final do processo, a espessura do filme formado é menor que o da tinta aplicada em consequência da liberação dos solventes. Vale ressaltar que essa perda de solvente ocorre desde a aplicação da tinta causando variação na viscosidade, o que dificulta o processo de aplicação.

Uma tinta é considerada tradicional quando a formação do filme sobre o substrato ocorre apenas pelo processo de secagem. A Figura 3 representa esquematicamente o processo de secagem tradicional. A mistura de pigmentos,

aditivos e resina estão representados em azul, os solventes pelas setas circulares vermelhas e os COV pelas setas ascendentes.

Figura 3 – Representação esquemática de secagem de tinta tradicional com formação de filme de menor espessura em consequência da perda dos solventes

Fonte: MARTINHO, 2010 [30].

Os solventes emitidos são materiais altamente refinados que têm função temporária na tinta tradicional. Na maioria dos casos, após a secagem, esses solventes são tratados por oxidação térmica antes de sua liberação na atmosfera, o que além de aumentar o gasto energético deste tipo de tinta, produz CO_2 , um gás de efeito estufa, o que torna essa tecnologia incompatível com um futuro sustentável [31].

As tintas hidrossolúveis, comumente chamadas de "tintas base água" são modificadas para utilizar água como solvente. À primeira vista pode parecer uma opção à tinta base solvente, porém como a secagem também é feita pelo processo tradicional, têm a grande desvantagem de requerer uma quantidade de energia muito elevada para retirar a água da fórmula, por sua baixa volatilidade, muito inferior à dos solventes orgânicos. Na Tabela 2 são apresentadas as opções de solventes e a demanda de energia necessária para utilização em revestimentos secos [31].

Tabela 2 – Representação de secagem de tinta tradicional com formação de filme de menor espessura causada pela perda dos solventes

Solvente	Calor de vaporização (Cal/g_{solvente})	Energia para secagem (J/g_{solvente})
Heptano	88	740
Tolueno	76	555
Água	540	3390

Fonte: LAPIN, S. C. 2008 [31].

2.8.2 O processo de cura por radiação ultravioleta

A cura de materiais poliméricos por radiação é a conversão de um líquido reativo em um sólido, por meio de reações de polimerização e reticulação entre as espécies presentes, promovidas pela interação do sistema químico com a radiação incidente [32].

O processo de polimerização é o nome dado ao conjunto de reações químicas intermoleculares segundo o qual as moléculas dos monômeros presentes na tinta unem-se umas às outras por meio de reações covalentes, ligações caracterizadas pelo compartilhamento de pares de elétrons causando atração mútua entre as moléculas.

O termo reticulação é usado em cadeias poliméricas lineares ou ramificadas interligadas formando polímeros tridimensionais com elevada massa molar.

O processo por cura de radiação pode ser realizado por meio da exposição à UV emitida por lâmpadas especiais ou por FE produzido por aceleradores de elétrons industriais [33]. Ambos os processos utilizam nas formulações componentes básicos como monômeros, resinas ou oligômeros, pigmentos e aditivos sendo estes, na maioria dos casos os mesmos utilizados nas tintas convencionais.

Os monômeros são compostos que funcionam como diluentes para diminuir a viscosidade da formulação, aumentam a velocidade de cura e a densidade de ligações cruzadas. Já os oligômeros são responsáveis pelas propriedades do filme curado como aderência ao substrato e flexibilidade. Todos esses componentes não são voláteis e permanecem no filme curado,

minimizando o uso de solventes e evitando a inalação destes pelos trabalhadores [32].

No caso da cura por UV, além desses componentes, é necessário o uso de um fotoiniciador, pois apesar dos oligômeros e monômeros presentes na formulação serem capazes de absorver a radiação UV, sem ele a velocidade do processo para iniciar a reação polimerização é muito baixa. Na cura por FE a energia envolvida é bastante superior, sendo mais que suficiente para romper as ligações químicas e iniciar o processo [34].

O uso da radiação propicia a geração de radicais livres, espécies químicas necessárias para o início do processo de cura e reticulação, chamado inicialização. Esses radicais livres são necessários para que ocorra a propagação, que é o surgimento das espécies reativas que propiciarão a ligação entre as moléculas do polímero. Este processo ocorre até que a falta de centros reativos provoque o encerramento do processo chamado de terminação [35].

2.8.3 O processo de cura por feixe de elétrons

A tinta é líquida ao ser aplicada ao substrato. O FE transfere sua energia principalmente por colisões com os elétrons orbitais das moléculas da tinta, excitando-os ou arrancando-os, produzindo uma grande quantidade de átomos excitados, íons e elétrons secundários. A recombinação desses espécimes reativos resultará na polimerização do material irradiado, que é a dissociação com mudança para tipos moleculares mais complexos [10].

Para que esse processo se dê em todo volume da camada a ser curada, deve-se garantir que a energia dos elétrons incidentes tenha poder de penetração superior à espessura da camada de revestimento, que no caso estudado é da ordem de 5 μm de material polimérico de densidade 1 g/cm^3 aplicado sobre um substrato polimérico também de densidade 1 g/cm^3 e espessura 20 μm .

Como a capacidade de penetração do feixe de elétrons é controlada pela tensão de aceleração aplicada, feixes de energia abaixo de 150 kV são capazes de realizar com folga a cura em toda espessura do filme a ser processado [10, 31].

Na cura por FE devem ser observados os seguintes parâmetros: a dose de radiação que determina o grau de cura da tinta, a taxa de dose que influencia

a velocidade de produção e a energia dos elétrons que determina o poder de penetração do feixe.

Como as reações de polimerização induzidas pelo FE dependem apenas do número de radicais livres formados no produto irradiado, dispensando o uso de fotoiniciadores, o resultado é um produto mais puro em comparação com a tecnologia UV. Esse processo, no entanto, deve ocorrer em atmosfera inerte para evitar a formação de radicais que propiciam a formação de cadeias curtas impedindo a correta cura da tinta.

A maior diferença entre a radiação UV e FE está na inicialização. Em virtude de sua energia, os elétrons do FE conseguem penetrar na camada de tinta e interagir diretamente com os átomos dos monômeros e oligômeros, produzindo os radicais livres por ionização. A radiação UV por transportar menor energia precisa interagir com os fotoiniciadores para gerar os radicais livres por meio de uma reação fotoquímica. Nos dois processos, após a geração de radicais livres, o fenômeno se propaga até a terminação [35], como é mostrado no esquema comparativo da Figura 4.

Figura 4 – Esquema comparativo entre os processos de cura de tinta por feixe de elétrons e radiação ultravioleta

Fonte: autor da dissertação.

2.9 Otimização da proteção radiológica

De acordo com a CIPR, a otimização da proteção radiológica é basicamente uma estrutura de reflexão sobre o equilíbrio dos recursos aplicados à proteção, utilizando uma abordagem estruturada para identificar problemas, comparar e escolher opções de proteção, a partir de métodos que variam do bom senso a técnicas quantitativas complexas [18].

2.9.1 Procedimento de otimização da proteção radiológica aplicado à operação

Dentre os fatores que podem ser avaliados em um procedimento de otimização da proteção aplicado às operações, pode-se citar [12]:

- Efeito da blindagem na redução da taxa de dose nos locais a serem ocupados por pessoas
 - Frequência ou extensão do monitoramento para o controle das doses
 - Procedimentos gerenciais
 - Programa de treinamento.

2.9.2 Apreciação de um sistema de proteção radiológica por meio da técnica da árvore porfiriana

Em relação às exposições causadas por uma determinada fonte associada a uma prática, a proteção radiológica deve ser otimizada de forma que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições mantenham-se tão baixas quanto possa ser razoavelmente exequível, tendo em conta os fatores econômicos e sociais [13].

A CNEN estabelece que no PPR de qualquer instalação seja apresentada a demonstração da otimização da proteção radiológica ou de sua dispensa. A menos que a CNEN solicite especificamente, a demonstração de otimização de um sistema de proteção radiológica é dispensável quando o projeto do sistema assegura que, em condições normais de operação, se cumpram três condições [13]:

- a) A dose efetiva anual média para qualquer IOE não exceda 1 mSv;
- b) A dose efetiva anual média para indivíduos do público não ultrapasse 10 μ Sv;
- c) A dose efetiva coletiva anual não supere o valor de 1 pessoa.Sv.

Mesmo no caso de uma instalação ser dispensada da demonstração da otimização radiológica, a apreciação sistemática do sistema de proteção radiológica se faz necessária para comprovação dessas condições no decorrer do tempo. A CIPR estabelece que o papel básico do conceito de otimização da proteção radiológica é gerar nos responsáveis a mentalidade de questionamento “Foi feito tudo o que seria razoável para reduzir essas doses de radiação?”. Como não existe uma resposta técnica claramente definida para essa pergunta, já que ela exige a aplicação de um julgamento, a comissão considera que tanto o bom senso quanto técnicas complexas de análise de custo-benefício podem auxiliar, já que abordar o problema sistematicamente garante que os julgamentos envolvidos sejam reconhecidos [36].

Para essa abordagem a CIPR sugere a análise de situações inesperadas, mesmo aquelas onde não ocorra exposição de fato. Esse tipo de análise traz informações valiosas sobre as características da fonte e podem ser indicadores de condições de operação deterioradas [18].

Pode-se estabelecer procedimentos para apreciação sistemática de um programa de proteção radiológica visando determinar se este é realmente adequado e eficaz fazendo uso da ferramenta conhecida como árvore porfiriana [12]. A CIPR mostra exemplos de sua utilização na avaliação de exposição potencial em diversas situações práticas, incluindo aceleradores [18, 37].

A árvore porfiriana é definida como uma exposição gráfica das informações que auxiliam na condução da análise detalhada de um sistema ou programa. Ela possibilita identificar sistematicamente os caminhos possíveis desde os eventos básicos até as consequências previstas e fornece base para tomada de decisão racional. Pode ser construída como árvore positiva, quando visa uma finalidade estabelecida ou como árvore negativa, quando visa um evento indesejável ou maléfico [12].

Para a análise de risco pode-se utilizar uma árvore negativa, selecionando eventos iniciadores e desmembrando-os nas componentes necessárias para alcançá-los. Estes componentes formarão a segunda linha da árvore. Repetindo-se esse processo, constroem-se tantas linhas quantas forem necessárias para explicitar o que é necessário e suficiente para alcançar o evento iniciador [37].

A AIEA em sua publicação TEC DOC 430 [37] recomenda a utilização de símbolos com a finalidade de uniformizar o entendimento e evitar equívocos de

interpretação por parte dos profissionais. Os símbolos lógicos utilizados nessa técnica são:

Retângulo	Indica uma componente resultante ou não da combinação de eventos anteriores;
Círculo	Indica componente específico que não exige maior desenvolvimento;
Losango	Indica componente terminal que por algum motivo não foi desenvolvido;
Elipse	Indica componente condicional no qual são aplicadas restrições sobre uma porta ou saída lógica;
Acesso "e"	Indica que ocorrerá uma saída se todos os eventos de entrada ocorrerem;
Acesso "ou"	Indica que ocorrerá uma saída quando um ou mais eventos de entrada ocorrerem;
Transferência "de"	Indica transferência vinda de qualquer outra parte da árvore;
Transferência "para"	Indica transferência desta para qualquer outra parte da árvore.

Fonte: AIEA, 1987 [37].

3 METODOLOGIA

3.1 Localização e descrição do acelerador

A instalação estudada situa-se em uma empresa de embalagens localizada na cidade de Santana de Parnaíba, no estado de São Paulo e utiliza um acelerador de elétrons autoblindado de feixe largo, tipo cortina, para a cura de tintas e vernizes sobre substratos poliméricos diversos.

Arelada à produção industrial, toda a parte de impressão fica concentrada em uma área especificada da empresa. Nesse setor são utilizadas três impressoras flexográficas, sendo que apenas uma delas utiliza o processo de cura por radiação por FE. Nas outras duas utiliza-se o processo de cura térmica tradicional.

Na Figura 5 está ilustrada a localização das impressoras flexográficas indicadas como 1, 3 e 4, sendo que nesta última está acoplado o acelerador de elétrons representado pelo número 5. O número 2 é um espaço para armazenar as tintas utilizadas em todas as linhas de impressão.

Figura 5 – Planta de nível da parte da instalação ilustrando as 03 impressoras (1, 3 e 4), o espaço de armazenagem (2) e o acelerador (5)

Fonte: ANTILHAS, 2016 [38].

O conjunto fica sobre um mezanino metálico a dois metros do solo, de maneira que o acesso a ele só é possível por meio de duas escadas laterais dispostas em lados perpendiculares indicadas por setas na Figura 6.

Figura 6 – Escadas de acesso ao acelerador indicadas pelas setas vermelhas

Fonte: autor da dissertação.

A impressora 4 e o acelerador são operados a partir de uma mesa de controle localizada no solo, próximo ao limite do mezanino e indicada pela seta “a” na Figura 7. Abaixo do acelerador fica localizado o armário onde se encontram os circuitos eletrônicos de segurança e o circuito de alta tensão que alimenta o acelerador, indicados pela seta “b” na Figura 7.

Figura 7 – Posição de operação e dos circuitos de segurança e alta tensão do acelerador. A seta (a) indica a mesa de controle e a seta (b) indica o armário com os circuitos de segurança e alta tensão

Fonte: autor da dissertação.

3.2 Classificação das áreas da instalação

As áreas devem ser classificadas sempre que houver previsão de exposição ocupacional e definidas claramente no PPR da Instalação [25].

O acelerador é controlado permanentemente por um sistema eletrônico de segurança e sua blindagem e geometria impede que o trabalhador tenha exposição de corpo inteiro ou mesmo das extremidades. A supervisão de proteção radiológica classificou como área supervisionada a área no entorno da blindagem, somente quando a máquina estiver funcionando, em obediência aos requisitos da posição regulatória 3.01/004:2011 da CNEN [25].

Na Figura 8 estão indicadas as sinalizações das escadas que dão acesso à área supervisionada, delimitada na parte superior do mezanino como destacado pela linha amarela na Figura 9.

Figura 8 – Sinalização das escadas de acesso à área supervisionada

Fonte: autor da dissertação.

Figura 9 – Área supervisionada da instalação, parte superior do mezanino destacada pela linha amarela

Fonte: autor da dissertação.

Durante a operação do acelerador o acesso só é permitido aos técnicos de manutenção e às pessoas autorizadas pela direção da instalação ou pelo Serviço de Proteção Radiológica (SPR) portando dosímetros pessoais.

No verso de cada placa de sinalização das portas de entradas mostrada na Figura 10, estão fixados procedimentos de emergência a serem adotados em caso de acidente radiológico e de incêndio (ANEXO A).

Figura 10 – Placa de sinalização das portas de acesso à área supervisionada

Fonte: autor da dissertação.

Fora da área supervisionada, todas as áreas da instalação são consideradas áreas livres do ponto de vista da proteção radiológica ocupacional. Para certificar que em condições normais de operação a dose para indivíduos não ultrapasse o limite de 1 mSv/ano ou fração proporcional ao tempo de permanência [25], são fixados, na região abaixo do mezanino, três dosímetros de área.

Até 2017 eram utilizados detetores termoluminescentes (TLD) compostos de um dosímetro tipo TLD-100 fluoreto de lítio (LiF:Mg,Ti) e outro de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4\text{:Dy}$). A partir de 2018 passaram a ser utilizados dosímetros de luminescência opticamente estimulada (OSLD), composto de óxido de alumínio ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$). Na Figura 11 estão indicadas as posições dos dosímetros de área codificados como dosímetro extra D E1, D E2 e D E3, sendo:

D E1 – localizado na altura do piso do mezanino a 1,5 m da blindagem do acelerador, voltado para a posição de operação da linha de impressão;

D E2 – localizado na altura do piso do mezanino, voltado para o aparador do feixe a 1 m de distância;

D E3 – localizado na altura do piso do mezanino, a 1,5 m da blindagem, do lado oposto ao dosímetro extra 1.

Figura 11 – Planta de nível com a localização dos dosímetros de área, D E1, D E2 e D E3.

Fonte: ANTILHAS, 2016 [38].

Esses dosímetros de área estão posicionados de maneira a registrar qualquer dose advinda de falhas no sistema de segurança da máquina. Nas Figuras 12 e 13 estão indicados os locais onde os dosímetros ficam fixados na estrutura do mezanino que comporta o acelerador.

Figura 12 – Localização dos dosímetros de área, D E1 e D E2 no detalhe

Fonte: autor da dissertação.

Figura 13 – Localização do dosímetro de área, D E3 no detalhe

Fonte: autor da dissertação.

3.3 Avaliação do sistema de segurança do acelerador

De acordo com o fabricante, o acelerador só libera o FE com a blindagem completamente fechada. Nessa situação, ela é capaz de conter a radiação gerada pelo acelerador totalmente dentro da câmara de irradiação e da área de processamento do produto [6]. Esse sistema de blindagem possui apenas duas fendas para entrada e saída do produto que são suficientemente estreitas para impedir a exposição de qualquer parte do corpo diretamente ao feixe de radiação.

Próximo às fendas estão fixados medidores de radiação do tipo GM ligados ao circuito automático de segurança, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Esquema de entrada e saída do produto com localização das sondas Geiger-Muller do sistema de segurança

Fonte: ANTILHAS, 2016 [38].

Um terceiro medidor GM é fixado na carenagem do acelerador, próximo à entrada “T” da alta tensão. Na Figura 15, a, b e c, são mostradas as posições dos medidores no corpo do acelerador, respectivamente na carenagem, na fenda de entrada e na fenda de saída. Estes monitores GM, medem continuamente o nível de radiação ambiental para detectar situações anormais de exposição e desligam automaticamente a fonte de alta tensão e a corrente do feixe, caso o nível de radiação ultrapassar o valor preestabelecido de 25 $\mu\text{Sv/h}$.

Figura 15 – Localização dos medidores Geiger-Muller no corpo do acelerador, nos detalhes (a), (b) e (c)

Fonte: ANTILHAS, 2016 [38].

No caso de um ou mais medidores GM indicarem ausência de sinal, a placa do circuito indicada na Figura 16 impede a alimentação da alta tensão. Neste caso, é necessário reiniciar o circuito do monitor de radiação pressionando o botão indicado pela seta vermelha na Figura 16 para que o feixe possa ser liberado.

Figura 16 – Placa do circuito dos medidores Geiger-Muller, no detalhe o botão de reiniciar o circuito de segurança

Fonte: autor da dissertação.

Para a verificação do funcionamento das travas de segurança, entre eles o correto fechamento da blindagem, foram realizados testes de partida de máquina com a blindagem corretamente fechada, aberta e mal encaixada. A resposta do acelerador, que é apresentada na tela do painel de controle, foi conferida por meio de levantamento radiométrico realizado nessas condições.

O funcionamento dos monitores GM foi testado utilizando uma fonte de aferição de césio-137 com atividade de 8 μCi , colocada nos pontos indicados no manual [6] a 0,06 m da distância da extremidade do cilindro, como está mostrado na Figura 17.

Figura 17– Esquema de sonda Geiger-Muller do sistema de segurança, com indicação da distância de posicionamento da fonte de aferição

Fonte: ENERGY SCIENCES, INC, 2007 [6].

3.4 Descrição dos 13 pontos de coleta de dados

Na Figura 18 está indicada a localização dos pontos nomeados de P1 a P6.

Os pontos P1 e P2 que estão localizados na região abaixo do mezanino do acelerador foram escolhidos por representarem os locais onde eventuais campos de radiação provenientes de falhas no sistema de segurança do acelerador atingiriam trabalhadores que não são dosimetrados por trabalharem na região considerada como área livre.

Os pontos de P3 até P6 estão localizados na área supervisionada, na parte superior do mezanino e foram escolhidos como representativos de locais

vulneráveis no caso de vazamento de radiação ou mal dimensionamento da blindagem.

Figura 18 – Localização dos pontos P1 a P6 de coleta de dados

Fonte: autor da dissertação.

A localização desses pontos e o motivo de sua escolha estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição dos pontos P1 a P6 de coleta de dados

	Localização	Motivação
P1	Abaixo do mezanino, perpendicular ao aparador de feixe, a 1,2 m deste.	Altura média da cabeça do operador
P2	No painel controle	Altura média do tórax do operador
P3	A 0,10 m da fenda de saída do produto	Verificar escape de radiação
P4	Sobre a sonda GM da fenda de saída de produto, encostado na blindagem	Verificar o valor recebido pela sonda GM ou possível escape de radiação pela fenda
P5	Sobre o tubo acelerador na junção do T da alta tensão	Verificar a eficiência da blindagem
P6	Sobre a bomba criogênica em cima da carenagem	Verificar o valor recebido pela sonda GM ou possível escape de radiação neste ponto

Fonte: autor da dissertação.

Os pontos nomeados de P7 até P13 também foram escolhidos por serem representativos de locais vulneráveis no caso de vazamento de radiação ou dimensionamento incorreto da blindagem. Estes pontos estão localizados sobre o corpo do acelerador, do lado oposto em relação à posição do operador no painel de controle, mostrados nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Localização dos pontos P7 a P11 de coleta de dados

Fonte: autor da dissertação.

Figura 20 – Localização dos pontos P12 e P13 de coleta de dados

Fonte: autor da dissertação.

A descrição detalhada da localização desses pontos e o motivo de sua escolha estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição dos pontos P7 a P13 de coleta de dados

	Localização	Motivação
P7	Na fenda de saída do produto	Verificar escape de radiação pela fenda
P8	Abaixo do controle de entrada e saída de água	Verificar a eficiência da blindagem
P9	Abaixo do aviso de fechamento da blindagem.	Verificar a eficiência da blindagem
P10	Na lateral do tudo do acelerador, sobre o símbolo ESI	Verificar a eficiência da blindagem
P11	Sobre o painel de controle da bomba criogênica	Verificar a eficiência da blindagem
P12	Na sonda GM sobre a fenda de entrada do produto	Verificar o valor recebido pela sonda GM, ou possível escape de radiação neste ponto
P13	Na fenda de entrada do filme	Verificar escape de radiação pela fenda

Fonte: autor da dissertação.

3.5 Avaliação e controle radiológico

A avaliação e controle das condições radiológicas da área da instalação incluíram medição de grandezas relativas ao monitoramento de área dos campos externos de radiação e monitoramento individual.

Na instalação estudada o monitoramento de rotina foi realizado regularmente associado à operação contínua do acelerador, idealizado para demonstrar que as condições de trabalho, inclusive os valores das doses individuais permanecem satisfatórios em atendimento às exigências regulatórias [13, 22].

O SPR da instalação efetua e mantém todos os registros de dose obtidos nos monitoramentos de área e individual. Por decisão da direção da instalação uma cópia do último relatório de dose é fixada no gabinete de controle do acelerador para livre consulta dos funcionários.

Para a análise da adequação da designação das áreas da instalação, foram examinados os relatórios de doses anuais desde o início das operações com o acelerador em 2012.

Para a análise da exposição laboral foram tabelados e avaliados os relatórios individuais de dose e de área no período entre 2012 a 2018, de modo a montar um esquema de distribuição de doses no decorrer do tempo e analisar os impactos de eventuais mudanças na gestão da proteção radiológica da instalação.

Para a análise de situações de exposição potencial e possíveis consequências também foram realizadas medições das taxas de exposição em locais considerados estratégicos por serem passíveis de vulnerabilidade.

3.5.1 Monitoramento de área - do local de trabalho

Para o estudo do monitoramento do local de trabalho para a radiação externa foram considerados os relatórios dos levantamentos radiométricos realizados na instalação no período de 2012 a 2018. Este levantamento foi realizado mensalmente de acordo com o PPR, na área supervisionada e no local de operação que é considerada área livre.

Para a dosimetria de área foram avaliados os relatórios dos levantamentos radiométricos nos pontos indicados no ANEXO B e os relatórios dos dosímetros de área fixados nos entornos da blindagem do acelerador.

Além disso, foi realizado o monitoramento do ambiente, nos pontos P1 a P13, com uma câmara de ionização pressurizada modelo Fluke Biomedical Product modelo 451P – RYR, número de série 00000003108, devidamente calibrada. A escolha desses pontos foi feita visando compreender os locais sujeitos a qualquer campo de radiação proveniente do acelerador, seja decorrente da operação normal ou de eventual falha nos dispositivos de segurança.

Em cada ponto de medição com o detector ligado e posicionado foi considerado um minuto de espera para a estabilização das leituras. Foram realizadas 10 medições com intervalos de 10 segundos entre si, utilizando tensão máxima de 110 kV e variando a corrente do feixe de 100 a 300 mA, que são as correntes utilizadas para a cura de tinta de vernizes na instalação.

Os pontos de maior probabilidade de encontrar raios X espalhados causados pela interação dos elétrons com a blindagem são os pontos P3 e P13

conforme descrito nas Tabelas 3 e 4. Por causa das dimensões do medidor, não foi possível aproximá-lo da fenda de saída, considerou-se que a taxa de dose nas duas fendas são iguais e foram realizadas medições somente na fenda de entrada. Para isso, utilizou-se um identificador de radionuclídeos, modelo RIIDEye fabricado por Thermo Fisher Scientific, número de série 10593, capaz de detectar e construir o espectro de raios X esperado.

3.5.2 Monitoramento individual

O monitoramento individual envolveu apenas os técnicos de manutenção da instalação que realizaram no período tarefas próximas à blindagem, durante o funcionamento do acelerador, pois são os que estão sujeitos a risco de exposição potencial. Esse controle dosimétrico é realizado por meio do uso de dosímetros portados na altura do tórax do indivíduo. Esses dosímetros eram do tipo TLD até o ano de 2017 e a partir de 2018 foram substituídos por dosímetros OSLD. A leitura do dosímetro é integrada ao longo de um mês de monitoramento e emitido um relatório reportado em dose. No período de monitoramento estudado, o nível de registro era de 0,2 mSv e as leituras abaixo desse valor foram consideradas nulas.

3.6 Avaliação da blindagem

Para avaliar se a blindagem está sendo eficiente, além das medições tomadas nos diversos pontos, tentou-se ligar o acelerador de elétrons com a blindagem aberta e fechada incorretamente.

Durante uma manutenção preventiva, observou-se que na parte interna do “T” da alta tensão que alimenta o acelerador, há uma blindagem extra, facilmente removível que não consta nos manuais do equipamento. A Figura 21 mostra em (A) a localização da peça na máquina, recoberta pela carenagem e em (B), a carenagem retirada e a blindagem destacada pela seta amarela.

Figura 21 - Localização da blindagem extra na máquina, no detalhe

Fonte: autor da dissertação.

Observou-se também que a retirada dessa blindagem não altera o funcionamento do acelerador de tal maneira que mesmo sem a blindagem, foi possível liberar o feixe, o que indica que ela não está ligada ao sistema de segurança do equipamento. Na Figura 22 está indicado o local de onde foi retirada a blindagem, destacado pela seta vermelha, e a blindagem retirada.

Figura 22 – Local de onde foi retirada a blindagem extra (A) e a blindagem retirada (B)

Fonte: autor da dissertação.

Após a retirada da peça, com a carenagem aberta, foi utilizado o identificador de radionuclídeos para obtenção do espectro de emissão no local

com o acelerador funcionando a uma tensão de 110 kV e corrente de 100 mA, a uma distância de 0,5 m da peça.

Também foram obtidos dados de taxa de dose com a câmara de ionização nesse local, a 0,10 m da carenagem, enquanto o acelerador funcionava com e sem a blindagem extra. Este ponto de obtenção de medições foi chamado P14 quando foram realizadas medições de taxa de dose com o acelerador funcionando com essa blindagem e P14sb quando foram realizadas medições sem a blindagem, como mostrado na Tabela 5.

Após as tomadas de dados, a blindagem foi recolocada e foi fixado na parte interna da carenagem um dosímetro do tipo OSLD, para avaliar o impacto dessa alteração na segurança do equipamento.

Tabela 5 – Descrição dos pontos P14 a P14sb

	Localização	Motivação
P14	Na carenagem que recobre o “T” da alta tensão com blindagem	Verificar a taxa de dose ambiente no local
P14 sb	Na carenagem que recobre o “T” da alta tensão sem blindagem	Verificar se a retirada da blindagem altera a taxa de dose ambiente no local

Fonte: autor da dissertação.

3.7 Otimização da proteção radiológica

Para fazer a análise e avaliação do programa de proteção radiológica da instalação construiu-se uma árvore analítica, conhecida como árvore porfiriana [12], de modo a verificar se continua adequado, dado que a última revisão do PPR foi realizada em 2016.

Para a construção da árvore foi solicitado aos IOE que respondessem um questionário com 10 perguntas, ANEXO C, sobre segurança do acelerador de elétrons, conhecido pelos funcionários da instalação como “EB” em alusão à sigla em inglês, *Electron Beam* (EB).

Também foram avaliadas situações prováveis de exposições potenciais, suas causas e consequências, as inspeções realizadas no decorrer deste

trabalho e a revisão da documentação e assentamentos da instalação. Na Figura 23 são apresentadas componentes importantes para apreciação de um programa de proteção radiológica [37].

Figura 23 – Componentes de apreciação de um programa de Proteção Radiológica

Fonte: IAEA, 1987 [37].

3.8 Situações de exposição potencial e suas consequências

Em reunião com o departamento de segurança e higiene do trabalho foi definida a necessidade de se estabelecer o procedimento de atuação da brigada de incêndio no caso de exposição acidental à radiação.

Foram propostos dois cenários de acidentes que resultariam na pior situação possível, isto é, a exposição dos indivíduos. Para estes cenários foram avaliadas as probabilidades de ocorrência e as doses resultantes. As simulações foram realizadas na instalação e envolveram a supervisão de proteção radiológica, a Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA) e a brigada de incêndio, a qual é composta por funcionários treinados para atender as emergências internas em todas as dependências e equipamentos da empresa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Monitoramento do local de trabalho

A exposição laboral dos IOE foi avaliada a partir da consulta aos levantamentos radiométricos realizados mensalmente na instalação e aos relatórios de dose acumulada no período compreendido entre abril de 2012 a junho de 2018. Esses dosímetros que eram do tipo TLD foram substituídos a partir de janeiro de 2018 por dosímetros do tipo OSLD. Os IOE utilizaram os dosímetros na região do tórax, sobre a vestimenta.

Os relatórios analisados incluem também os dosímetros de área que registram as taxas de dose ambiente na região limítrofe entre a área supervisionada e a área livre.

Os resultados apresentados no ANEXO D mostram que no período analisado apenas dois IOE receberam dose de 0,20 mSv que corresponde ao nível de registro vigente no período considerado. A dose acumulada para os que receberam dose abaixo do nível de registro foi considerada dose zero.

A análise dos relatórios de dose acumulada também indicou que as áreas classificadas como área livre na instalação estão sujeitas apenas à radiação natural de fundo.

A consulta aos relatórios dos levantamentos radiométricos apontou que em todos os meses do período analisado a taxa de dose na área supervisionada foi compatível com a taxa de dose obtida no painel de controle, localizado em local considerado área livre. Todos os relatórios indicaram valores compatíveis com a radiação natural de fundo.

O controle de acesso à área classificada como supervisionada foi considerado adequado para garantir que somente pessoas autorizadas tenham acesso aos lugares com probabilidade de ocorrer exposições.

A periodicidade indicada no PPR da instalação [38] para a realização dos levantamentos radiométricos foi considerada satisfatória para garantir que as condições de exposição ocupacionais permaneçam adequadas.

4.2 Verificação da taxa de dose nos pontos P1 a P14

O valor da taxa de dose decorrente da radiação de fundo local foi determinado com a câmara de ionização modelo Fluke Biomedical Product 451 - RYR, número de série 00000003108 calibrada, que foi posicionada em cada um dos pontos P1 a P14 com o acelerador de elétrons desligado. Aguardou-se o tempo de estabilização da leitura e foram realizadas 10 medições com intervalo de 10 segundos entre elas.

Para a determinação das incertezas apresentadas em todas as tabelas, foram seguidas as regras do “Guia para a expressão de incerteza de medição” [39]. A incerteza apresentada em cada leitura foi obtida através da soma quadrática da incerteza do tipo A, o desvio padrão da média com a incerteza do tipo B, decorrente da combinação da incerteza de 10% da leitura do instrumento conforme consta no manual [40] com a incerteza expandida de 4% proveniente do certificado de calibração da câmara de ionização, apresentado no ANEXO E.

As medições foram tomadas em diversas datas e em condições diversas de T_{amb} e umidade relativa do ar (UR) para abranger eventuais flutuações advindas das condições meteorológicas.

A Tabela 6 apresenta o valor mínimo (Tx_{min}) e o valor máximo (Tx_{max}) da taxa de dose da radiação de fundo, obtidos com o acelerador desligado, para cada conjunto de 10 dados e a taxa de dose média (Tx_{md}) calculada em cada um dos pontos.

Tabela 6 – Medições da taxa de dose da radiação de fundo nos pontos P1 a P14

Ponto	$T_{x_{min}} (\mu\text{Sv/h})$	$T_{x_{max}} (\mu\text{Sv/h})$	$T_{x_{md}} (\mu\text{Sv/h})$
P1	$0,18 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,04$
P2	$0,18 \pm 0,03$	$0,31 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,04$
P3	$0,16 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,04$
P4	$0,18 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,04$
P5	$0,18 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,04$
P6	$0,18 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,04$
P7	$0,18 \pm 0,03$	$0,29 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,04$
P8	$0,17 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,04$
P9	$0,18 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,06$	$0,23 \pm 0,04$
P10	$0,18 \pm 0,03$	$0,29 \pm 0,06$	$0,24 \pm 0,04$
P11	$0,17 \pm 0,04$	$0,39 \pm 0,09$	$0,24 \pm 0,05$
P12	$0,18 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,03$
P13	$0,17 \pm 0,03$	$0,31 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,04$
P14	$0,19 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,04$
P14 sb	$0,19 \pm 0,05$	$0,46 \pm 0,12$	$0,25 \pm 0,07$

Fonte: autor da dissertação.

A taxa de dose decorrente da radiação de fundo encontrada ficou no intervalo entre $(0,16 \pm 0,03) \mu\text{Sv/h}$ e $(0,46 \pm 0,12) \mu\text{Sv/h}$ e sua média foi $(0,23 \pm 0,03) \mu\text{Sv/h}$. O valor obtido é importante para comparar com os valores das taxas de dose obtidas nos mesmos pontos durante a operação do acelerador de elétrons.

Nas mesmas datas e mesmas condições de T_{amb} e UR, foram feitas medições da taxa de dose nos pontos P1 a P14 com o acelerador ligado a uma tensão constante de 110 kV, que é a tensão utilizada rotineiramente na instalação, e variando a corrente de 100, 200 e 300 mA.

As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam o valor mínimo ($T_{x_{min}}$), o valor máximo ($T_{x_{max}}$) da taxa de dose obtida para cada conjunto de 10 dados e a taxa de dose média ($T_{x_{md}}$) com as respectivas incertezas.

Tabela 7 – Medições da taxa de dose nos pontos P1 a P14, com o acelerador operando a 110 kV e corrente de 100 mA

Ponto	$T_{x_{min}}$ ($\mu\text{Sv/h}$)	$T_{x_{max}}$ ($\mu\text{Sv/h}$)	$T_{x_{md}}$ ($\mu\text{Sv/h}$)
P1	$0,16 \pm 0,03$	$0,42 \pm 0,08$	$0,23 \pm 0,05$
P2	$0,14 \pm 0,03$	$0,32 \pm 0,07$	$0,22 \pm 0,05$
P3	$0,09 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,08$	$0,22 \pm 0,05$
P4	$0,15 \pm 0,03$	$0,34 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,04$
P5	$0,16 \pm 0,03$	$0,33 \pm 0,07$	$0,22 \pm 0,05$
P6	$0,13 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,04$
P7	$0,08 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,04$
P8	$0,08 \pm 0,02$	$0,39 \pm 0,09$	$0,22 \pm 0,05$
P9	$0,13 \pm 0,03$	$0,46 \pm 0,10$	$0,23 \pm 0,05$
P10	$0,20 \pm 0,04$	$0,28 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,05$
P11	$0,13 \pm 0,03$	$0,38 \pm 0,08$	$0,21 \pm 0,04$
P12	$0,16 \pm 0,03$	$0,31 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,04$
P13	$0,11 \pm 0,02$	$0,28 \pm 0,05$	$0,22 \pm 0,04$
P14	$0,16 \pm 0,04$	$0,45 \pm 0,12$	$0,22 \pm 0,06$
P14 sb	$0,16 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,04$

Fonte: autor da dissertação.

Com o acelerador funcionando a uma corrente de 100 mA, a taxa de dose encontrada no entorno do acelerador ficou no intervalo entre $(0,08 \pm 0,02) \mu\text{Sv/h}$ e $(0,46 \pm 0,10) \mu\text{Sv/h}$ e sua média foi $(0,22 \pm 0,04) \mu\text{Sv/h}$.

Tabela 8 – Medições obtidas da taxa de dose nos pontos P1 a P14, com o acelerador operando a 110 kV e corrente de 200 mA

Ponto	Tx_{min} ($\mu Sv/h$)	Tx_{max} ($\mu Sv/h$)	Tx_{md} ($\mu Sv/h$)
P1	$0,16 \pm 0,04$	$0,38 \pm 0,09$	$0,25 \pm 0,06$
P2	$0,16 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,04$
P3	$0,19 \pm 0,05$	$0,46 \pm 0,11$	$0,28 \pm 0,07$
P4	$0,14 \pm 0,03$	$0,41 \pm 0,08$	$0,26 \pm 0,05$
P5	$0,17 \pm 0,04$	$0,42 \pm 0,09$	$0,25 \pm 0,05$
P6	$0,18 \pm 0,04$	$0,36 \pm 0,08$	$0,26 \pm 0,06$
P7	$0,18 \pm 0,04$	$0,37 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,05$
P8	$0,18 \pm 0,04$	$0,45 \pm 0,11$	$0,26 \pm 0,06$
P9	$0,18 \pm 0,05$	$0,43 \pm 0,11$	$0,27 \pm 0,07$
P10	$0,18 \pm 0,04$	$0,37 \pm 0,08$	$0,25 \pm 0,05$
P11	$0,17 \pm 0,03$	$0,36 \pm 0,07$	$0,25 \pm 0,05$
P12	$0,17 \pm 0,03$	$0,35 \pm 0,06$	$0,26 \pm 0,05$
P13	$0,17 \pm 0,04$	$0,40 \pm 0,10$	$0,27 \pm 0,07$
P14	$0,19 \pm 0,05$	$0,40 \pm 0,10$	$0,24 \pm 0,06$
P14 sb	$0,19 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,03$

Fonte: autor da dissertação.

Para o acelerador funcionando com corrente de 200 mA a taxa de dose encontrada no entorno do acelerador ficou no intervalo entre $(0,14 \pm 0,03) \mu Sv/h$ e $(0,46 \pm 0,11) \mu Sv/h$ e sua média foi $(0,26 \pm 0,05) \mu Sv/h$.

Tabela 9 – Medições da taxa de dose nos pontos P1 a P14, com o acelerador operando a 110 kV e corrente de 300 mA

Ponto	T _{xmin} (μSv/h)	T _{xmax} (μSv/h)	T _{xmd} (μSv/h)
P1	0,15 ± 0,04	0,42 ± 0,11	0,24 ± 0,07
P2	0,16 ± 0,03	0,37 ± 0,07	0,23 ± 0,05
P3	0,15 ± 0,04	0,42 ± 0,11	0,26 ± 0,07
P4	0,14 ± 0,04	0,55 ± 0,16	0,25 ± 0,07
P5	0,15 ± 0,04	0,40 ± 0,10	0,25 ± 0,06
P6	0,15 ± 0,04	0,50 ± 0,13	0,25 ± 0,07
P7	0,17 ± 0,04	0,38 ± 0,10	0,26 ± 0,07
P8	0,15 ± 0,03	0,40 ± 0,09	0,26 ± 0,06
P9	0,15 ± 0,03	0,42 ± 0,09	0,25 ± 0,06
P10	0,15 ± 0,03	0,39 ± 0,09	0,24 ± 0,05
P11	0,18 ± 0,03	0,40 ± 0,08	0,25 ± 0,05
P12	0,17 ± 0,03	0,38 ± 0,07	0,26 ± 0,05
P13	0,17 ± 0,04	0,46 ± 0,12	0,28 ± 0,07
P14	0,18 ± 0,03	0,28 ± 0,05	0,23 ± 0,04
P14 sb	0,17 ± 0,03	0,29 ± 0,04	0,23 ± 0,04

Fonte: autor da dissertação.

Para o acelerador funcionando com corrente de 300 mA a taxa de dose encontrada no entorno do acelerador ficou no intervalo entre (0,14 ± 0,04) e (0,55 ± 0,16) μSv/h e sua média foi (0,25 ± 0,05) μSv/h.

Considerando que não se observou diferenças significativas entre as taxas de dose obtidas com o acelerador funcionando com a variação de corrente utilizada, comparou-se os resultados obtidos de taxa de dose em cada um dos pontos.

Para isso, o valor mínimo (T_{xmin}) e o valor máximo (T_{xmax}) da taxa de dose obtidos para cada um dos pontos considerando o acelerador operando a tensão 100, 200 e 300 mA, foram compilados e foram calculadas a taxa de dose média (T_{xmd}) com as respectivas incertezas. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação das taxas de dose mínima, máxima e média nos pontos P1 a P14, com o acelerador operando a 110 kV e com correntes estabelecidas em 100, 200 e 300 mA

Ponto	$T_{x_{min}}$ ($\mu\text{Sv/h}$)	$T_{x_{max}}$ ($\mu\text{Sv/h}$)	$T_{x_{md}}$ ($\mu\text{Sv/h}$)
P1	$0,15 \pm 0,03$	$0,42 \pm 0,10$	$0,24 \pm 0,06$
P2	$0,14 \pm 0,03$	$0,37 \pm 0,07$	$0,22 \pm 0,04$
P3	$0,09 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,12$	$0,25 \pm 0,06$
P4	$0,14 \pm 0,03$	$0,55 \pm 0,13$	$0,24 \pm 0,06$
P5	$0,15 \pm 0,03$	$0,42 \pm 0,09$	$0,24 \pm 0,05$
P6	$0,13 \pm 0,03$	$0,50 \pm 0,11$	$0,24 \pm 0,06$
P7	$0,08 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,08$	$0,25 \pm 0,06$
P8	$0,08 \pm 0,02$	$0,45 \pm 0,11$	$0,24 \pm 0,06$
P9	$0,13 \pm 0,03$	$0,46 \pm 0,11$	$0,25 \pm 0,06$
P10	$0,20 \pm 0,04$	$0,39 \pm 0,08$	$0,24 \pm 0,05$
P11	$0,13 \pm 0,03$	$0,40 \pm 0,08$	$0,24 \pm 0,05$
P12	$0,16 \pm 0,03$	$0,38 \pm 0,07$	$0,25 \pm 0,05$
P13	$0,11 \pm 0,03$	$0,46 \pm 0,12$	$0,25 \pm 0,06$
P14	$0,16 \pm 0,03$	$0,45 \pm 0,10$	$0,23 \pm 0,05$
P14 sb	$0,16 \pm 0,03$	$0,46 \pm 0,09$	$0,23 \pm 0,05$

Fonte: autor da dissertação.

Com o acelerador funcionando a 110 kV e a corrente variando de 100 a 300 mA, a taxa de dose encontrada no entorno do acelerador ficou entre $(0,08 \pm 0,02) \mu\text{Sv/h}$ e $(0,55 \pm 0,13) \mu\text{Sv/h}$ e sua média foi $(0,24 \pm 0,05) \mu\text{Sv/h}$, que é compatível com a radiação média natural de fundo.

Na Tabela 11 é apresentada a comparação dos valores das taxas de dose mínimas ($T_{x_{min}}$), máximas ($T_{x_{max}}$) e suas médias ($T_{x_{md}}$) para cada uma das condições estudadas de funcionamento do acelerador, isto é, tensão constante de 110 kV e correntes de 100, 200 e 300 mA.

Tabela 11 – Comparação das taxas de dose com o acelerador funcionando com tensão de 110 kV e correntes estabelecidas em 100, 200 e 300 mA

Corrente (mA)	T _x _{min} (μSv/h)	T _x _{max} (μSv/h)	T _x _{md} (μSv/h)
100	0,08 ± 0,02	0,46 ± 0,09	0,22 ± 0,05
200	0,14 ± 0,03	0,46 ± 0,10	0,26 ± 0,06
300	0,14 ± 0,03	0,55 ± 0,13	0,25 ± 0,06

Fonte: autor da dissertação.

Observa-se que o menor valor medido ($0,08 \pm 0,02$) μSv/h foi obtido com o acelerador operando a 100 mA e o maior ($0,55 \pm 0,13$) mSv/h, operando a 300 mA, o que indica que a taxa de dose aumenta com a corrente, sendo compatível com o fato da taxa de dose ser proveniente dos raios X de *bremssstrahlung* produzido pelo feixe de elétrons do acelerador. Apesar disso, observou-se que os valores médios obtidos com o acelerador em operação se mantiveram próximos da taxa de radiação de fundo.

Nas Tabelas 12, 13 e 14 são apresentadas as diferenças percentuais entre os valores obtidos da taxa de dose média (T_x_{md}) e a taxa de dose média da radiação de fundo, que foi de ($0,23 \pm 0,03$) μSv/h, determinada em cada um dos pontos selecionados com o acelerador ligado nas condições estabelecidas, tensão fixa de 110 kV e corrente de 100, 200 e 300 mA.

Tabela 12 – Diferença percentual entre os valores da taxa de dose média e a taxa de dose da radiação de fundo média dos pontos P1 a P9

Ponto	Corrente (mA)	T _{xmd} (μSv/h)	Diferença (%)
P1	100	0,23 ± 0,05	0,0
	200	0,25 ± 0,06	8,7
	300	0,24 ± 0,06	4,3
P2	100	0,22 ± 0,05	-4,3
	200	0,23 ± 0,05	0,0
	300	0,23 ± 0,05	0,0
P3	100	0,22 ± 0,05	-4,3
	200	0,28 ± 0,07	21,7
	300	0,26 ± 0,07	13,0
P4	100	0,22 ± 0,04	-4,3
	200	0,26 ± 0,05	13,0
	300	0,25 ± 0,07	8,7
P5	100	0,22 ± 0,05	-4,3
	200	0,25 ± 0,05	8,7
	300	0,25 ± 0,06	8,7
P6	100	0,22 ± 0,04	-4,3
	200	0,26 ± 0,06	13,0
	300	0,25 ± 0,07	8,7
P7	100	0,22 ± 0,04	-4,3
	200	0,26 ± 0,05	13,0
	300	0,26 ± 0,07	13,0
P8	100	0,22 ± 0,05	-4,3
	200	0,26 ± 0,06	13,0
	300	0,26 ± 0,06	13,0
P9	100	0,23 ± 0,05	0,0
	200	0,27 ± 0,07	17,4
	300	0,25 ± 0,06	8,7

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 13 - Diferença percentual entre os valores da taxa de dose média e a taxa de dose da radiação de fundo média dos pontos P10 a P14 sb

Ponto	Corrente (mA)	Tx _{md} (μSv/h)	Diferença(%)
P10	100	0,22 ± 0,05	-4,3
	200	0,25 ± 0,05	8,7
	300	0,24 ± 0,05	4,3
P11	100	0,22 ± 0,04	-4,3
	200	0,25 ± 0,05	8,7
	300	0,25 ± 0,05	8,7
P12	100	0,23 ± 0,04	0,0
	200	0,26 ± 0,05	13,0
	300	0,26 ± 0,05	13,0
P13	100	0,22 ± 0,04	-4,3
	200	0,27 ± 0,07	17,4
	300	0,28 ± 0,07	21,7
P14	100	0,22 ± 0,06	-4,3
	200	0,24 ± 0,06	4,3
	300	0,23 ± 0,04	0,0
P14 sb	100	0,22 ± 0,04	-4,3
	200	0,23 ± 0,03	0,0
	300	0,23 ± 0,04	0,0

Fonte: autor da dissertação.

Observou-se que a maior diferença percentual foi de 21,7% obtida com o acelerador operando a 200 mA no ponto P3, localizado a 0,10 m da fenda de saída de produto e com o acelerador operando a 300 mA no ponto P13, localizado na fenda de entrada de produto. Ainda que se possa atribuir às condições de operação do acelerador, corresponde a um acréscimo de 0,05 μSv/h, na taxa de radiação medida, a distâncias iguais ou menores que 0,10 m da superfície acessível do acelerador. Esse aumento foi considerado como decorrência do funcionamento do acelerador.

O mesmo foi observado quando se calculou em todos os pontos a diferença percentual entre os valores obtidos da taxa de dose média (Tx_{md}) e a taxa de dose

da radiação de fundo, com o acelerador ligado a uma tensão 110 kV, variando a corrente de 100, 200 e 300 mA, conforme mostra a Tabela 14:

Tabela 14 – Diferença percentual entre os valores da taxa de dose média e a taxa de dose da radiação de fundo para cada corrente utilizada

Corrente (mA)	Tx_{md} ($\mu\text{Sv/h}$)	Diferença (%)
100	$0,22 \pm 0,05$	-4,3
200	$0,26 \pm 0,05$	13,0
300	$0,25 \pm 0,06$	8,7

Fonte: autor da dissertação.

A maior diferença percentual da taxa de dose média foi 13% acima da taxa de radiação de fundo, observada com o acelerador funcionando a 200 mA.

4.3 Teste do circuito de segurança

O acelerador possui um sistema de segurança eletrônico programado para interromper o feixe quando qualquer uma das sondas GM ligadas a ele acusar taxas de dose superiores 25 $\mu\text{Sv/h}$ ou quando apresentar contagem zero.

O teste do circuito de segurança do acelerador foi realizado aproximando-se de cada um dos GM ligados ao circuito, uma fonte de aferição de césio-137, com atividade 10 μCi , como ilustrado na Figura 24. Observou-se que o tempo para a interrupção do feixe foi sempre de 10 segundos, considerado um indicador da eficácia do sistema.

Figura 24 – Teste do circuito de segurança do acelerador com fonte radioativa de Cs - 137

Fonte: autor da dissertação.

Ao se desconectar cada uma das sondas, o que implicaria em contagem zero no detector GM do sistema de segurança, o feixe também foi interrompido. Nesta situação constatou-se um intervalo de tempo de 90 segundos até que o sistema desabilitasse o feixe.

O acelerador possui interruptores elétricos que impedem o feixe no caso da blindagem não estar na posição correta. Esse sistema foi checado e verificou-se que não é possível liberar o FE enquanto a blindagem não estiver corretamente encaixada. Também se constatou que não é possível abri-la com o acelerador ligado. A partir dessa observação, comprovou-se que não há possibilidade de exposição direta ao FE sem que seja burlado o sistema de segurança, ou no caso de ocorrência de algum incidente ou de acidente.

4.4 Análise das situações de exposição potencial e suas consequências

Foram realizadas simulações envolvendo dois cenários de situações acidentais que poderiam levar à exposição potencial de IOE e indivíduos do público visando identificar possíveis falhas de operação e as consequências radiológicas para esse tipo de evento.

4.4.1 Cenário 1 - Colisão da empilhadeira contra a blindagem

O primeiro cenário de acidente estudado foi a simulação de uma situação na qual um operador de empilhadeira perdeu o controle do veículo que se

deslocava próximo ao acelerador que estava em operação no momento, a uma tensão de 110 kV e corrente de 250 mA. Com a colisão a blindagem do equipamento foi perfurada pelo garfo longo da empilhadeira.

Em função da localização do dano, as chaves de fim de curso não foram acionadas e os medidores de radiação que asseguram a integridade do equipamento não acusaram anomalias em suas medições, sendo necessária ação externa para o desligamento do feixe.

Em decorrência da colisão, dois trabalhadores foram expostos ao campo de radiação proveniente do acelerador: um IOE que realizava inspeção de rotina a 0,50 m de distância da blindagem e o operador de empilhadeira, indivíduo do público, posicionado debaixo do piso do mezanino de aço que suporta o acelerador, a uma distância de 3 m do ponto onde a blindagem foi danificada.

A posição dos envolvidos e o local onde o garfo da empilhadeira alcançou o acelerador estão indicados na Figura 25.

Figura 25 – Indicação no detalhe da posição do IOE, do operador da empilhadeira e o local da perfuração da blindagem

Fonte: autor da dissertação.

Ao perceber o acidente, um membro da brigada de incêndio acionou o botão de emergência que desabilita o acelerador e a linha de impressão. Desde a constatação do acidente até a interrupção do feixe de elétrons, transcorreram 5 minutos.

Para a estimativa da dose considerou-se que por se tratar de um acelerador de elétrons de baixa energia, o campo de radiação pode ter duas componentes:

- a. Elétrons espalhados em baixos ângulos;
- b. Raios X também espalhados a baixos ângulos provenientes de *bremsstrahlung* do FE incidente na estrutura do acelerador, composto basicamente de aço.

Os elétrons espalhados em baixos ângulos correspondem a aproximadamente 20% do total da corrente de feixe [41] por causa da energia máxima do feixe e a composição do anteparo. Seu alcance máximo será de 0,16 m, segundo a tabela de alcance e poder de frenamento do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) [28] e, portanto, não atingiriam nenhum dos dois indivíduos envolvidos no acidente que estavam respectivamente a uma distância de 0,5 m e 3,0 m, como na representação esquemática do cenário 1, mostrada na Figura 26.

Figura 26 – Representação esquemática do primeiro cenário de acidente simulado com as posições dos envolvidos em relação à fonte

Fonte: autor da dissertação.

Para a radiação de *bremsstrahlung* a eficiência de conversão de elétrons em raios X na faixa de energia considerada pode ser calculada pela equação (9), onde

R é a eficiência de conversão, E_e é a energia do FE em keV e Z o número atômico do anteparo que se adotou como sendo o do ferro, por ser o componente de maior quantidade em massa do aço [41], assim:

$$R = 10^{-6} \cdot E_e \cdot Z \quad (9)$$

$$R = 10^{-6} \cdot 110 \cdot 26 = 0,29\%$$

O valor de R é a taxa de conversão total de partícula em radiação que escapa uniformemente em todas as direções, dada a energia do FE [41]. Para uma abordagem mais conservadora, assumiu-se que toda a radiação gerada escapou pelo orifício causado pelo garfo da empilhadeira.

Como se trata de raios X de baixa energia a taxa de equivalente de dose ambiente, $H^*(1)$, a 1 m de distância do feixe de 110 keV e 250 mA será de 6 Sv/h [41].

Aplicando a eficiência de conversão calculada em (8), a taxa de equivalente de dose ambiente proveniente dos raios X de *bremsstrahlung*, H^*B , é calculada na equação (10):

$$H^*_B(1) = 6 \cdot 0,29\% \quad (10)$$

$$H^*_B(1) = 17,4 \text{ mSv/h}$$

Como o IOE encontrava-se a uma distância de 0,50 m da perfuração na blindagem, o valor da taxa de equivalente de dose ambiente calculada, $\dot{H}_c$, será quatro vezes maior, como mostrado na equação (11):

$$H^*_c(0,5) = 4 \cdot \dot{H}_B \quad (11)$$

$$\dot{H}^*_c(0,5) = 70 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$$

Em mSv/min corresponde a:

$$\dot{H}_c^*(0,5) = 1,2 \frac{\text{mSv}}{\text{min}}$$

Considerando que o IOE permaneceu um tempo, $\Delta t = 5$ min exposto a este campo de radiação, o valor do equivalente de dose ambiente, H^* , a que foi submetido é calculado pela equação (12).

$$H_c^*(0,5) = \dot{H}_c \cdot \Delta t \quad (12)$$

$$H_c^*(0,5) = 6 \text{ mSv}$$

O operador da empilhadeira estava a cerca de 3,0 m do ponto de ruptura, conforme mostrado na Figura 26. Neste caso, o valor do equivalente de dose ambiente pode ser calculado pela equação (13):

$$H_c^*(3) = 6 \cdot \left(\frac{0,5}{3}\right)^2 \quad (13)$$

$$H_c^*(3) = 167 \mu\text{Sv}$$

Como o operador ficou blindado pela estrutura do mezanino, composta por uma chapa de aço de 5 mm de espessura, foi preciso considerar a energia máxima dos raios X de *bremsstrahlung*, que corresponde a do FE e 110 keV. A intensidade máxima ocorre a 60% deste valor [41], ou seja, 66 keV e a atenuação da radiação eletromagnética para uma espessura de 5 mm de aço corresponderá a 98,2% [42]. Então, o valor do equivalente de dose ambiente (H_{at}^*) a que ele estará exposto foi calculado pela equação (14):

$$H_{at}^*(3) = 167 \cdot 0,018 \quad (14)$$

$$H_{at}^*(3) = 3 \mu\text{Sv}$$

4.4.2 Cenário 2 - Peça contundente danifica a blindagem do acelerador

O segundo cenário de acidente estudado foi a simulação de uma situação em que um IOE realizava inspeção de rotina próximo à blindagem durante a operação da linha de impressão com o acelerador funcionando a 110 kV e 300 mA, quando um operador de guindaste, considerado indivíduo do público, perdeu o controle do veículo fazendo com que uma peça pontiaguda se chocasse contra a blindagem do acelerador, perfurando-a.

A posição do IOE envolvido e o local onde a blindagem do acelerador foi perfurada estão indicados na Figura 27.

Figura 27 – Indicação da posição do IOE e do local de perfuração da blindagem no detalhe

Fonte: autor da dissertação.

De acordo com a localização do dano o feixe espalhado estaria direcionado para cima. Assim, nem as chaves de fim de curso nem os medidores de radiação que asseguram a integridade do equipamento seriam acionadas requerendo também nesse caso ação externa para o desligamento do feixe.

Ao ser constatado o acidente um membro da brigada de incêndio, também indivíduo do público, acionou o botão de emergência que desabilita o acelerador e a linha de impressão. Desde a constatação do acidente até a interrupção do feixe de elétrons, transcorreram 2 minutos.

O dano à blindagem permitiu a exposição do IOE ao campo de radiação a uma distância aproximada de 0,5 m. O membro da brigada de incêndio e o operador

do guindaste não foram expostos, pois além do feixe ser espalhado para cima ambos se encontravam protegidos pela estrutura do mezanino.

Para a estimativa da taxa de equivalente de dose ambiente foram utilizadas as mesmas premissas de cálculo no cenário anterior, isto é, que toda a radiação gerada escapou pelo orifício, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Representação esquemática do segundo cenário de acidente simulado com a posição do IOE

Fonte: autor da dissertação.

Por se tratar de raios X de baixa energia a taxa de equivalente de dose ambiente $\dot{H}'^*(1)$, a 1 m de distância do feixe de 110 keV e 300 mA será de 6,5 Sv/h [41].

Considerando a eficiência de conversão, obtida na equação (9), a taxa de equivalente de dose ambiente é calculada pela equação (15):

$$\dot{H}'_B(1) = 6,5 \cdot 0,29\% \quad (15)$$

$$\dot{H}'_B(1) = 18,9 \text{ mSv/h}$$

Como o IOE estava a uma distância de 0,50 m da perfuração na blindagem, o valor da taxa de equivalente de dose ambiente calculada, $\dot{H}'_c$, será quatro vezes maior, como calculado em (16):

$$\dot{H}'^*_c(0,5) = 76 \text{ mSv/h} = 1,3 \text{ mSv/min} \quad (16)$$

Considerando que o IOE permaneceu um tempo, $\Delta t = 2 \text{ min}$ exposto a este campo de radiação, o valor do equivalente de dose ambiente, H'^*_c a que foi submetido foi de 2,6 mSv.

O membro da brigada de incêndio, além de estar blindado pela estrutura do mezanino, não foi exposto visto que o feixe estava direcionado para cima.

As situações simuladas indicaram que os aceleradores de elétrons autoblindados poderiam gerar doses acima do nível de investigação para monitoração individual do IOE [25] na ocorrência deste tipo de acidente.

4.5 Verificação de escape de raios X por meio das fendas de entrada e saída de produto

Como a câmara de ionização utilizada para obtenção dos valores de taxas de dose não possui capacidade para discriminar as energias dos raios X emitidos, foi utilizado o identificador de radionuclídeos para adquirir espectros de emissão na fenda de entrada de produto.

Para as medições posicionou-se o equipamento no centro da fenda de entrada de produto, a 0,03 m de distância desta, como indicado na Figura 29.

Figura 29 – Posicionamento do identificador de radionuclídeos para obtenção dos espectros de raios X na fenda de entrada

Fonte: autor da dissertação

Com o acelerador desligado obteve-se o espectro da radiação de fundo, onde se observou apenas um fotopico em 1460 keV, oriundo da fonte interna de Potássio-40, do teste de calibração do instrumento.

Fixou-se a tensão de aceleração em 110 kV para obter os espectros para correntes de 50 mA, 100 mA, 150 mA e 200 mA, e percebeu-se então em cada espectro outros fotopicos, além da fonte de calibração, identificados como proveniente dos raios X de *bremssstrahlung*.

O programa de aquisição de dados do medidor utilizado disponibiliza uma ferramenta que permite a identificação dos parâmetros principais do espectro de interesse. Com essa ferramenta foram determinados a energia do pico dos raios X e o número de contagens correspondente à área desse pico.

Os valores encontrados em cada pico correspondente ao *bremssstrahlung* do FE para as diversas correntes mencionadas estão indicados nos espectros e nos respectivos relatórios de análise dos dados, vide ANEXOS F, G, H, I e J. Uma compilação desses resultados é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Características dos raios X detectados na fenda de entrada de produto em função da corrente de feixe para energia de 110 keV

Corrente de feixe (mA)	Energia do pico (keV)	Número de contagens
0	74,0	$0,39(80) \times 10^3$
50	70,0	$1,5391(83) \times 10^5$
100	74,3	$1,2712(75) \times 10^5$
150	73,6	$1,9157(92) \times 10^5$
200	71,2	$4,1537(14) \times 10^5$

Fonte: autor da dissertação.

Estes espectros confirmam que as taxas de dose obtidas com a câmara de ionização são causadas pela radiação de *bremsstrahlung* do FE produzido no acelerador e freado por seus elementos estruturais e sua blindagem.

Para a corrente de feixe nula o algoritmo de cálculo do programa de análise do equipamento utilizado indica uma energia de pico de valor mais baixo decorrente da eficiência de detecção que é maior nesta faixa. O fato da incerteza da área integrada do pico ser maior que o próprio resultado obtido, indica que este valor é compatível com zero não ocorrendo emissão de raios X pelo acelerador nessa situação.

Também foi determinado o espectro de raios X de *bremsstrahlung* na fenda de entrada a uma distância de 0,10 m da fenda, com o acelerador funcionando a uma tensão de 110 kV e corrente de 200 mA. Nesse caso, a área integrada do pico correspondeu a $1,015(29) \times 10^3$ contagens, o que é 409 vezes inferior àquela obtida na superfície da fenda.

4.6 Avaliação da blindagem extra

A análise do espectro obtido pelo programa de aquisição de dados, apresentado no ANEXO K, também indicou a presença de raios X decorrentes de *bremsstrahlung* no local onde foi retirada a blindagem extra. No espectro foi possível determinar um fotopico com energia de 56,9 keV e $0,6968(51) \times 10^5$ contagens.

As medições obtidas com a câmara de ionização e com os dosímetros OSLD fixados no interior da carenagem neste ponto mostraram que a retirada da blindagem não impactou na exposição ocupacional.

4.7 Estudo do circuito de segurança do acelerador

A lógica operacional do circuito de segurança foi estudada a partir do manual de treinamento de manutenção do acelerador [43]. Nele está indicado que a malha eletrônica de segurança que alimenta o CLP testa a alta tensão (AT), o sistema de vácuo, os filamentos e a temperatura no gabinete de controle de potência antes que o sistema eletrônico libere o feixe de elétrons. Com exceção da temperatura do gabinete de controle de potência, que é testado sozinho, os testes são realizados em grupos.

Na Figura 30, é apresentada a tela do painel de controle denominada tela de travamento do sistema de segurança, onde é indicado o status do sistema de controle e segurança do acelerador. Nesta, visualiza-se os diversos grupos testados para liberação do feixe denominados de grupo de alta tensão, de filamentos, de vácuo e de alimentação testados pelo sistema indicados em verde quando apresentam bom funcionamento.

Figura 30 – Tela de travamento do sistema indicando o resultado dos testes de controle e segurança do acelerador com os grupos testados

Fonte: autor da dissertação.

Para que cada grupo seja considerado funcional os testes devem indicar que todos seus elementos apresentam resposta de acordo com parâmetros de fábrica, não podendo ser alterados pelo usuário.

O único teste ligado ao sistema de segurança radiológica é o do grupo de alta tensão que compreende a blindagem do acelerador e os monitores GM. Como esses componentes são diversos em princípio de funcionamento e redundantes, a entrada “e” considerada na lógica do circuito introduz um nível a mais na segurança do sistema, pois caso qualquer um dos componentes deste grupo não apresente bom funcionamento, a alta tensão é desligada desabilitando o feixe. O diagrama dos testes realizados neste grupo é mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Diagrama de teste dos componentes do grupo de alta tensão com os componentes do sistema de segurança do acelerador de elétrons destacados em vermelho

Fonte: autor da dissertação.

Além dos componentes ligados ao circuito de segurança radiológica são testados nesse grupo o resfriamento do inversor, a chave de ativação, o disjuntor da alta tensão, o equilíbrio trifásico, a pressão e a temperatura referente à alta tensão.

4.8 Estimativa da probabilidade de falha no sistema de segurança do acelerador

Neste tipo de acelerador para haver exposição acidental é necessário que a câmara de irradiação seja aberta inadvertidamente com o acelerador energizado e que ocorram falhas simultâneas no sistema de segurança composto de uma parte eletromecânica e uma parte eletrônica que são independentes e redundantes.

A parte eletromecânica é composta por um par de chaves de fim de curso produzidas segundo a norma IEC 60947-1 [44], que assegura $5 \cdot 10^6$ operações mecânicas sem falhas. Assim a probabilidade de falha, p , em qualquer desses equipamentos isoladamente é dada pela equação (17).

$$p = \frac{1}{5 \cdot 10^6} \quad (17)$$

$$p = 2 \cdot 10^{-7}$$

Arbitrando-se uma faixa de segurança de duas vezes, essa probabilidade de falha (p') é calculada pela equação (18).

$$p' = \frac{p}{2} \quad (18)$$

$$p' = 1 \cdot 10^{-7}$$

A parte eletrônica do sistema de segurança é composta por três medidores de radiação GM, ligados ao circuito eletrônico de controle do acelerador. Esse sistema está programado para desabilitar o feixe em duas situações: (i) no caso de qualquer um dos três medidores indicarem contagem superior a programada previamente, isto é, $25 \mu\text{Sv/h}$, o que poderia significar vazamento de radiação por meio da blindagem e (ii) no caso de qualquer um dos três medidores indicarem contagem zero, o que poderia indicar desligamento ou mal funcionamento do medidor.

De acordo com Smith [45], um circuito eletrônico tem uma probabilidade de falha de aproximadamente 30% menor do que um componente eletromecânico,

como a chave de fim de curso. Assim, a atribuição do mesmo valor da probabilidade de falha p' para cada um dos circuitos de leitura dos medidores é uma opção mais conservadora para estimativa da probabilidade total de P' , dada pela equação (19).

$$P' = (10^{-7})^2 \cdot (10^{-7})^3 \quad (19)$$

$$P' = 10^{-3}$$

No caso de falha do sistema de segurança o acelerador pode ser desligado manualmente ao se acionar o botão de parada de emergência localizado no painel de controle da linha de impressão que se encontra em área livre.

Uma compreensão melhor da probabilidade de falha dos dispositivos de segurança é obtida quando se contextualiza seu emprego nas condições operacionais do equipamento na linha de impressão flexográfica, conforme estabelecido no PPR [38].

Esta linha de produção opera em regime contínuo 24 h por dia 7 dias por semana, com três turnos de trabalho em revezamento contínuo. É razoável supor que se deva abrir a câmara de irradiação uma vez por turno, ou seja, três vezes ao dia para que seja feita, por exemplo, uma troca de material a ser impresso ou na ocorrência de uma ruptura indesejada do filme polimérico.

Assim sendo, o número de acionamento das chaves de fim de curso, Ac , por ano é calculado pela equação (20):

$$Ac = 3.365 = 1095 \quad (20)$$

A partir da estimativa de probabilidade de falha expressa pela equação (18) para um dispositivo, determina-se que a probabilidade de falha simultânea dos dois dispositivos eletromecânicos será p'^2 isto é, 10^{-14} , de modo que o número de acionamentos e a probabilidade de falhas é o seu inverso. O intervalo de tempo (ΔT) esperado para a ocorrência da falha simultânea é dada pela equação (21):

$$\Delta T = \frac{1}{(p')^2 \cdot Ac} \quad (21)$$

$$\Delta T = \frac{10^{14}}{1095} = 9,13 \cdot 10^{10}$$

Observa-se que é um intervalo de tempo muito maior que o esperado para a vida útil deste tipo de equipamento industrial que é de 10 anos. Isto demonstra que a ocorrência deste tipo de evento, em razão dos circuitos de segurança utilizados por este acelerador de elétrons, é bastante improvável.

Outrossim, de acordo com a CIPR, em sua publicação ICRP 76, a probabilidade de falha abaixo de 10^{-7} deve ser considerada zero, do ponto de vista da proteção radiológica [18].

4.9 Avaliação da proteção radiológica no caso de exposições potenciais

Após avaliar os cenários destinados a representar as sequências de eventos que podem causar exposição, determinar a probabilidade dessas sequências, suas doses resultantes e comparar com as normas vigentes como critério de aceitabilidade, foi elaborada uma árvore de falhas para avaliar a proteção radiológica do acelerador de elétrons autoblindado com o objetivo de planejar e julgar as medidas de proteção existentes [18].

A árvore de falhas apresentada na Figura 32 tem como “Evento Cabeça”, o evento indesejável que se pretende evitar, isto é, a exposição acidental de pessoas à radiação vinda do acelerador de elétrons e foi a ferramenta escolhida para analisar tal evento, que pode vir a ocorrer a partir de três eventos iniciadores: acelerador ligado com blindagem aberta, pessoa que coloca parte do corpo em uma das fendas de entrada ou de saída de produto e a blindagem comprometida em local que não impede a liberação do feixe.

Figura 32 – Árvore de falhas para exposição potencial com três eventos iniciadores, os quais podem levar à exposição accidental de pessoas no acelerador de elétrons

Fonte: autor da dissertação.

Como a probabilidade de falha no sistema de segurança do acelerador foi considerada zero por ser menor que 10^{-7} , ver item 4.8 do presente trabalho, este evento da árvore de falhas não foi desenvolvido.

O primeiro evento iniciador da árvore de falhas analisado trata da adulteração do circuito de segurança para possibilitar a liberação do FE quando (i) o GM localizado na fenda de entrada de produto detectar taxa de dose superior a $25 \mu\text{Sv/h}$ e (ii) as chaves de fim de curso forem burladas e não indicarem corretamente que a blindagem não está completamente fechada.

Na Figura 33 é mostrado o desenvolvimento deste componente.

Figura 33 – Desenvolvimento do primeiro evento iniciador da árvore de falhas - circuito de segurança adulterado de maneira a possibilitar a liberação do feixe de elétrons

Fonte: autor da dissertação.

Descrição dos modos de falha e medidas que mitigam a escalada para situação de acidente:

- 1A – Alteração do CLP: Existem duas maneiras de alterar o CLP (i) Reprogramá-lo diretamente ou (ii) alterando sinais eletrônicos de entrada dos sensores. Como o *software* do sistema de segurança é executado em modo automático e somente o fabricante tem acesso ao código fonte não é possível um funcionário fazer esse tipo de modificação na instalação. A segunda possibilidade requer conhecimentos técnicos especializados que os IOE possuem. Programa de treinamento e reciclagem periódica dos IOE são eficazes para prevenir essa situação;
- 1B – Alteração do valor de disparo: O valor de disparo dos GM do circuito de segurança é definido pelo fabricante e o usuário não tem como alterá-lo. Uma vez implantado, deve ser testado pelo supervisor de proteção radiológica antes de liberar o acelerador de elétrons para operação rotineira. A inspeção periódica do funcionamento do circuito de segurança é capaz de identificar a ocorrência dessa falha;
- 1C – Alteração mecânica da chave de fim de curso: Quando a blindagem está fechada, é acionado um interruptor que indica o correto fechamento da blindagem. Caso seja feita qualquer alteração neste mecanismo os GM do circuito de segurança serão capazes de impedir a liberação do feixe, pois a taxa de dose superará o limite de disparo;
- 1D – Idem à falha descrita no item A.

O segundo evento iniciador da árvore de falhas que foi analisado considerou a situação em que uma pessoa coloca parte do corpo em uma das fendas de entrada ou de saída de produto com o acelerador ligado, ficando sujeito à irradiação. Cabe salientar que tal situação só é possível quando não há algum produto sendo irradiado, pois nesse caso o próprio produto passando a alta velocidade impede o acesso às fendas. Além disso, a abertura das fendas é de somente 0,013 m de tal forma que nenhuma extremidade de um adulto pode ser inserida até a posição de acesso direto ao feixe no interior da câmara de irradiação.

Na Figura 34 é indicado o desenvolvimento deste componente da árvore de falhas.

Figura 34 – Desenvolvimento do segundo evento iniciador da árvore de falhas - pessoa coloca parte do corpo em uma das fendas de entrada ou de saída de produto com o acelerador ligado

Fonte: autor da dissertação.

Descrição dos modos de falha e medidas que mitigam a escalada para situação de acidente:

2A – A pessoa adentrou a área supervisionada tendo conhecimento que o acelerador estava ligado, mas sem conhecer os riscos advindos da exposição.

A limitação de acesso à área supervisionada aos IOE devidamente treinados previne esse evento;

- 2B – A pessoa adentrou a área supervisionada tendo conhecimento que o acelerador estava ligado e ciente dos riscos advindos da exposição. Programa de treinamento e reciclagem dos IOE são eficazes para prevenir essa situação;
- 2C – A pessoa adentrou na área supervisionada sem saber que o acelerador estava ligado. Como é necessário observar o aviso na tela de operação da máquina que indica que o acelerador está em funcionamento, o programa de treinamento e reciclagem dos IOE são eficazes para prevenir essa situação;
- 2D – Como não existe sinal luminoso no corpo do acelerador indicando que se encontra em funcionamento, este fato pode ocorrer. Foi considerado importante a instalação de sinalização luminosa de fácil visualização para mitigar essa situação.

Em todos os casos, a espessura da fenda impede o acesso à câmara de irradiação.

O terceiro evento iniciador na árvore de falhas analisado foi a blindagem ser avariada de maneira que possibilite escape de radiação não detectável pelos GM do circuito de segurança, como nos cenários de acidentes simulados 1 e 2 estudados no item 4.4 deste trabalho ou no caso de alteração deliberada na estrutura do acelerador. Esta análise é mostrada na Figura 35:

Figura 35 – Desenvolvimento do terceiro evento iniciador da árvore de falhas - blindagem avariada de maneira a permitir escape de radiação não detectável pelo circuito de segurança

Fonte: autor da dissertação.

Descrição dos modos de falha e medidas que mitigam a escalada para situação de acidente

3A – A blindagem rígida é constituída de material muito resistente a perfuração e não possui partes soldadas que se soltem com facilidade numa colisão. No entanto, é possível prevenir esta situação delimitando a área de circulação de guindastes no entorno da linha de impressão. Ministrando o treinamento de proteção radiológica aos funcionários que participam das equipes de emergência de maneira a garantir que saibam desligar rapidamente o

acelerador em caso de emergência ajuda a diminuir o tempo de exposição e, consequentemente, diminuir as doses em caso de acidente;

- 3B – Qualquer projeto de modificação da blindagem do acelerador, deve ser submetida à aprovação da CNEN. Uma vez implantado, deve ser testado pelo supervisor de proteção radiológica antes de liberar o acelerador de elétrons para a operação rotineira. A realização de levantamento radiométrico periódico é eficiente para verificar qualquer alteração da taxa de dose no entorno do acelerador decorrente de eventual alteração na configuração da blindagem.

5.0 Revisão do plano de proteção radiológica e otimização

Visando a otimização da exposição dos trabalhadores, foi examinado o sistema de proteção radiológica da instalação para compreender e avaliar os fatores que podem afetar as doses individuais e coletivas cobrindo não apenas os problemas convencionais como controle de doses, mas também fatores menos tangíveis que possuem influência significativa no seu desempenho, como seleção de pessoal, treinamento e controle gerencial [37].

A partir da utilização da técnica da árvore porfiriana buscou-se i) Identificar sistematicamente os caminhos possíveis para um controle de proteção radiológica eficaz e adequado à instalação, (ii) identificar pontos fortes e fracos do sistema de gerenciamento e (iii) fornecer uma base para a tomada racional de decisões pela administração [37].

Para a construção da árvore, foram realizadas reuniões com o supervisor de proteção radiológica da instalação, com agentes da CIPA que participaram das simulações dos cenários de situações acidentais e com representantes do setor de sustentabilidade da empresa que cuidam da higiene e segurança do trabalho. Na discussão foram estabelecidos os questionamentos usados para apuração dos fatos. Para a avaliação da eficácia dos treinamentos foram analisadas as respostas do questionário, aplicados aos IOE da instalação, mostrado no ANEXO C.

No topo da árvore porfiriana foi colocado “programa de proteção radiológica eficaz e adequado” que é a finalidade deste processo de otimização. Os níveis subsequentes foram desenvolvidos para estabelecer o que é necessário e suficiente para atingir esta finalidade.

Como a análise do programa tem como finalidade a obtenção de um programa eficaz e adequado de proteção radiológica para a instalação, procurou-se verificar o que esse programa deve abranger e o que foi constatado impõe que é necessário e suficiente que o programa abranja a operação normal e a operação de emergência do acelerador de elétrons autoblindado.

De maneira análoga, para a avaliação do segundo nível corresponde ao que seja necessário e suficiente para que ambas as operações possam ser desenvolvidas. Recomenda-se que para operação normal seja feito o controle radiológico dos IOE e dos indivíduos do público envolvidos. Para a operação de emergência devem ser estabelecidos de maneira clara e simples os procedimentos atinentes a ela sendo necessário que todos os que possam vir a compor as equipes de intervenção recebam treinamento específico em proteção radiológica. Na Figura 36 estão indicados desde o evento cabeça até os dois primeiros ramos da árvore porfiriana desenvolvida.

Figura 36 – Árvore porfiriana positiva para obtenção de um programa de proteção radiológica adequado e efetivo para um acelerador de elétrons autoblindado de baixa energia.

Fonte: autor da dissertação.

A análise da documentação mostrou que os procedimentos de emergência que constam no PPR estão adequados e consistem em instruções simples de desligamento do acelerador que podem ser seguidos pelos IOE e pelos participantes das equipes de emergência. No entanto, no PPR está indicado que estes procedimentos sejam executados pelo supervisor de proteção radiológica e que sejam afixados na entrada da área supervisionada. Delegar claramente esta função ao pessoal que tenha recebido treinamento específico em proteção radiológica e afixar essas instruções próximo ao painel de controle onde é executada a ação de desligamento do acelerador são medidas simples que diminuem o tempo de ação e conseqüentemente eventuais doses em caso de exposição acidental.

Constatou-se que não existe no PPR a previsão de treinamento específico de proteção radiológica para atuação em operação de emergência. As simulações dos cenários de situações acidentais realizadas evidenciaram a necessidade de treinar os membros da CIPA que têm como atribuição atuar em caso de qualquer situação de emergência na empresa. É importante e necessário implementar um programa de treinamento específico em proteção radiológica para esses profissionais.

Para a avaliação do próximo nível, que abrange o controle radiológico dos IOE e dos indivíduos do público, respondeu-se à pergunta “O que é necessário e suficiente para que seja feito um controle radiológico eficaz dos IOE e dos indivíduos do público”?

Para isso, foram avaliados aspectos relativos ao pessoal que terá acesso à área supervisionada, os equipamentos de segurança radiológica, os procedimentos ligados à operação e à segurança radiológica e os controles administrativos mantidos no SPR. Pela análise destes itens foi desenvolvido do terceiro ao quinto ramo da árvore apresentada na Figura 37.

Figura 37 – Componentes para avaliação do controle do radiológico dos IOE

Fonte: autor da dissertação.

O PPR estabelece que deve ser feito o acompanhamento da exposição laboral de todos os técnicos de manutenção, que são considerados IOE. Devem estar presentes na instalação três técnicos de manutenção por turno, o que representa nove IOE. A quantidade de IOE já foi objeto de otimização anterior: No início da operação do acelerador todos os técnicos, operadores e ajudantes de operação foram considerados IOE, o que representava cinco IOE por turno, totalizando 15 IOE. Porém, como o acelerador é operado a partir da área livre, os operadores e ajudantes de operação passaram a ser considerados indivíduos do público.

Os componentes para a avaliação da qualificação dos IOE para sua contratação são a definição da formação técnica para cumprimento das atribuições e sua documentação, representados na Figura 38. Para avaliá-los foram estabelecidos os questionamentos “As qualificações necessárias para desempenhar as funções estão adequadas e bem definidas no PPR?” “Como é garantido o cumprimento dos requisitos de qualificação?”.

Figura 38 – Componentes para avaliação da qualificação dos IOE

Fonte: autor da dissertação.

A análise do PPR indicou que a qualificação exigida para desempenhar as funções é adequada e está bem definida: Todos os IOE devem ter completado no mínimo o ensino médio completo e curso técnico em sua área de atuação. Todos os gerentes devem também comprovar ter concluído curso superior completo. A comprovação é feita pela apresentação de diploma devidamente válido em território nacional. O cumprimento desses requisitos é garantido pelo departamento de Recursos Humanos no processo de contratação.

Para a análise das atribuições foram feitos os seguintes questionamentos “As atribuições dos IOE estão bem estabelecidas no PPR?”, “Essas atribuições estão condizentes com a qualificação exigida?”. O resultado dessa análise é que as atribuições estão de acordo com as qualificações exigidas e são bem estabelecidas no PPR. A observação da execução das tarefas dos IOE durante o desenvolvimento do presente trabalho corroborou esse resultado.

Outro aspecto apreciado foram os treinamentos em proteção radiológica que são organizados e implementados pelo SPR. O ramo da árvore porfiriana que mostra os aspectos estabelecidos para a avaliação dos treinamentos, o escopo, o público alvo, a documentação, a reciclagem e avaliação, é apresentado na Figura 39. Para sua avaliação foram feitos os seguintes questionamentos “O escopo e o público alvo de cada treinamento são adequados às necessidades da instalação e estão bem estabelecidos no PPR”? “Como é avaliado se o escopo de cada treinamento foi atingido?” “A participação nos treinamentos está devidamente documentada?” e “A periodicidade dos treinamentos de reciclagem está adequada”?

Figura 39 – Componentes para avaliação do treinamento dos IOE

Fonte: autor da dissertação.

Constatou-se que no PPR não há definição do escopo de nenhum treinamento cujo público alvo seja os IOE. Não há menção à documentação do treinamento que é mantida no SPR. Os participantes são submetidos a uma avaliação ao final do treinamento e não há nenhum outro instrumento de avaliação de sua eficácia. A reciclagem é feita com um treinamento de quatro horas realizado a cada dois anos e não há menção do conteúdo que deve ser desenvolvido e nem de algum instrumento para avaliar a sua compreensão.

Considerou-se que as diversas observações aliadas à ausência de escopo dos treinamentos ministrados aos IOE podem resultar no desconhecimento de aspectos importantes de segurança do acelerador de elétrons e na confusão de conceitos.

O resultado da análise das respostas do questionário aplicado aos IOE confirmou esse fato. Responderam voluntariamente o questionário 16 participantes entre eles, um gerente, dois coordenadores e treze técnicos, sendo que três técnicos não haviam concluído o período de treinamento necessário para o desempenho da função porque haviam sido recém-contratados.

O resultado dessa análise é apresentado:

Questionados sobre o acelerador de elétrons, 56% souberam descrever com precisão sua localização na fábrica e 44% descreveram incorretamente ou de maneira incompleta sua localização na linha de impressão. A mesma proporção de IOE declarou não saber reconhecer os sinais do acelerador em funcionamento. Na Figura 40 é ilustrada a compilação das respostas.

Figura 40 – Compilação das respostas dos IOE às questões referentes à localização do acelerador de elétrons na instalação e reconhecimento do acelerador em operação

Fonte: autor da dissertação.

Quanto à classificação das áreas 44% conseguiram explicar corretamente a localização da área supervisionada enquanto 56% dos respondentes a superestimaram indicando área livre como supervisionada.

Nem todos os IOE acessaram a área supervisionada com a mesma frequência: 37 % dos IOE declararam realizar tarefas periódicas; 63 % responderam ir ao local raramente ou nunca ter ido, como ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Compilação das respostas dos IOE às questões referentes à localização da área supervisionada e frequência de acesso

(a) Descreve corretamente a localização da área supervisionada

(b) Acessa a área supervisionada

Fonte: autor da dissertação.

Questionados sobre o uso do dosímetro pessoal, apenas os funcionários recém-contratados, isto é, 19 % dos respondentes não souberam descrever corretamente quando este deve ser utilizado e 38 % não conseguiram informar o local de guarda dos dosímetros, onde eles devem ser retirados em caso de necessidade de uso. Esses resultados são indicados na Figura 42.

Figura 42 – Compilação das respostas dos IOE às questões referentes ao uso e guarda dos dosímetros individuais

(a) Descreve corretamente quando deve usar o dosímetro individual

(b) Descreve corretamente o local de guarda do dosímetro individual

Fonte: autor da dissertação.

Questionados sobre situações consideradas anormais envolvendo o acelerador, 81 % dos respondentes declararam ter presenciado alguma, mas as situações descritas indicaram apenas problemas que impediam a liberação do feixe, o que não apresenta risco radiológico.

Sobre identificação de situações de risco, 62 % indicaram corretamente situações que poderiam resultar em exposição acidental; 38 % declararam não saber ou apontaram riscos mecânicos ou relacionados à alta tensão do equipamento. Estes resultados são apresentados na Figura 43.

Figura 43 – Compilação das respostas dos IOE referentes às questões de ter presenciado situação anormal e saber identificar situações de risco no acelerador de elétrons

Fonte: autor da dissertação.

Questionados sobre o desligamento do acelerador em caso de emergência, todos os IOE (81%) que já haviam participado de treinamentos souberam descrever corretamente o procedimento. Mais uma vez apenas os funcionários novos que corresponderam a 19 % dos IOE declararam não saber como proceder neste caso. Esses resultados são mostrados na Figura 44.

Figura 44 – Compilação das respostas dos IOE às questões referentes ao desligamento do acelerador de elétrons em caso de emergência e participação em treinamentos

(a) Descreveu corretamente como desligar o acelerador em caso de emergência (b) Participou de treinamentos em proteção radiológica

Fonte: autor da dissertação.

As respostas evidenciaram a importância do treinamento. No entanto é necessário estabelecer o escopo do treinamento inicial e periódico, bem como estabelecer uma ementa adequada para melhorar sua efetividade. Os IOE relataram terem recebido informações sobre temas abordados no questionário, mas pelo fato do treinamento ser muito longo aliado a alguns dos temas não terem sido revistos nos treinamentos periódicos de reciclagem colaboraram para que muitas informações ficassem esquecidas. Recomenda-se rever a carga horária do treinamento inicial de 16 para 8 horas e realizar o treinamento periódico de reciclagem anualmente com 2 horas de duração.

A avaliação dos equipamentos abrangeu todos os medidores utilizados para a realização do monitoramento com função de rotina, no local de trabalho e individual para radiação externa.

Para avaliação dos medidores portáteis, foram estabelecidos os critérios manutenção, quantidade, calibração, sensibilidade e teste de aferição, apresentados na Figura 45. Foram realizados os seguintes questionamentos “A instalação possui medidores em número suficiente?” “Os medidores possuem sensibilidade adequada?” “Existe um programa de manutenção corretiva e preventiva desses equipamentos?” “É feito o controle da calibração periódica

desses instrumentos e “Existe procedimento de teste de aferição e critérios de aceitação das medições obtidas?”.

Figura 45 – Componentes para avaliação dos medidores portáteis

Fonte: autor da dissertação.

A instalação possui três medidores portáteis de radiação, sendo uma câmara de ionização e dois GM. O manual do equipamento [6] recomenda que seja utilizada câmara de ionização para a realização dos levantamentos periódicos, pois possuem boa resposta para radiação de energia até da ordem de 20 keV, uma vez que os medidores do tipo GM costumam superestimar as medições em energias de raios X mais baixas.

Entretanto, os espectros de raios X obtidos mostrados no ANEXO E, indicam valores mais elevados de energia de emissão de raios X de *bremsstrahlung*, da ordem de 74 keV, faixa na qual a resposta dos GM e das câmaras de ionização são próximos [46]. Sabendo-se que a leitura do GM será um pouco superior à da câmara de ionização, o emprego dos primeiros se justifica em ambiente industrial dado a sua robustez e ao fato da disponibilidade dos dois tipos da instalação, o que permite a comparação entre as medidas. Recomenda-se o uso preferencial da câmara de ionização nas inspeções periódicas.

O teste de aferição está previsto para ser realizado antes dos levantamentos radiométricos periódicos. Embora citado no PPR, o critério de aceitação ou de encaminhamento para manutenção do monitor não consta na ficha de aferição.

Para a avaliação do monitoramento indireto da exposição, foram examinados aspectos relativos aos dosímetros individuais e de área, para o quais se questionou “Qual grupo de colaboradores precisa ser dosimetrado?” e “Os dosímetros de área estão em número suficiente e localização adequada para fornecer as informações necessárias?” Este ramo da árvore porfiriana está indicado na Figura 46.

Figura 46 – Componentes para avaliação dos dosímetros

Fonte: autor da dissertação.

O PPR estabelece que deve ser entregue a todo IOE no ato de sua contratação um conjunto de regras de segurança, com instruções claras sobre o uso obrigatório do dosímetro individual.

No entanto, o uso de dosímetro na altura do peito por fora do uniforme é dificultado, pois por se tratar de instalação que produz embalagens alimentares os uniformes não podem possuir bolsos, o que dificulta a fixação do dosímetro na

altura do peito do IOE. A opção de utilizar o dosímetro preso no pescoço por um colar não é viável porque existe risco de injúria mecânica decorrente da velocidade com que o filme irradiado é rebobinado.

A localização dos três dosímetros de área é estabelecida no PPR no limite entre área supervisionada e área livre. Sua localização e quantidade foram considerados suficientes para possibilitar o acompanhamento da exposição dos indivíduos do público, isto é, dos trabalhadores que executam tarefas ou transitam nas proximidades da área supervisionada.

Para a realização deste trabalho foi solicitado um dosímetro adicional de área para determinar a adequação de uma blindagem extra, removível dentro da carenagem externa do acelerador.

Sugere-se que seja adotado um monitor de área com leitura de taxa de dose instantânea de fácil acesso aos trabalhadores.

Também é recomendado que seja instalado um aviso luminoso de fácil visualização que indique que o FE está ligado.

Os procedimentos, indicados no segundo nível, foram avaliados quanto a sua adequação, execução e documentação. Foram examinados os procedimentos existentes na instalação tais como, de operação manual, de operação automática, de inspeção do circuito de segurança e de levantamento radiométrico. Todos foram considerados adequados e são sistematicamente executados embora estejam documentados no PPR apenas a inspeção do circuito de segurança e o monitoramento. Os procedimentos de operação são tratados nos treinamentos periódicos o que foi considerado suficiente. Recomenda-se que esses temas sejam formalizados no programa de treinamento periódico.

O último componente do controle radiológico dos IOE analisado refere-se aos controles administrativos: controle dos monitores de radiação, registro das inspeções do circuito de segurança, dos treinamentos, relatórios dosimétricos, controle das fontes de aferição, registro de ocorrências, registro das manutenções, registro dos levantamentos radiométricos, das auditorias e do controle médico dos IOE. A análise foi feita considerando a adequação à operação rotineira da instalação e sua aplicação, a partir dos questionamentos “Quais registros são mantidos?” “Onde os registros ficam arquivados?”.

Verificou-se que, embora previsto no PPR, não são mantidos os registros das inspeções do circuito de segurança, das manutenções do acelerador, de

ocorrência e das auditorias. Isso impacta negativamente na eficiência do programa e aconselha-se que seja implementado. Por outro lado, o PPR prevê que haja o registro de toda operação do acelerador, porém dada as características de energia pequena do feixe que não produz rejeitos radioativos nem ativa o material irradiado entendeu-se ser desnecessário esse registro do ponto de vista da proteção radiológica.

O controle radiológico dos indivíduos do público realizado por meio da restrição de acesso à área supervisionada e pela implementação dos dosímetros de área foi considerado adequado. Este componente da árvore está indicado na Figura 47. A análise dos relatórios dosimétricos indicou não haver exposição ocupacional nas áreas livres da instalação.

Figura 47 – Componentes para avaliação do controle radiológico dos indivíduos do público

Fonte: autor da dissertação.

5 CONCLUSÕES

A avaliação da exposição laboral dos IOE mostrou que, no período analisado, em nenhum ano foi atingido o limite previsto para indivíduos do público, isto é, 1 mSv/ano ou fração proporcional ao tempo de permanência nas áreas da instalação estudada.

O estudo do PPR indicou fragilidades nos seguintes aspectos:

1. Definição de escopo dos treinamentos inicial e periódico de reciclagem, sendo que para este último é necessário definir seu conteúdo;
2. Falta de delegação de execução dos procedimentos de emergência tanto para os IOE quanto para as equipes de intervenção. Estas últimas necessitam de treinamento específico para este fim;
3. O registro previsto no PPR de todas as operações do acelerador é desnecessário do ponto de vista da proteção radiológica, dado que não são gerados rejeitos radioativos na instalação.

A análise dos cenários de exposição potencial realizada mostrou que o equipamento é intrinsecamente seguro em consequência das baixas probabilidades de ocorrência combinadas com as pequenas doses decorrentes destas. Ressalta-se que não foi encontrado na literatura relato de acidentes com esse tipo de equipamento.

Verificou-se também ser possível minimizar as consequências em caso de exposições potenciais se os membros da CIPA forem capacitados para atuar nas situações de emergência radiológica, pois podem interromper o feixe de radiação rapidamente.

Os estudos realizados confirmaram que o equipamento e a instalação operam em conformidade com as normas regulatórias de proteção radiológica, o que pode ser verificado pelos relatórios dosimétricos individuais e de área.

A avaliação do histórico do monitoramento do local de trabalho indicou que a área designada como supervisionada pode ser reavaliada e classificada como área livre. Neste caso, a substituição do monitoramento individual por um de área mais abrangente nas vizinhanças do acelerador é suficiente para o

acompanhamento das exposições ocupacionais, com diminuição do custo de operação sem prejuízo na segurança radiológica da instalação.

O estudo do funcionamento do sistema eletrônico de segurança evidenciou robustez, segurança em profundidade e diversidade em princípio de funcionamento garantindo a operação segura deste tipo de acelerador.

A probabilidade de falha no sistema foi considerada zero, por ser inferior a 10^{-7} , o que demonstra que a lógica de segurança é suficientemente adequada para este tipo de equipamento.

Conclui-se que, além das sugestões de modificações no PPR, já citadas, a otimização do sistema de proteção radiológica evidenciou a necessidade da instalação de um aviso luminoso de indicação de operação do equipamento, pois o único indicador existente é de difícil visualização.

Por fim, este estudo evidenciou a importância dos treinamentos específicos de segurança e proteção radiológica aplicável a todos os IOE e envolvidos, bem como sua reciclagem. Ressalta-se também a importância de se definir o escopo do treinamento para que este seja instrumento de consolidação da cultura de segurança da instalação.

Ressalte-se que este estudo pode ser estendido para instalações semelhantes, uma vez que todas devem respeitar as mesmas diretrizes básicas de proteção e segurança operacional.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

O emprego de códigos modernos de simulação de interação da radiação com a matéria permitirá a determinação mais detalhada e precisa tanto das exposições acidentais, quanto do dimensionamento correto da blindagem desse equipamento.

Esse estudo permitiria a introdução de melhorias no projeto desse tipo de máquina do ponto de vista da proteção radiológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation safety of gamma, electron and x ray irradiation facilities**, Specific Safety Guide n° SSG-8. Viena, 2010. Disponível em: < https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1454_web.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2017.
2. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de instalações radiativas**. Norma CNEN NN 6.02 Resolução 215/17. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em : <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm602.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2018.
3. VARA, F.; BRANN, W.; BEREJKA, T.; HANRHAN, B; COWELL, D.; CARBLOM, L.; SCHAPER, K; **UV/EB Curing primer 1: inks, coatings and adhesives**. 4ª ed. Illinois, RadTech International North américa, 1995. p.6 – 10.
4. ENERGY SCIENCES INC. **Catálogo EZ Cure Down Fire (DF)**. Disponível em <<https://www.ebeam.com/ezcuredf.html>>. Acesso em: 02 mar.2018.
5. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION MEASUREMENT. **Radiation protection for particle accelerator facilities** Report n°144. Maryland, 2005.
6. ENERGY SCIENCES, INC. **Customer Documentation System 8197 V02**, Operation and maintenance manual, Wilmington, 2007.
7. RPC TECHNOLOGIES. **BroadBeam Basic System**. Hayward, 1998.
8. SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Gráfica** Série P + L. São Paulo: SMA, 2009. Disponível em <http://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/guia_ambiental2.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2018.
9. OLIVEIRA, M.C.F. **Estudo comparativo de tintas utilizando a análise do ciclo de vida**. 2006. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos) Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul.

10. RELA, P. R. **Cura por feixe de elétrons (EB)**. Disponível em: <<http://atbcr.com.br/artigos/curaporfeixedeeletrons.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2014.
11. YAMASAKI, M. C. R. **A cura de tintas, vernizes e revestimentos por ultravioleta e feixe de elétrons - conceitos básicos**. São Paulo: Associação Técnica Brasileira Cura por Radiação, 1997.
12. LEVY, D. **Informatização e unificação dos programas de proteção radiológica: monitoramento das radiações ionizantes e sua otimização**. 2015. 150p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP. Disponível em <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde..2015LevyInformatizacao.pdf>. Acesso em: 16 ago.2017.
13. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Norma CNEN NN3.01 Resolução 164/14 Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2017.
14. LOURENÇO, M. J. M. **Avaliação das condições de segurança radiológica das instalações de aceleradores industriais utilizados no Brasil**. 2003. 84p. Dissertação (Mestrado em Radioproteção e Dosimetria) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD.
15. TODO, A.S.; SORDI, G. M. A. A. **Fundamentos de Tecnologia Nuclear** volume IV Proteção Radiológica, IPEN-CNEN São Paulo, 1997.
16. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Glossário de segurança nuclear**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/glossario.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2017.
17. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Optimization of radiation protection in the control of occupational exposure**, Safety Report Series n.21, Vienna, 2002. Disponível em < <https://www-pub.iaea.org/books/iaeabooks/6288/Optimization-of-Radiation-Protection-in-the-Control-of-Occupational-Exposure>>. Acesso em: 17 jun. 2017.
18. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Protection from Potential Exposures - Application to Selected Radiation Sources.**, ICRP publication 76. Oxford, 1997.

19. TAUHATA, L.; SALATI, I.; PRINZIO, R.; PRINZIO, A. R. P. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10ª rev. Rio de Janeiro, IRD/CNEN, 2014.
20. HOFF, G., LIMA, N.W. Aplicabilidade da lei do inverso do quadrado da distância em radiologia convencional e mamografia. **Brasilian Journal of. Radiation Sciences**. V. 03, N. 1A, p. 01-16, 2015. Disponível em <<https://www.bjrs.org.br/revista/index.php/REVISTA/article/download/91/82>>. Acesso em: 13 set. 2017.
21. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements – Part 3**. Viena, 2014.
22. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **General principles for the radiation protection of workers**, ICRP publication 75. Viena, 1997.
23. SORDI, G. M. A. A. **Filosofia e técnica do monitoramento do trabalhador para radiação ionizante**. Disciplina de Pós-graduação, TNA-5732. São Paulo, s.d. Notas de aula. Disponível em <https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/200805291616360-Filosofia_e_Tecnica_de_Monitoramento_do_trabalhador.doc>. Acesso em: 02 mar. 2018.
24. SORDI, G. M. A. A. Evolução dos paradigmas de proteção radiológica. , **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p.35-41, 2009. Disponível em <<http://www.rbfm.org.br/rbfm/article/view/33>>. Acesso em 18.ago.2019
25. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação das áreas**. Posição Regulatória 3.01/004:2011 Rio de Janeiro, 2017. Disponível em : <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_04.pdf >. Acesso em: 01.ago.2019.
26. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Fundamental quantities and units for ionizing radiations (revised)**, ICRU Report No. 85A. Bethesda, 2011.
27. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, ICRP publication 103. Viena, 2007.

28. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **ESTAR: Stopping power and range table for electrons**. Disponível em: <<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>>. Acesso em: 01 ago. 2019.

29. BRUKER CORP. **Periodic table and X-ray energies**. Disponível em: <https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/X-rayDiffraction_ElementalAnalysis/HH-XRF/Misc/Periodic_Table_and_X-ray_Energies.pdf>. Acesso em: 05 mar.2018.

30. MARTINHO, L.A.P. **Mecanismos de cura de tintas – princípios básicos para formação de filmes**. Minicursos CRQ-IV, 2010. Disponível em <https://www.crq4.org.br/sms/files/file/polimeros_4_2010.pdf>. Acesso em 06/02/2018.

31. LAPIN, S. C. Comparison of UV and EB technology for printing and packaging Applications. **Radtech Report**, set/out 2008, p. 27 – 35. Disponível em <<https://www.radtech-europe.com/knowledge-center/articles/graphic-coatings-and-inks/comparison-uv-and-eb-technology-printing-and>>. Acesso em: 27 mar. 2015.

32. RUIZ, C.S. B. **Avaliação da formação e degradação de filmes de vernizes curados por radiação ultravioleta e feixe de elétrons e expostos ao envelhecimento acelerado**. 2003. 246p. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46132/tde./CarmenSBRuiz_Doctorado.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2017.

33. YAMASAKI, M. C. R. Usos de aceleradores de elétrons de baixa energia na cura de tintas e vernizes. Aspectos gerais. **Tintas & Vernizes**, v. 33, n. 120, p. 33-36, 1992. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6573/04455.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

34. RUIZ, C.S.B. MACHADO, L.D.B. Influência da taxa de dose e da velocidade de processo de cura de revestimentos por radiação UV/EB. **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 4 n. 3, parte 2, p. 1674 – 1679, 2002. Disponível em <<http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5911/094460001.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 17 jun.2017.

35. VARA, F. BRANN, W. BEREJKA, T. HANRANAN, B. COWELL, D. CARLBLON, L. SCHAPER, K. **UV/EB curing primer: inks, coatings and adhesives**. 4.ed. Illinois, Rachtech International North America, 1995.

36. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Optimization and Decision – Making in Radiological Protection**, ICRP publication 55. Oxford, 1989.
37. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Procedures for the systematic appraisal of operational radiation protection programmes**, IAEA TECDOC 430. Viena, 1987.
38. ANTILHAS EMBALAGENS EDITORA E GRÁFICA S.A. **Plano de Radioproteção** Revisão 6, Santana de Parnaíba, 2016.
39. INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incerteza de medição**. ISSO GUM, Rio de Janeiro, 2008.
40. FLUKE BIOMEDICAL, **451P Ion Chamber Survey Meter Operators Manual**. Disponível em https://www.flukebiomedical.com/sites/default/files/resources/451p_omeng0100.pdf. Acesso em: 18 Ago. 2019
41. SCHILLER, S.; HEISIG, U.; PANZER, S. **Electron Beam Technology**, New York: John Wiley & Sons, 1982. p.33,34.
42. NIST - National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce – **X-Ray Mass Attenuation Coefficients**. Available at: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab1.html> . Acesso em: 01 Ago. 2018.
43. ENERGY SCIENCES INC. **Technical training seminar Unit # 8197 Model EZ 110/120/1000 DF**, 2011.
44. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão**. Norma ABNT IEC 60947-1 5.1. São Paulo, 2013.
45. SMITH D. J. **Reliability, Maintainability and Risk**. 7th ed. 2017, London: Elsevier p.300
46. KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1989.

47. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION.
General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers,
ICRP publication 35. Viena, 1982.

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A – Placas de sinalização das portas de entrada e saída da área supervisionada com as instruções de segurança que constam no verso.
- ANEXO B – Modelo de relatório de levantamento radiométrico com indicação dos pontos de medição.
- ANEXO C – Questionário aplicado aos IOE.
- ANEXO D – Histórico de doses no período de abril/2012 a dezembro/2018
- ANEXO E – Certificado de calibração da câmara de ionização utilizada nas medições
- ANEXO F – Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador desligado.
- ANEXO G – Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador funcionando com corrente de feixe de 50 mA para energia de 110 keV
- ANEXO H – Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador funcionando com corrente de feixe de 100 mA para energia de 110 keV
- ANEXO I – Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador funcionando com corrente de feixe de 150 mA para energia de 110 keV
- ANEXO J – Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador funcionando com corrente de feixe de 200 mA para energia de 110 keV
- ANEXO K – Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à carenagem do “T” de alta tensão após retirada de blindagem extra

ANEXO A

Placas de sinalização das portas de entrada e saída da área supervisionada com as instruções de segurança que constam no verso.

Área Supervisionada

**Acesso somente a funcionários
autorizados**

**Uso obrigatório de dosímetro quando o
acelerador estiver ligado**

PROCEDIMENTOS DE EMERGÊNCIA

EM CASO DE ACIDENTE RADIOLÓGICO

- 1. Dirigir-se imediatamente ao painel de controle para acionar o botão de emergência e desligar a chave geral da fonte de alta tensão;**
- 2. Proceder a monitoração em torno do acelerador para certificar que o equipamento esteja desenergizado, o feixe desabilitado e a alta tensão desligada.**
- 3. Enviar imediatamente os dosímetros individuais para determinar as exposições individuais dos trabalhadores envolvidos;**
- 4. Comunicar ao Serviço de Proteção Radiológica no ramal 1228;**

EM CASO DE INCÊNDIO

- 1. Dirigir-se imediatamente ao painel de controle para acionar o botão de emergência e desligar a chave geral da fonte de alta tensão.**
- 2. Acionar central de alarme e a brigada de incêndio no ramal: 1270 e 1271, que tomará as devidas providências.**
- 3. Acionar o serviço de radioproteção no ramal 1228.**

ANEXO B

Modelo de relatório de levantamento radiométrico da instalação com indicação
dos pontos de medição

Data

Medidor	CI 451P	☐	GS	☐	DRGB90	☐
	SN 3108		SN033092		SN001063	

Teste de Aferição¹ ☐Fundo²

Tensão kV
Corrente mA

Realizado:

1) Fonte de Cs-137 fixada na caixa e encostada na parte sensível do medidor portátil

2) Média de 5 medições na mesa do operador

Data

Medidor	CI 451P	☐	GS	☐	DRGB90	☐
	SN 3108		SN033092		SN001063	

Teste de Aferição¹ ☐Fundo²

Tensão kV
Corrente mA

Realizado:

1) Fonte de Cs-137 fixada na caixa e encostada na parte sensível do medidor portátil

2) Média de 5 medições na mesa do operador

ANEXO C
Questionário aplicado aos IOE

Questionário sobre segurança do acelerador de elétrons (EB)

Nome _____

Função _____

Tempo na função _____

Descrição das atividades desenvolvidas no exercício da função:

1) Descreva onde o acelerador de elétrons, “EB”, se localiza.

2) Descreva a localização da área supervisionada da instalação.

3) Com que frequência você tem acesso à área supervisionada?

4) Descreva onde se localizam os dosímetros pessoais.

5) Em que situações você utiliza o dosímetro individual?

6) Descreva os sinais que indicam que o “EB” está em operação

7) Você já presenciou alguma situação anormal envolvendo o “EB”?

8) Você saberia identificar alguma situação de risco com o “EB”? Em caso positivo, descreva-a.

9) Descreva como você desativaria o acelerador em caso de emergência:

10) Você já participou de treinamentos em proteção radiológica? Quantos?

ANEXO D

Histórico de doses no período de abril/2012 a dezembro/2018.

Dosímetros individuais	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Dose acumulada no período (mSv)
IOE1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE2	ANR	ANR	ANR	-	-	-	-	0,0
IOE3	ANR	ANR	-	-	-	-	-	0,0
IOE4	ANR	ANR	-		-	-	-	0,0
IOE5	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE6	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE7	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE8	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE9	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE10	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE11	0,2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,2
IOE12	ANR	ANR	-	-	-	-	-	0,0
IOE13	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE14	ANR	ANR	-	-	-	-	-	0,0
IOE15	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE16	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE17	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE18	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE19	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE20	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE21	ANR	ANR	-	-	-	-	-	0,0
IOE22	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE23	0,2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,2
IOE24	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE25	ANR	ANR	-	-	-	-	-	0,0
IOE26	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE27	ANR	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE28	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE29	ANR	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE30	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE31	ANR	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE32	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	-	0,0
IOE33	ANR	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE37	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE38	-	ANR	-	-	-	-	-	0,0
IOE39	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE40	-	ANR	-	-	-	-	-	0,0
IOE41	-	ANR	-	-	-	-	-	0,0

Dosímetros individuais	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Dose acumulada no período (mSv)
IOE42	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE43	-	ANR	-	-	-	-	ANR	0,0
IOE44	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE45	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE46	-	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE49	-	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE50	-	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE51	-	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE52	-	-	-	-	ANR	ANR	-	0,0
IOE53	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE54	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE55	-	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE56	-	-	-	-	-	ANR	ANR	0,0
IOE57	-	-	-	-	-	ANR	ANR	0,0
IOE58	-	-	-	-	-	ANR	ANR	0,0
IOE59	-	-	-	-	-	-	-	0,0
IOE60	-	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE61	-	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE62	-	-	-	-	-	ANR	-	0,0
IOE63	-	-	-	ANR	ANR	ANR	ANR	0,0
IOE64	-	-	-	-	-	-	ANR	0,0
IOE65	-	-	-	-	-	-	ANR	0,0

Dosímetros de área	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Dose acumulada (mSv)
E D1	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,00
E D2	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,00
E D3	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	ANR	0,00
blind.ext	-	-	ANR	-	ANR	ANR	ANR	0,00

ANEXO E

Certificado de calibração da câmara de ionização utilizada nas medições

LABORATÓRIO AUTORIZADO PELO COMITÊ DE AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO - CASEC/IRD/CNEN. AUTORIZAÇÃO Nº 006/2006 DE 20 - 10 - 2006, RENOVAÇÃO EM 27-12-2018 pelo ofício Nº 359/2018.					
CÓPIA CONTROLADA	01	CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO		19 - 0061	
DATA DE EMISSÃO : 09 de janeiro de 2019			DATA DE CALIBRAÇÃO : 09 de janeiro de 2019		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> 1 - INSTITUIÇÃO TITULAR DO INSTRUMENTO <div style="border: 1px solid black; height: 50px; width: 350px; margin-top: 5px;"></div> </div> <div> CNPJ/CPF : <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; display: inline-block;"></div> </div> </div>					
2 - ESPECIFICAÇÕES DO INSTRUMENTO - Os dados do instrumento estão na tabela 1.					
Tabela 1 - Dados do instrumento NC - não consta					
	INSTRUMENTO	SONDAS			
		DE ÁREA		DE CONTAMINAÇÃO	
		EXTERNA	INTERNA	EXTERNA	INTERNA
FABRICANTE	FLUKE / VICTOREEN	-	NC	-	-
MODELO	451 - P - RYR	-	NC	-	-
SÉRIE	0000003108	-	NC	-	-
IDENTIFICAÇÃO	NC	-	NC	-	-
3 - FONTES DE RADIAÇÃO - A tabela 2 mostra as fontes utilizadas pela METROBRAS.					
Tabela 2 - Fontes de referência para área					
RADIAÇÃO	NUCLÍDEO	FABRICANTE	MODELO	ATIVIDADE ATUAL	
				TBq	Ci
GAMA	¹³⁷ Cs	JL Shepherd	28 - 8A Calibrator	0,339	9,2
	⁶⁰ Co	AECL	Eldorado 8	2,705	73,1
4 - RASTREABILIDADE - A rastreabilidade da grandeza de calibração é estabelecida pela utilização de câmaras de ionização PTW, modelos TN 32002 e TN 30013, séries 309 e 2666 acopladas ao eletrômetro PTW, modelo UNIDOS, série T1005-50423, calibrados pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes - LNMRI / IRD / CNEN (certificados LNMRI 0019/2018 e LNMRI 0018/2018).					
5 - CONDIÇÕES DE CALIBRAÇÃO					
5.1 - GEOMETRIA DE CALIBRAÇÃO - O eixo longitudinal da sonda foi posicionado perpendicularmente ao eixo central do feixe de radiação. A distância entre os centros geométricos da fonte e da sonda foi considerada como a distância de referência fonte-detetor.					
5.2 - CONDIÇÕES AMBIENTAIS - expressas como GRANDEZA : (Valor Médio ± Metade da Variação) unidade TEMPERATURA : (21,95 ± 0,45) °C PRESSÃO : (94,845 ± 0,004) kPa UMIDADE : (41,40 ± 2,40) %					
6 - RECALIBRAÇÃO - Devido às características do instrumento, recomenda-se que o mesmo seja calibrado com a periodicidade estabelecida em normas dos órgãos reguladores das atividades do usuário. Uma recalibração será necessária sempre que ocorrer qualquer dano, alteração e/ou manutenção que possa modificar a resposta do instrumento.					
7 - RESULTADOS - O método utilizado foi o de campo de radiação conhecido. Os valores medidos foram comparados com os respectivos Valores Verdadeiros Convencionais VVC , fornecidos por dosimetria dos campos de radiação utilizados, referenciados a 20 °C e 101,325 kPa, conforme procedimento PQ 020 da METROBRAS. Os resultados indicados na tabela 3, referem-se à média M de 10 medidas efetuadas para cada VVC . As incertezas expandidas U_E declaradas foram calculadas de acordo com o ISO GUM - Guia para Expressão da Incerteza da Medição, INMETRO (1998), adotando um fator de abrangência k = 2 , referente a um nível de confiança de ~ 95 %.					

CÓPIA CONTROLADA		01		CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO				19 - 0061	
Tabela 3 - Resultados do procedimento de calibração, referenciados à radiação gama do Cs-137									
FUNDO DE ESCALA		TAXA DE EXPOSIÇÃO VVC		TAXA DE EXPOSIÇÃO VVC		MÉDIA DAS MEDIDAS - M		FATOR DE CALIBRAÇÃO	INCERTEZA EXPANDIDA
						ANTES AJUSTE	APÓS / SEM AJUSTE	$F_c = VVC / M$	$U_E (\%)$
500	$\mu R/h$	100	$\mu R/h$	25,8	$nC/kg.h$	-	111	0,90	4,0
		250		65		229	240	1,04	6,9
		400		103,2		-	376	1,06	4,4
5	mR/h	1,00	mR/h	0,258	$\mu C/kg.h$	-	0,99	1,01	4,3
		2,5		0,645		2,3	2,3	1,11	6,0
		4,0		1,032		-	3,7	1,09	3,9
50	mR/h	10,0	mR/h	2,58	$\mu C/kg.h$	-	10,0	1,01	2,7
		25		6,45		23	24	1,06	5,5
		40		10,32		-	39	1,04	3,8
500	mR/h	100	mR/h	25,8	$\mu C/kg.h$	-	100	1,00	2,5
		250		65		230	237	1,05	5,4
		400		103,2		-	383	1,04	3,8
5	R/h	1,00	R/h	0,258	$mC/kg.h$	-	0,96	1,04	2,6
		2,5		0,645		2,3	2,5	1,00	5,3
		4,0		1,032		-	4,1	0,98	3,7
<p>8 - INFORMAÇÕES ADICIONAIS - Na tabela 3, os valores de VVC das taxas de exposição, apresentados em roentgen (indicação do instrumento) e C/kg (unidade correspondente do Sistema Internacional - SI), foram obtidos multiplicando-se, por 114 R/Gy, os valores de Kar (Gy) da dosimetria do campo de radiação.</p> <p>9 - OBSERVAÇÕES - Seguem os valores dos parâmetros de calibração (antes do ajuste / após o ajuste): 109 / 120 - 120 / 120 - 115 / 120 - 115 / 120 - 106 / 115, das décadas 500 $\mu R/h$ - 5 mR/h - 50 mR/h - 500 mR/h - 5 R/h respectivamente. Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao conjunto dosimétrico calibrado, nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer outros conjuntos. A reprodução deste Certificado só é permitida em sua totalidade.</p>									
									2 / 2

ANEXO F

Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador desligado.

License:
Container Info:
Company Name:
Operator Name:
Operator ID:
GPS coordinates:

INSTRUMENT INFORMATION

Description	Results
Instrument Type	RadionuclideIdentifier
Manufacturer	Thermo Fisher Scientific
Instrument Model	RIIDEye
Instrument Serial Number	Serial 10593
Probe Type	Serial 1508, Type NaI2x2

Entrance slit background 90s.N42

PHOTON DATA

Description	Results
Detector	gamma
Real Time	90.006 sec
Live Time	90.000 sec
Count Rate	89.4667 CPS
Total Counts	8052
Dose	0.00717075000 mrem

NEUTRON DATA

Description	Results
Detector	neutron
Real Time	90.006 sec
Live Time	90.000 sec
Count Rate	0.0999933 CPS
Total Counts	9

SPECTRUM INFORMATION

Description	Results
Spectrum Type	PHA
Energy Units	keV
Start Time	2019-01-14 17:56:06
Real Time	90.006 sec
Live Time	90.000 sec
Bias	710
Coarse Gain	1
Fine Gain	1.1914
Group Size	256
LLD	0.80
ULD	100.00
Zero	0.1471

ISOTOPES FOUND

NOT DEFINED

Regions of interest

ROI Name	ROI Start (keV)	ROI End (keV)	Continuum (counts)	Peak Energy (keV)	Peak Area (counts)	Peak Uncert (counts)
RXBrems	19	125	1419	74	386	795

ANEXO G

Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador funcionando com corrente de feixe de 50 mA para energia de 110 keV

Thermo
SCIENTIFIC

License:
Container Info:
Company Name:
Operator Name:
Operator ID:
GPS coordinates:

INSTRUMENT INFORMATION

Description	Results
Instrument Type	RadionuclideIdentifier
Manufacturer	Thermo Fisher Scientific
Instrument Model	RIIDEye
Instrument Serial Number	Serial 10593
Probe Type	Serial 1508, Type NaI2x2

Thermo
SCIENTIFIC

PHOTON DATA

Description	Results
Detector	gamma
Real Time	120.155 sec
Live Time	120.000 sec
Count Rate	1309.41 CPS
Total Counts	157129
Dose	0.0194354000 mrem

NEUTRON DATA

Description	Results
Detector	neutron
Real Time	120.155 sec
Live Time	120.000 sec
Count Rate	0.108194 CPS
Total Counts	13

SPECTRUM INFORMATION

Description	Results
Spectrum Type	PHA
Energy Units	keV
Start Time	2019-01-14 20:06:57
Real Time	120.155 sec
Live Time	120.000 sec
Bias	710
Coarse Gain	1
Fine Gain	1.2011
Group Size	256
LLD	0.80
ULD	100.00
Zero	0.1471

ISOTOPES FOUND

Nuclide ID	Type	Confidence	Confidence Description	Nuclide Dose Rate
Xe-133	MED	0.603	Medium	0.003546000 mrem

Regions of interest

ROI Name	ROI Start (keV)	ROI End (keV)	Continuum (counts)	Peak Energy (keV)	Peak Area (counts)	Peak Uncert (counts)
RX	19	125	8738	70	153913	833

ANEXO H

Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador funcionando com corrente de feixe de 100 mA para energia de 110 keV

Thermo
SCIENTIFIC

License:
Container Info:
Company Name:
Operator Name:
Operator ID:
GPS coordinates:

INSTRUMENT INFORMATION

Description	Results
Instrument Type	RadionuclideIdentifier
Manufacturer	Thermo Fisher Scientific
Instrument Model	RIIDEye
Instrument Serial Number	Serial 10593
Probe Type	Serial 1508, Type NaI2x2

Entrance slit_110kV_100mA.N42

Thermo
SCIENTIFIC

PHOTON DATA

Description	Results
Detector	gamma
Real Time	120.117 sec
Live Time	120.000 sec
Count Rate	1028.1 CPS
Total Counts	123372
Dose	0.016259000 mrem

NEUTRON DATA

Description	Results
Detector	neutron
Real Time	120.117 sec
Live Time	120.000 sec
Count Rate	0.0499513 CPS
Total Counts	6

SPECTRUM INFORMATION

Description	Results
Spectrum Type	PHA
Energy Units	keV
Start Time	2019-01-14 20:03:46
Real Time	120.117 sec
Live Time	120.000 sec
Bias	710
Coarse Gain	1
Fine Gain	1.2011
Group Size	256
LLD	0.80
ULD	100.00
Zero	0.1471

ISOTOPES FOUND

Nuclide ID	Type	Confidence	Nuclide Dose Rate
Xe-133	MED	0.603	Medium
			0.00360161000 mrem

Regions of interest

ROI Name	ROI Start (keV)	ROI End (keV)	Continuum (counts)	Peak Energy (keV)	Peak Area (counts)	Peak Uncert (counts)
RXBremss	19	130	5712	74.3	127119	752

ANEXO I

Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador funcionando com corrente de feixe de 150 mA para energia de 110 keV

Thermo
SCIENTIFIC

License:
Container Info:
Company Name:
Operator Name:
Operator ID:
GPS coordinates:

INSTRUMENT INFORMATION

Description	Results
Instrument Type	RadionuclideIdentifier
Manufacturer	Thermo Fisher Scientific
Instrument Model	RIIDEye
Instrument Serial Number	Serial 10593
Probe Type	Serial 1508, Type NaI2x2

Entrance slit_110kV_150mA.N42

Thermo
SCIENTIFIC

PHOTON DATA

Description	Results
Detector	gamma
Real Time	120.177 sec
Live Time	120.000 sec
Count Rate	1546.12 CPS
Total Counts	185534
Dose	0.0215038000 mrem

NEUTRON DATA

Description	Results
Detector	neutron
Real Time	120.177 sec
Live Time	120.000 sec
Count Rate	0.0665685 CPS
Total Counts	8

SPECTRUM INFORMATION

Description	Results
Spectrum Type	PHA
Energy Units	keV
Start Time	2019-01-14 20:00:42
Real Time	120.177 sec
Live Time	120.000 sec
Bias	710
Coarse Gain	1
Fine Gain	1.2011
Group Size	256
LLD	0.80
ULD	100.00
Zero	0.1471

ISOTOPES FOUND

Nuclide ID	Type	Confidence	Nuclide Dose Rate
Xe-133	MED	0.603	Medium
			0.00522489000 mrem

Regions of interest

ROI Name	ROI Start (keV)	ROI End (keV)	Continuum (counts)	Peak Energy (keV)	Peak Area (counts)	Peak Uncert (counts)
RXBremss	19	125	8381	73.6	191573	920

ANEXO J

Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à fenda de entrada com o acelerador funcionando com corrente de feixe de 200 mA para energia de 110 keV

Thermo
SCIENTIFIC

License:
Container Info:
Company Name:
Operator Name:
Operator ID:
GPS coordinates:

INSTRUMENT INFORMATION

Description	Results
Instrument Type	RadionuclidIdentifier
Manufacturer	Thermo Fisher Scientific
Instrument Model	RIIDEye
Instrument Serial Number	Serial 10593
Probe Type	Serial 1508, Type NaI2x2

Thermo
SCIENTIFIC

PHOTON DATA

Description	Results
Detector	gamma
Real Time	120.391 sec
Live Time	120.000 sec
Count Rate	3406.71 CPS
Total Counts	408805
Dose	0.0399976000 mrem

NEUTRON DATA

Description	Results
Detector	neutron
Real Time	120.391 sec
Live Time	120.000 sec
Count Rate	0.0664501 CPS
Total Counts	8

SPECTRUM INFORMATION

Description	Results
Spectrum Type	PHA
Energy Units	keV
Start Time	2019-01-14 18:00:53
Real Time	120.391 sec
Live Time	120.000 sec
Bias	710
Coarse Gain	1
Fine Gain	1.1914
Group Size	256
LLD	0.80
ULD	100.00
Zero	0.1471

ISOTOPES FOUND

Nuclide ID	Type	Confidence	Nuclide Dose Rate
Xe-133	MED	0.603	Medium
			0.00937075000 mrem

Regions of interest

ROI Name	ROI Start (keV)	ROI End (keV)	Continuum (counts)	Peak Energy (keV)	Peak Area (counts)	Peak Uncert (counts)
RXBremss	19	125	20417	71.2	415369	1357

ANEXO K

Espectro e relatório de análise de dados dos raios X de Bremsstrahlung detectados próximo à carenagem do “T” de alta tensão após retirada de blindagem extra

Thermo
SCIENTIFIC

License:
Container Info:
Company Name:
Operator Name:
Operator ID:
GPS coordinates:

INSTRUMENT INFORMATION

Description	Results
Instrument Type	RadionuclideIdentifier
Manufacturer	Thermo Fisher Scientific
Instrument Model	RIIDEye
Instrument Serial Number	Serial 10593
Probe Type	Serial 1508, Type NaI2x2

Blindagem extra_110kV_200mA.N42

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.