



# Otimização da radioproteção para um acelerador de elétrons usado em cura de tinta em filmes poliméricos

D. A. S. Rios<sup>a,b</sup> e G. M. A. A. Sordi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) / Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) /  
05508-000, São Paulo-SP Brasil

[gmsordi@ipen.br](mailto:gmsordi@ipen.br)

<sup>2</sup> INOVAFI Física aplicada à Inovação Ltda. / 13083-970, Campinas – SP, Brasil

[denise@inovafi.com.br](mailto:denise@inovafi.com.br)

---

## RESUMO

A finalidade da proteção radiológica é a proteção do indivíduo, seus descendentes e a humanidade como um todo, contra possíveis danos decorrentes do uso de radiação ionizante. Para atingir essa finalidade, foram estabelecidos três princípios básicos: da justificção, da otimização e da limitação de dose. O princípio da otimização consiste em procurar manter as exposições à radiação ionizante a níveis tão baixos quanto racionalmente exequível, levando-se em consideração fatores econômicos e sociais. Este trabalho tem por finalidade avaliar o sistema de proteção radiológica de uma instalação onde há um acelerador autobindado de Categoria I, utilizado para cura de tinta em filmes poliméricos, visando otimizá-lo nas situações nas quais for cabível. Para tal foi realizado um levantamento radiométrico nas áreas designadas para verificação da taxa de dose em diferentes distâncias do foco de radiação, nas quais há possibilidade de permanência de pessoas ou onde é possível detectar confiavelmente eventuais situações anormais na operação do acelerador. A comparação dos valores obtidos em função da corrente de operação do acelerador com a radiação de fundo natural mostrou que são compatíveis, sinalizando que o princípio da otimização já está sendo seguido.

*Palavras-chave:*

Proteção Radiológica; Otimização, Segurança de Equipamentos

---

## 1. INTRODUÇÃO

Instalações que empregam aceleradores de partículas chamam atenção por seu porte típico e, independentemente das intensidades dos feixes envolvidos, por seu potencial capacidade de causar danos quando ocorrem acidentes, por mais improváveis que estes sejam. Por esse motivo é necessário que se conheça e periodicamente se reavalie os procedimentos

operacionais e demais parâmetros relativos à segurança da instalação descritos no seu plano de proteção radiológica.

A otimização da proteção radiológica de instalações radiativas é uma ferramenta valiosa tanto na avaliação dos procedimentos empregados quanto para verificar a eficácia das medidas de segurança e dos projetos de equipamentos geradores de radiação na exposição laboral ou de indivíduos do público.

Ela tem por finalidade gerar um estado de reflexão contínuo nos responsáveis pelo controle das irradiações dos trabalhadores de uma instalação de maneira a auxiliar nas tomadas de decisão no que tange à segurança radiológica. Os instrumentos iniciadores deste processo de checagem dos resultados práticos da efetiva aplicação dos requisitos de segurança radiológica é o estudo dos levantamentos radiométricos e relatórios de dose dos indivíduos e das áreas fabris.

### **1.1. Descrição da Máquina e sua Utilidade**

Os aceleradores de elétrons estão entre as principais fontes industriais de radiação ionizante, 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 adquirindo energia cinética até atingir o alvo.

O processamento industrial de produtos por feixe de elétrons é realizado por aceleradores de elétrons de até 10 MeV para evitar a ativação de materiais estruturais ou de consumo final. Segundo o Organismo Internacional de Energia Atômica (OIEA) [1] esses equipamentos são divididos em duas categorias:

- Categoria I: Abrange equipamentos integralmente blindados, nos quais não é possível o acesso humano durante sua operação, principalmente em virtude da configuração da blindagem.
- Categoria II: Abrange equipamentos abrigados em salas blindadas que são mantidas inacessíveis durante a operação por um sistema de controle de acesso.

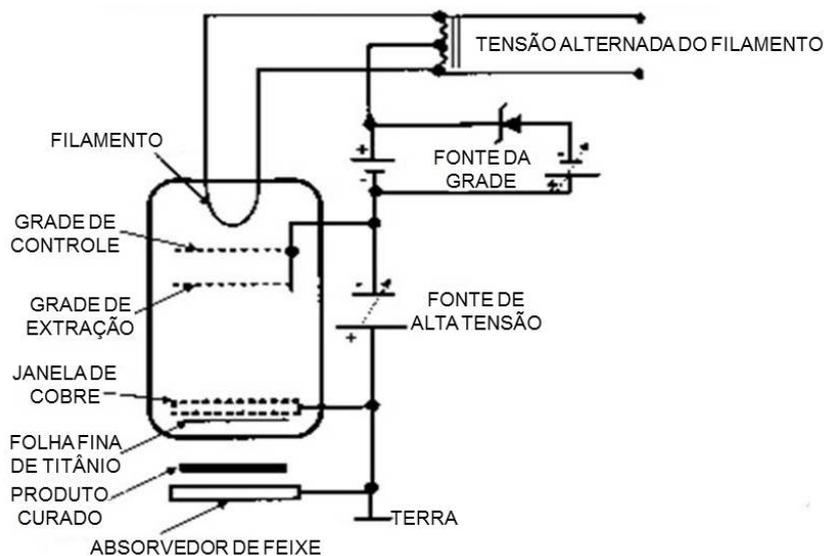
Para a aplicação na cura de tintas são utilizados aceleradores com energia de aceleração de 80 a 300 kV, sendo que particularmente para a cura de tintas utilizadas para revestimentos são utilizadas energias que vão de 70 a 125 kV.[2]. Neste tipo de aplicação, a configuração mais

econômica e de melhor geometria é a do acelerador de elétrons tipo cortina autoblindado, o que o enquadra na Categoria I, que consiste em uma unidade integralmente fechada, com intertravamentos, onde o acesso humano durante a operação não é fisicamente possível, em virtude da configuração da blindagem [3].

De acordo com o National Council on Radiation Protection & Measurements, NCRP Report 51[3], este tipo de máquina é descrito como de aceleração direta ou queda de potencial através de transformador de alta tensão.

Em particular o acelerador que é objeto dos estudos deste trabalho, apresentado na figura 2, é fabricado pela Energy Science Inc. – ESI é do tipo cortina, com tensão máxima de aceleração de 110 kV e corrente máxima de feixe de 500mA. Um esquema elétrico deste tipo de máquina é apresentado na figura 1, a seguir:

**Figura 1:** Esquema elétrico de um acelerador de elétrons tipo cortina



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 [4]. Nesse sentido, 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, já que o produto é consumido e seu invólucro descartado.

O processo de aplicação e de cura da tinta constitui uma importante etapa da industrialização de uma embalagem, pois define tanto a aparência do produto final, quanto algumas de suas características de resistência física e química, o que influencia seu nível de aceitação no mercado [5]. A maioria dos processos existentes empregam tintas e vernizes que necessitam ser diluídos em solventes que são agressivos aos trabalhadores e ao meio ambiente.

Disso decorre uma tendência crescente nesse ramo da indústria em diminuir as emissões de produtos poluentes no ambiente, para tanto se incluem sistemas de recuperação de solventes pelos quais os efluentes gasosos emitidos são tratados de modo a permitir sua reutilização. Conforme a variedade de solventes o seu tratamento implica em queima, o que torna o processo dispendioso e sem benefícios industriais, além de aumentar a emissão de gases de efeito estufa.

As tecnologias de tintas baseadas em água e curáveis por radiação ultravioleta (UV), se por um lado reduzem o volume de solventes residuais, por outro lado demandam energia térmica para secagem, no caso da primeira, e o emprego de materiais de difícil manuseio e de custo elevado no caso da segunda, além de comprometerem a velocidade de processamento.

O uso da tecnologia de cura por feixe de elétrons é bastante competitivo em virtude de diversos fatores como redução de componentes orgânicos voláteis, economia de energia, taxa de produção mais elevada e melhoria das propriedades do revestimento obtido, tudo isso redundando num processo mais inteligente, eficiente e ambientalmente correto superando o processo de cura por UV por não enfrentar dificuldades relativas à cor e à espessura da camada de revestimento, além de prescindir do uso de fotoiniciadores, que são compostos orgânicos caros e de difícil manuseio [6].

## **1.2 Processo de cura de tintas e vernizes**

Tinta é uma mistura de várias substâncias, normalmente líquida que depois de aplicada sobre uma superfície (substrato), passa por um processo de cura (secagem) transformando-se em filme sólido aderente ao substrato, proporcionando acabamento, resistência e proteção [7].

O processo de cura da tinta pode ocorrer de diversas maneiras:

### **Processo tradicional:**

Os componentes básicos de uma tinta convencional são [7]:

- 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 por emissões danosas ao meio ambiente e também podem ser inalados pelos trabalhadores, causando danos à saúde.
- Resina: Parte não volátil da tinta, responsável pela ligação dos pigmentos e adesão da tinta ao substrato, permanecendo nele após a secagem.
- Aditivos: Adicionados para conferir propriedades específicas à tinta, tais como brilho, resistência à abrasão, seleção do coeficiente de fricção etc.

Após a aplicação, as tintas secam por evaporação dos solventes. Essa evaporação pode se dar em uma estufa aquecida, por infravermelho ou mesmo em temperatura ambiente. Durante esse processo ocorrem reações entre as resinas formando polímeros tridimensionais através de ligações químicas entre as cadeias moleculares resultando em estruturas tridimensionais interligadas, num processo conhecido como reticulação. Após a secagem, permanecem sobre o substrato resinas, aditivos e pigmentos, havendo a perda dos solventes.

Essa perda de solvente ocorre desde a aplicação da tinta, fazendo com que a viscosidade aumente o que pode vir a causar danos ao processo.

### **Processo de cura por radiação:**

O processo de cura por radiação pode ser realizada pelo uso de luz UV e por feixe de elétrons (FE) para as reações de polimerização

A utilização de radiação para a cura de tintas minimiza ou evita o uso de solventes, pois se baseia na interação da tinta com a radiação incidente, formando moléculas excitadas e ionizadas que posteriormente se recombinaem nas reações de polimerização e reticulação que promoverão a adesão da tinta ao substrato [4,6].

**Processo UV:**

Neste processo, para que a reação fotoquímica de polimerização ocorra, é necessário que um fóton seja absorvido por um dos compostos da tinta, causando o estado excitado que possibilitará o início do processo.

Os componentes básicos de uma tinta curável por UV são [7]:

- Monômeros e oligômeros: Compostos orgânicos de pouca viscosidade, utilizados no lugar dos solventes, que facilitam a aplicação atuando no ajuste da viscosidade da tinta. Permanecem no revestimento curado e determinam as propriedades de aderência e flexibilidade no filme curado;
- Fotoiniciadores: Composto que converte a energia da radiação UV em energia química, necessário para o início da reação de cura;
- Pigmentos e aditivos: São geralmente os mesmos utilizados no processo tradicional, diferindo basicamente na escolha dos tipos mais adequados, dado que os pigmentos apresentam grande absorção de fótons, competindo com os fotoiniciadores e causam grande influência na velocidade de cura.

A seleção dos fotoiniciadores e pigmentos é complexa pois deve considerar não somente sua interação química como também a faixa de luz UV disponível.

**Processo FE:**

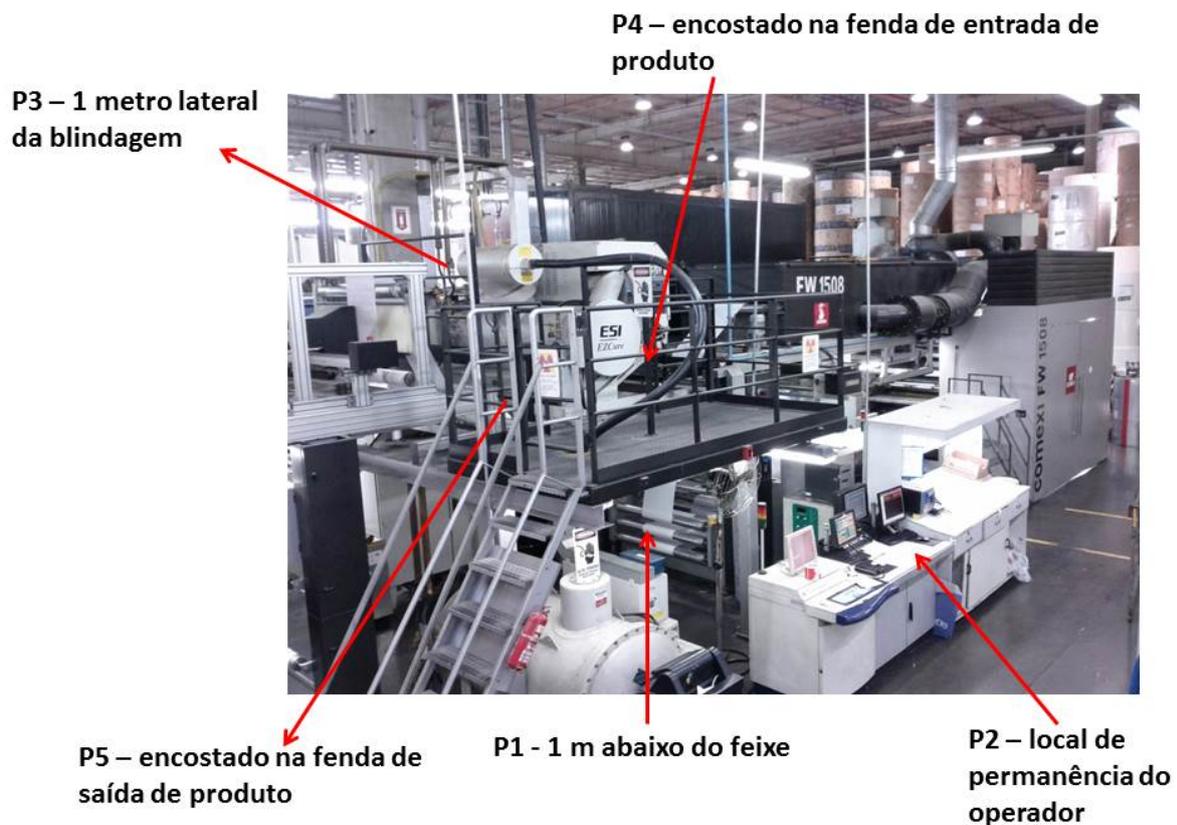
O feixe de elétrons transfere energia principalmente por colisões com os elétrons orbitais das moléculas da tinta, produzindo uma grande quantidade de átomos excitados, íons e elétrons secundários. Da recombinação desses espécimes reativos, resultará na polimerização do material irradiado que é a dissociação com mudança para tipos moleculares mais complexos, seja por adição, reticulação (ligações cruzadas) ou ramificação [6].

As reações de polimerização induzidas pelo FE dependem apenas do número de radicais livres formados no produto irradiado, dispensando então o uso de fotoiniciadores o que resulta em um produto final mais puro. 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 [6,7].

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o exame das taxas de exposição nas áreas designadas, foi utilizada uma câmara de ionização pressurizada, modelo: Fluke Biomedical Product n° 451 – RYR. As medidas foram realizadas em diferentes distâncias do foco de radiação, independente da presença constante de trabalhadores onde é possível detectar confiavelmente situações anormais na operação do acelerador. Os locais das tomadas de dados são apresentados na figura 2, a seguir:

*Figura 2- posição das medidas*



## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram medidas as taxas de dose nos pontos referenciados na figura 2 com uma câmara de ionização. Os valores obtidos estão na tabela 1 a seguir:

<i>I</i> (mA)	<i>P1</i> ( $\mu\text{Sv/h}$ )	<i>P2</i> ( $\mu\text{Sv/h}$ )	<i>P3</i> ( $\mu\text{Sv/h}$ )	<i>P4</i> ( $\mu\text{Sv/h}$ )	<i>P5</i> ( $\mu\text{Sv/h}$ )
0	0,168	0,168	0,129		
183	0,225	0,229	0,215		
183	0,220	0,182	0,208		
100	0,191	0,175	0,162		
300	0,204	0,176	0,159	0,172	0,196
300	0,189	0,158	0,167	0,159	0,180
<b>Média</b>	0,206	0,184	0,182	0,166	0,188
<b>DesvPadr</b>	0,021	0,025	0,032	0,009	0,011

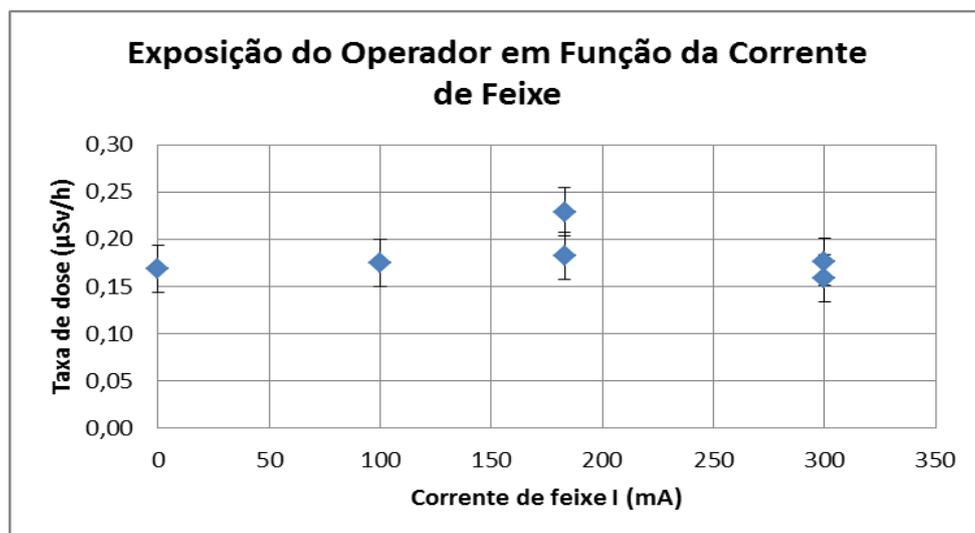
**Tabela 1** - Valores obtidos de dose para diversas correntes nos pontos de interesse

Os valores obtidos são compatíveis com a radiação natural de fundo, calculado em  $0,155\mu\text{Sv/h}$ , valor resultante da média das medidas de taxa de dose para corrente nula.

Uma comparação interessante é entre os valores obtidos para os pontos P2 (posição do operador) e P4 (na fenda de entrada de produto), que é local onde se espera o máximo valor mensurável de taxa de dose. Eles se mostraram iguais dentro do erro experimental.

De maneira análoga, o gráfico da figura 3, a seguir, mostra o comportamento da taxa de dose na posição do operador com a variação da corrente:

**Figura 3:** Gráfico da exposição do operador em função da corrente de feixe A medida com a corrente de feixe de 0 mA, foi obtida com a máquina desligada e corresponde à radiação natural de fundo no local.



### 3. CONCLUSÕES

Não foi observada variação da taxa de dose com o aumento da corrente de feixe, acima do erro experimental. Além disso, também não se percebeu variação em relação à radiação da radiação natural de fundo no local.

Segundo o Plano de Proteção Radiológica da instalação é necessária a supervisão de acesso no entorno da blindagem, quando a máquina estiver em operação. Os dados obtidos, porém, indicam que tal controle não é necessário uma vez que independente da corrente de feixe, a taxa de exposição é compatível com a radiação natural de fundo.

Até o presente momento foram tomados dados de doses nas áreas designadas da instalação, que não indicaram exposições acima do valor mínimo mensurável pelos dosímetros termoluminescentes, sejam eles de área ou de uso pessoal. Isso indica que do ponto de vista das exposições laborais, o princípio da otimização está satisfeito.

As medições realizadas indicam que o projeto do gerador de radiação, sua localização e os procedimentos de segurança adotados são adequados do ponto de vista da exposição laboral.

Futuramente, a análise dos relatórios dosimétricos de todos os trabalhadores da instalação no decorrer de 5 anos de operação da máquina poderá confirmar se os trabalhadores da instalação estão sujeitos apenas à radiação natural de fundo, como mostram os dados de dose atuais nas áreas designadas.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Antilhas Embalagens, Gráfica e Editora S/A e Descartável Embalagens Ltda. pelo apoio ao projeto e pelo acesso ilimitado à toda documentação referente à proteção radiológica de seus aceleradores autoblandados de elétrons, assim como por permitir a realização das medições necessárias.

Agradecem também ao apoio acadêmico e financeiro do IPEN / CNEN para a realização do presente trabalho.

#### 4. REFERÊNCIAS

1. IAEA International Atomic Energy Agency. **Radiation Safety of Gamma And Electron Irradiation Facilities.** IAEA SS107, Viena, IAEA, 2010. 110p. Last Available at: <[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1454\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1454_web.pdf)> Last accessed: 20 feb 2015.
2. LAPIN, S. C. Comparison of UV and EB Technology for Printing and Packaging Applications. **RadTech Report, Set/Out 2008, p. 29.** Available at: <[http://www.radtech.org/images/pdf\\_upload/compareuvebpkgsepoct2008.pdf](http://www.radtech.org/images/pdf_upload/compareuvebpkgsepoct2008.pdf)> last accessed 20 feb 2015.
3. NCRP - National Council on Radiation Protection and Measurements **Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV Particle Accelerator Facilities. NRCR Report 51.** Washington, EUA, 1977.
4. CAMPOS, A. C. S. D, et al. **Novas aplicações utilizando tecnologia UV e EB.** São Paulo, Brasil, 2005. Available at: <<http://atbcr.com.br/artigos/novasaplicacoesutilizandouveeb.pdf>> . Last accessed 20 feb 2015.
5. OLIVEIRA, M. C. F. R. **Estudo comparativo de tintas utilizando a análise do ciclo de vida.** 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos), Escola de Engenharia de Mauá, Mauá, São Paulo
6. RELA, P. R. ATBCR. **Cura por feixe de elétrons (EB),** São Paulo, 2006. Available at: <<http://atbcr.com.br/artigos/curaporfeixedeeletrons.pdf>>. Last accessed 20 feb 2015
7. YAMASAKI, M. C. R. **A cura de tintas, vernizes e revestimentos por ultravioleta e feixe de elétrons-conceitos básicos.** - ATBCR, São Paulo, Brasil, 1997.
8. ESI – Energy Sciences, Inc. **Installation Manual EZ Cure TM Model EZ110/120/1000 DF for System 8197.** Wilmington, EUA, 2009. 125p.

9. ESI – Energy Sciences Inc. **Maintenance Training EZCure™ Antilhas, Brazil Technical Training Seminar Unit#8197 Model EZ110/120/1000 DF**, Wilmington U.S.A, 2011. 212p.
10. ICRP – International Commission On Radiological Protection. **Protection From Potential Exposure – A Conceptual Framework ICRP publication 64**. Ottawa, Canada,1993.
11. ICRP – International Commission On Radiological Protection. **Protection from Potential Exposures – Application to Select Radiation sources. ICRP publication 76**. Ottawa, Canada, 1997.