



Análise de situações de exposição potencial em aceleradores de elétrons autoblindados

Rios^{a, b} D.A.S., Rios^b P. B., Sordi^a G. M. A. A., Carneiro^a J. C. G. G.

^a Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP),

Av. Prof. Lineu Prestes 2242- Cidade Universitária, 05508-000, São Paulo- SP

^b Inovafi Física Aplicada à Inovação Ltda., R. Joaquim Bernardes Borges, 445 S 01, 13300-970, Itu- SP

denise@inovafi.com.br

RESUMO

Neste estudo foram estimadas as doses decorrentes de situações de exposição potencial em uma indústria de embalagens que utiliza um acelerador de elétrons autoblindado para a cura de tintas e vernizes em substratos poliméricos. Para isso foram avaliadas as probabilidades de falhas no sistema de segurança do acelerador e realizadas simulações envolvendo duas situações acidentais que poderiam levar à exposição potencial de Indivíduos Ocupacionalmente Expostos e Indivíduos do Público. Embora estas situações de exposição sejam pouco prováveis e envolva um número pequeno de indivíduos o estudo ressalta a importância de realizar exercícios de simulação permitindo identificar as possíveis falhas de operação e as consequências radiológicas para esse tipo de evento. Os exercícios de simulação realizados apontaram a necessidade de incluir a equipe de intervenção para saneamento do acidente, representada pela brigada de incêndio a qual foi incluída nos treinamentos periódicos de proteção radiológica. Além disso, as estimativas de falha no sistema de segurança e as doses resultantes demonstraram a conformidade aos requisitos de proteção radiológica.

Palavras-chave: Proteção Radiológica, exposição ocupacional, acelerador de elétrons autoblindados.

ABSTRACT

In this study, the doses resulting from situations of potential exposure in a packaging industry that uses a self-shielded electron accelerator to cure paints and varnishes on polymeric substrates were estimated. For this, the probabilities of failures in the accelerator safety system were evaluated, and simulations were carried out involving two accidental situations that could lead to the potential exposure of Occupationally Exposed Individuals and Public Individuals. Although these exposure situations are unlikely and involve a small number of individuals, the study emphasizes the importance of performing simulation exercises, allowing the identification of possible operation failures and the radiological consequences for this type of event. The simulation exercises carried out showed the need to include the intervention team for the sanitation of the accidents, represented by the fire brigade which was included in the radiological protection training. In addition, estimates of failure in the safety system and the resulting doses demonstrated compliance with the radiological protection requirements.

Keywords: Radiological protection, occupational exposure, self-shielded electron accelerator.

1. INTRODUÇÃO

Os aceleradores de elétrons autoblandados utilizados na cura de tintas e vernizes são projetados para, em condições de operação normal, não causar uma taxa de equivalente de dose ambiente ou equivalente de dose direcional, conforme apropriado, maior do que 1 $\mu\text{Sv/h}$ a uma distância de 0,1 m de qualquer superfície acessível do aparelho [1]. Por esse motivo é esperado que as doses registradas na dosimetria individual e de área em instalações com esse tipo de equipamento sejam sempre baixas, ou seja, comparáveis com a radiação de fundo ambiental.

Essas máquinas possuem sistemas eletrônicos e travas de segurança que impedem a exposição do indivíduo durante sua utilização porém eles podem falhar e pode haver desvios dos procedimentos operacionais planejados que causam acidentes. Em virtude disso, questiona-se se existem riscos e se os requisitos de segurança e proteção radiológica estão em conformidade com as normas nacionais aplicáveis [2].

Neste trabalho foram estudadas as probabilidades de falhas no sistema de segurança de um acelerador de elétrons autoblandado, tipo cortina, com energia da ordem de 100 keV, classificado como categoria I pela Agência Internacional de Energia Nuclear, IAEA e no grupo 7, subgrupo 7B

pela CNEN [3, 4], utilizado em indústrias gráficas de embalagens na cura de tintas e vernizes em substratos poliméricos.

O acelerador em questão é um equipamento modelo EZ Cure, fabricado pela ESI Energy Sciences Inc., utilizado como estação de cura de tintas de uma das linhas de impressão flexográfica de uma indústria de embalagens flexíveis, conforme ilustrado na Figura 1. Ele encontra-se instalado sobre um mezanino de aço a cerca de 2 m de altura do chão, que é o único espaço da fábrica designado como área supervisionada (a) destacada em amarelo na Figura 1 e somente quando o acelerador estiver em operação. Por se tratar de uma estação de cura, o seu funcionamento é eletronicamente comandado pela máquina de impressão, de modo que não existe um operador específico do acelerador de elétrons. Toda a linha de impressão é controlada por um impressor e um ajudante que a operam a partir da área livre (b) e, como indivíduos do público, não têm acesso à área supervisionada, que só é acessível aos técnicos de manutenção, considerados como Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE) da instalação.

Figura 1: Localização do acelerador na fábrica. (a) área supervisionada (b) área livre.



No presente estudo foram propostos dois cenários de acidentes que poderiam acarretar exposição potencial aos indivíduos. A estes cenários e exposições são atribuídas probabilidades. 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.

A proposição e análise dos cenários de acidentes permitiram verificar a eficácia dos dispositivos e procedimentos para emergências.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Estimativa da probabilidade de falha no sistema de segurança

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 [5], 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 (1):

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

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

Arbitrando-se uma faixa de segurança de duas vezes, essa probabilidade de falha (p') é calculada pela equação (2):

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

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

$$p' = 1.10^{-7}$$

A parte eletrônica do sistema de segurança é composta por três medidores de radiação do tipo Geiger-Muller, 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 D. J. Smith [6], 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 (3):

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

$$P' = 10^{-35}$$

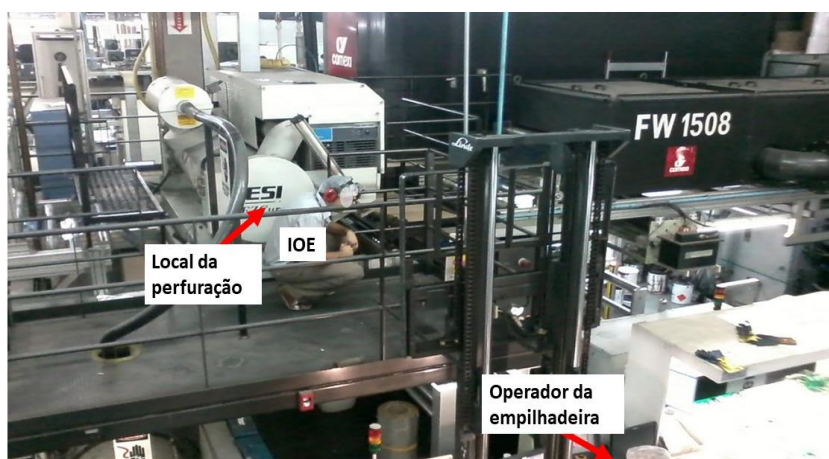
No caso de falha do sistema de segurança o acelerador pode ser desligado manualmente ao se acionar o botão de parada de emergência localizado no painel de controle da linha de impressão que se encontra em área livre.

2.2. Cenário 1: Colisão de empilhadeira contra a blindagem

Foi simulada 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 voltagem de 110 kV e corrente de 250 mA. Com a colisão a blindagem do equipamento foi perfurada pelo garfo longo da empilhadeira.

Devido à 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. O local onde o garfo da empilhadeira alcançou o acelerador está indicado na Figura 2.

Figura 2: Indicação da posição do IOE e do garfo da empilhadeira.



Em decorrência da colisão, dois trabalhadores foram expostos ao campo de radiação proveniente do acelerador: O IOE que realizava inspeção de rotina a 0,50 m de distância da blindagem e o operador da 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.

Durante a operação para o retorno à situação normal um membro da brigada de incêndio, considerado indivíduo do público, acionou o botão de emergência localizado na área livre, 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:

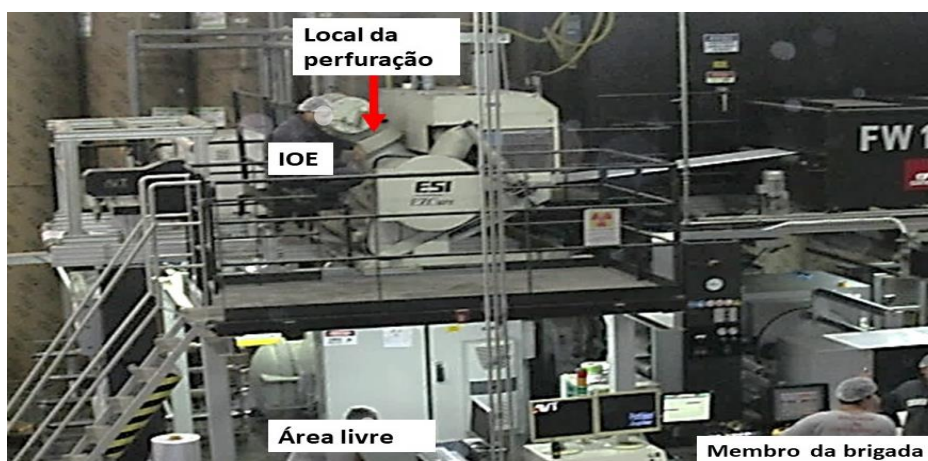
- a. Elétrons espalhados em baixos ângulos;

- b. Raios-X também espalhados a baixos ângulos provenientes de *bremsstrahlung* do feixe de elétrons incidente na estrutura do acelerador, composto basicamente de aço.

2.3. Cenário 2: Peça contundente danifica a blindagem do acelerador

Na segunda situação simulada um IOE realizava inspeção de rotina, próximo à blindagem, durante a operação da linha de impressão com o acelerador em operação 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, como mostra a Figura 3, a seguir:

Figura 3: Indicação da posição do IOE e do local de perfuração da blindagem.



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 localizado na área livre 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 50 cm. 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.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Estimativa da probabilidade de falha no sistema de segurança

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 Plano de Proteção Radiológica da Instalação aprovado pela CNEN [7].

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, A_c , por ano é calculado pela equação (4), a seguir::

$$A_c = 3 \cdot 365 = 1095 \quad (4)$$

A partir da estimativa de probabilidade de falha expressa na equação (2) para um dispositivo 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 (5):

$$\Delta T = \frac{1}{(p')^2 \cdot Ac} \quad (5)$$

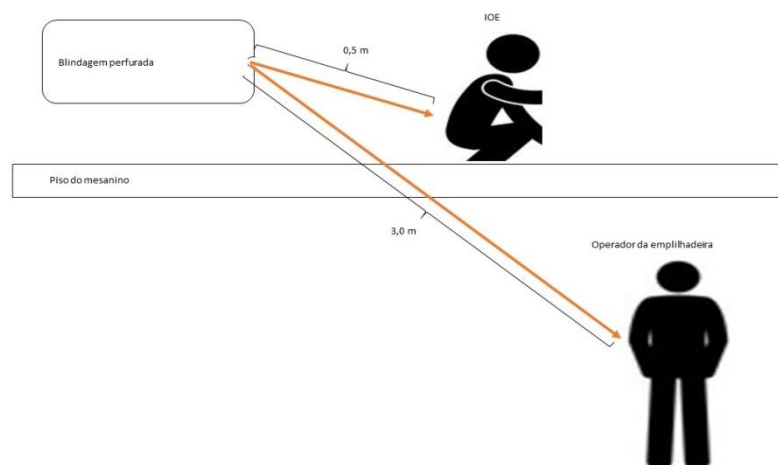
$$\Delta T = \frac{10^{14}}{1095} = 9,13 \cdot 10^{10} \text{ anos}$$

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 o quão improvável é a ocorrência deste tipo de evento, em razão dos circuitos de segurança utilizados por este acelerador de elétrons.

3.2. Colisão da empilhadeira contra blindagem

Os elétrons espalhados em baixos ângulos correspondem a aproximadamente 20% do total da corrente de feixe [8] devido à 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) [9] 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 4, a seguir:

Figura 4: Representação esquemática do cenário 1.



Para a radiação de *bremsstrahlung*, a eficiência de conversão de elétrons em raios-X na faixa de energia considerada pode ser calculada pela equação (6), onde R é a eficiência de conversão, E_e é a energia do feixe de elétrons 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 [8], assim:

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

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

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 feixe de elétrons [8]. 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, $\dot{H}^*(1)$, a 1 m de distância do feixe de 110 keV e 250 mA será de 6 Sv/h [10].

Aplicando a eficiência de conversão calculada em (6), a taxa de equivalente de dose ambiente devida aos raios-X de *bremsstrahlung*, \dot{H}_B^* , será de

$$\dot{H}_B^*(1) = 6 \cdot 0,29\% \quad (7)$$

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

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 (9):

$$(8) \quad H_c^*(0,5) = 4 \cdot \dot{H}_B$$

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

Em mSv/min corresponde a

$$\dot{H}_c^*(0,5) = 1,2 \frac{mSv}{min} \quad (09)$$

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 (10):

$$H_c^*(0,5) = \dot{H}_c \cdot \Delta t \quad (10)$$

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

O operador da empilhadeira estava a cerca de 3,0 m do ponto de ruptura, conforme mostrado na Figura 4. Neste caso, o valor do equivalente de dose ambiente obtido pela equação 11 será de:

$$H_c^*(3) = 6 \cdot \left(\frac{0,5}{3}\right)^2 \quad (11)$$

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

Como o operador ficou blindado pela estrutura do mezanino, composta por uma chapa de aço de 5 mm de espessura, é preciso considerar a energia máxima dos raios-X de *bremsstrahlung*, que corresponde a do feixe de elétrons de 110 keV. A intensidade máxima ocorre a cerca de 60% deste valor [8], ou seja, 66 keV e a atenuação da radiação eletromagnética para uma espessura de 5 mm de aço corresponderá a 98,2 % [11]. Então, o valor do equivalente de dose ambiente a que ele estará exposto é calculado pela equação (12), dada a seguir:

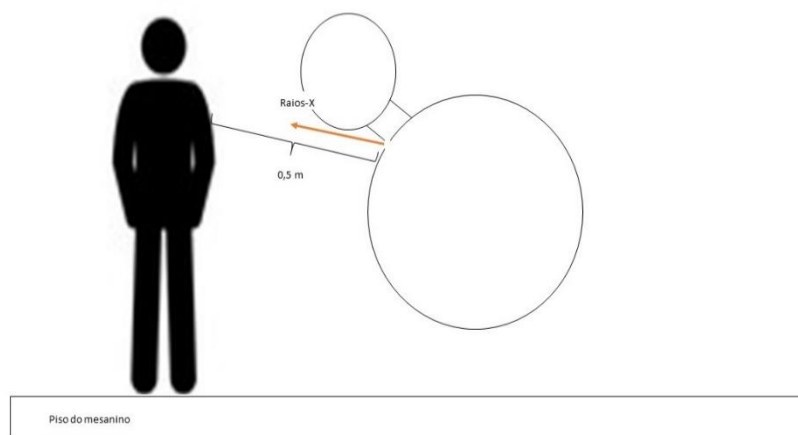
$$H^*_{at}(3) = 167 \cdot 0,018 \quad (12)$$

$$H^*_{at}(3) = 3 \mu Sv$$

3.3. Perfuração da blindagem por peça contundente

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 5.

Figura 5: Representação esquemática do cenário 2.



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 [10].

Considerando a eficiência de conversão, obtida na equação (6), a taxa de equivalente de dose ambiente é calculada pela equação (13):

$$\dot{H}'_B(1) = 6,5 \cdot 0,29\% \quad (13)$$

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

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

$$\dot{H}'^*_c(0,5) = 76 \text{ mSv/h} = 1,3 \text{ mSv/min} \quad (14)$$

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 $2,6 \text{ mSv}$.

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.

4. CONCLUSÕES

As situações consideradas indicam que os aceleradores de elétrons autoblandados podem gerar doses que ultrapassam o nível de investigação individual para IOE [12]. Considerando, porém, que a blindagem desse tipo de equipamento é bastante difícil de ser perfurada, aliado ao fato da probabilidade de falha do circuito de segurança ser da ordem de 10^{-35} , pode-se afirmar que ele é seguro o suficiente para poder ser operado em uma linha de produção convencional.

De acordo com a Comissão Internacional de Proteção Radiológica, em sua publicação ICRP 76, a probabilidade de falha abaixo de 10^{-7} deve ser considerada zero, do ponto de vista da proteção radiológica [13].

Durante as simulações, constatou-se que a equipe de brigadistas teve dificuldade em identificar que o acelerador estava em operação e como desarmá-lo por meio dos botões de emergência. A partir dessa experiência evidenciou-se a importância do treinamento periódico dos IOE e a inclusão do tema de proteção radiológica no treinamento dos funcionários da brigada de incêndio.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Antilhas Embalagens Editora e Gráfica S/A, pelo acesso irrestrito à linha de impressão com cura por feixe de elétrons e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pelo apoio a este trabalho.

REFERENCIAS

- [1] ENERGY SCIENCES, INC. **Customer Documentation System 8197 V02**, Operations and maintenance manual, Wilmington, 2007. p.3-8.
- [2] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes básicas de proteção radiológica**. - Norma CNEN NN 3.01 Resolução CNEN 164/14 República Federativa do Brasil, Brasília, D.O.U. 11/03/14. Available at:
<<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>>. Last accessed: 10 Nov 2018.
- [3] IAEA - International Atomic Energy Agency – **Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities**. Specific Safety Guide No SSG-8, Vienna, 2010. Available at:
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1454_web.pdf>. Last accessed: 10 Nov. 2018.
- [4] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Licenciamento de instalações radiativas** - Norma CNEN NN 6.02 Resolução CNEN 215/17, República Federativa do Brasil, Brasília, D.O.U. 30/06/17. Available at: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm602.pdf>>. Last accessed: 10 Nov. 2018.
- [5] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão**, Norma ABNT NBR IEC 60947-1 5.1. São Paulo, 2013.
- [6] SMITH D. J. **Reliability, Maintainability and Risk**, 7th Edition, 2017, London: Elsevier p.300

- [7] ANTILHAS EMBALAGENS EDITORA E GRÁFICA S.A. **Plano de Radioproteção Revisão 6, Santana de Parnaíba**, 2016.
- [8] SCHILLER, S.; HEISIG, U.; PANZER, S. **Electron Beam Technology**, New York: John Wiley & Sons, 1982. p.34.
- [9] NIST - National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce - **ESTAR – Stopping Power and Range Tables for Electrons**. Available at: <<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>>. Last accessed: 10 May 2018.
- [10] SCHILLER, S.; HEISIG, U.; PANZER, S. **Electron Beam Technology**, New York: John Wiley & Sons, 1982. p.33.
- [11] 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> . Last accessed: 10 May 2018.
- [12] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Restrição De Dose, Níveis De Referência Ocupacionais E Classificação De Áreas Posição Regulatória 3.01/004:2011** República Federativa do Brasil, Brasília, D.O.U. 30/06/17. Available at: http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_04.pdf Last accessed: 10 May 2018.
- [13] ICRP – International Commission on Radiological Protection. **Protection from Potential Exposures - Application to Selected Radiation Sources**. Publication 76, 1997.