

# Análise de cenário envolvendo incêndio em material radioativo orientado à resposta à emergência

Rodrigo Werner da Silva, Wilson Freitas Rebelo da Silva Junior, Edson Ramos de Andrade  
Instituto Militar de Engenharia (IME)  
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,  
Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

**RESUMO:** O presente trabalho fundamenta-se no estudo de cenário envolvendo incêndio em irradiadores de sangue, tendo como base o HEMORIO, devido ao fato de se possuir tal equipamento e de situar-se em área densamente povoada. Usando cenário hipotético, tentou-se aproximar ao máximo de uma situação realista usando curvas de incêndio padronizadas que forneceram dados de entrada para o software HotSpot Health Physics code para estimar as doses equivalentes efetivas totais (TEDE) para a população afetada pela dispersão do radionuclídeo na atmosfera. Os resultados foram tratados e inseridos para a análise de riscos de indução de leucemia, tomando por base os relatórios sobre efeitos biológicos das radiações ionizantes (BEIR V e VII). Isso permitiu analisar as consequências de incêndio em irradiadores de sangue que façam uso de fontes de Cs-137 e auxiliar nas medidas de prevenção, mitigação, preparação e resposta, possibilitando a proteção das comunidades potencialmente em risco de desenvolvimento de câncer.

**PALAVRAS-CHAVE:** Incêndio em material radioativo, radiação ionizante, risco, leucemia.

**ABSTRACT:** This study was based on the evaluation of a scenario involving fire in blood irradiation equipment, taking as a basis the HEMORIO, due to owning such equipment and be situated in densely populated area. Although the scenario is hypothetical, there was an effort to approach to reality by considering standardized fire curves which provide input data to the HotSpot Software Health Physics to estimate the population's Total Effective Dose Equivalent (TEDE) due to atmospheric dispersion. The Results were also treated and inserted as input for risk evaluation of induction of leukemia by mathematical means based on reports of Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR V and VII) depending on the dose level. The study of the scenario allowed inferring the consequences of a fire in blood irradiators that use Cs-137 sources assisting in the prevention, mitigation, preparedness and response, enabling the protection of potentially at-risk communities.

**KEYWORDS:** Fire in radioactive material, ionizing radiation, risk, leukemia.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso difuso da energia nuclear na Saúde por meio da Medicina proporciona uma tendência de concentração de equipamentos dotados de material radioativo em áreas urbanas densas onde se encontram vários hospitais e clínicas realizando procedimentos envolvendo tais materiais. Em caso de exposição a situações críticas de segurança, como um incêndio, tais equipamentos podem contribuir para considerável aumento dos índices de degradação ambiental, o que inclui a real possibilidade de exposição ao perigo não só de trabalhadores como também do público em geral. Um cenário desta natureza é crítico, intrincado e de difícil solução, podendo acarretar imensos prejuízos tanto sociais como econômicos (SANTOS, 2015) [1].

Desta forma, dispor de ferramentas metodológicas que permitam avaliar consequências resultantes das atividades humanas, de qualquer natureza, sobre os seres humanos e a biosfera, pode ser um caminho para a garantia da segurança e da manutenção da vida. Este desafio emerge não só das consequências dos efeitos radioativos sobre seres humanos e o espaço físico, mas também da ignorância sobre este tipo de urgência. A escolha do cenário para os estudos propostos no presente trabalho foi feita, tomando por base as pesquisas relativas ao material radioativo capazes de representar uma ameaça potencial em uma região densamente povoada no Estado do Rio de Janeiro.

De acordo com, Suzane de Alencar Vieira (VIEIRA, 2015), o acidente com o Cs-137 em Goiânia no ano de 1987 foi considerado o maior acidente radiológico em área urbana do mundo, de modo a provocar o medo de novas ocorrências, tornar os efeitos danosos conhecidos e aprofundar os estudos relativos à prevenção, preparação, mitigação e resposta. O Cs-137 encontra-se, dentre outras aplicações, em irradiadores de sangue, em atividades consideradas de interesse para

o presente estudo, cujas doses equivalentes efetivas totais (TEDE) geradas por sua queima podem ser estimadas, bem como os principais efeitos sobre uma população afetada [2].

O HEMORIO, local escolhido para o estudo, encontra-se situado na região central do município da Cidade do Rio de Janeiro. Destaca-se como um centro de referência em Hemoterapia, que apresenta, em seus protocolos, as indicações de dose de irradiação de 25 Gy em hemocomponentes irradiados para reduzir o risco de Doença do Enxerto Contra Hospedeiro (DECH) [3].

Embora sejam verificadas medidas de segurança previstas legalmente em âmbito nacional e, para os irradiadores de sangue, sejam equipamentos selados, o histórico de eventos adversos mostra que deve sempre haver a preocupação com a violação, intencional ou não de uma fonte e que as possibilidades devem ser aventadas, tais como um incêndio, que pode consumir uma fonte já violada ou não.

A importância das ações de prevenção, além da preservação de vidas e bens, está relacionada aos elevados esforços e custos inerentes à recuperação dos cenários. O estudo de cenário envolvendo incêndio em local contendo material radioativo permite, por meio da identificação dos possíveis riscos primários e secundários da combustão, sugerir efetiva orientação aos procedimentos a serem adotados por diversas agências normalmente envolvidas nas ações de prevenção, mitigação, preparação e resposta, identificando-se as ameaças e vulnerabilidades imediatas com efeito sobre futuros comprometimentos e fragilidades.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O critério de escolha da fonte tem amparo no TE-CD-1344 da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2003), que trata da categorização de fontes radioativas e apresenta, no seu apêndice II, as fontes em seus relati-

vos usos, atividades e riscos atribuídos. Deste documento foi verificado que o Cs-137 é utilizado na irradiação de sangue, tem atividades entre 440 e 37 TBq, e classe de risco 1, no qual se observa a relação  $A/D \geq 1000$ , onde A é a atividade da fonte e D, o potencial de fontes para causar efeitos determinísticos, de modo que esse equipamento se apresenta de maneira satisfatória para as expectativas do presente estudo [4].

Devido à falta de acesso ao interior da edificação e à inviabilidade de inventariar os materiais que poderiam queimar, caso o ambiente em que se encontra o irradiador fosse incendiado, a carga incêndio foi calculada por meio da Instrução Técnica de número 15 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (CB/PMESP, 2015) que define um cenário típico para o tipo de edificação e atividade tratada neste trabalho [5].

Na ausência de dados que pudessem conferir maior realidade ao trabalho, as curvas padronizadas foram consideradas como a função temperatura da atmosfera do ambiente compartimentado, por meio das tabelas e gráficos de incêndio-padrão, de modelos idealizados para análises experimentais. Admitindo-se que a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas obedeça às curvas padronizadas, torna-se viável conhecer a evolução temporal do incêndio.

Os parâmetros relacionados às características locais da edificação e do local onde se encontra, da fonte e da queima do material foram inseridos no código *HotSpot*, que, como foi mencionado, apresenta um modelo conservativo para estimar a dose e a concentração de radionuclídeos como resultado da liberação de materiais radioativos (SHIN and KIM 2009; THIESSEN et al, 2009) [6].

Com o objetivo de aproximar um cenário realístico em uma situação de incêndio, compatível com as curvas obser-

vadas em um incêndio-padrão para materiais celulósicos, material predominante nos mobiliários e nas divisórias, foi adotado o tempo de 15 minutos, onde se observam em tais curvas, temperaturas superiores a 700°C, e nas quais a taxa de calor começa a diminuir. E então, com base nessas tabelas e gráficos, foram calculados os parâmetros relativos ao incêndio que alimentaram o código [7].

As tabelas extraídas das simulações do *HotSpot* permitiram estabelecer cenários críticos, tanto em relação aos níveis de doses observados, quanto no número de pessoas afetadas, viabilizando a análise de potenciais consequências e orientação da resposta à emergência. É possível também, utilizando as equações BEIR V e/ou VII, avaliar as probabilidades do desenvolvimento de câncer na população afetada, permitindo que os órgãos de saúde pública estabeleçam medidas que venham a minimizar essas consequências que podem ter impactos catastróficos na economia local no futuro quando se consideram os tratamentos e indenizações solicitadas por via judicial [8].

Com isso, foram calculados os excessos de risco relativos (ERR) e as probabilidades de causa (PC) para toda a população afetada e para ambos os sexos, conforme as equações mencionadas para idades da exposição menores que vinte anos e tempos de exposição abaixo de quinze anos, entre quinze e vinte cinco anos, e acima de vinte e cinco anos, e para idades de exposição superiores a vinte anos, e tempos de exposição menores que vinte e cinco anos, entre vinte e cinco anos e trinta anos, e acima de trinta anos. Olhe a gravura aí embaixo:

Exposição pessoal do público ao risco de desenvolvimento de câncer



Fig 1: Resumo da metodologia utilizada.

DADOS SIMULAÇÃO HOTSPOT											
MATERIAL	MEIA VIDA	ATIVIDADE	TEMPO	TAXA DE CALOR	CALOR ESPECÍFICO	VOLUME	TEMPERATURA DO AR	VELOCIDADE	DENS. DEM. Z. NORTE (Hab/Km <sup>2</sup> )		
Cs137	30 ANOS	4,4E+14Bq	15MIN	2,6E+7Cal/s	4062 Cal/g	2710 gal	23°C	0,5m/s	10,185		
COMPARATIVO DE ALTURA											
ALTURA m	DMD (Km)	Max DETE (Sv)	INTERNA			MÉDIA			EXTERNA		
			DMD (Km)	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	Habitantes	DMD (Km)	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	Habitantes	DMD (Km)	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	Habitantes
10	0,01	674,00	0,56	0,058	590,73	0,71	0,09	916,65	5,10	2,30	23425,50
20	0,07	8,80	0,9	0,12	1222,20	1,2	0,2	2037,00	6,80	4,20	42777,00
30	0,15	2,50	1,1	0,16	1629,60	1,5	0,29	2953,65	9,50	7,50	76387,50
40	0,23	1,20	1,2	0,18	1833,30	1,7	0,35	3564,75	12,00	11,00	112035,00
50	0,30	0,65	1,3	0,18	1833,30	1,8	0,38	3870,30	15,00	15,00	152775,00
60	0,37	0,38	1,3	0,17	1731,45	1,9	0,39	3972,15	17,00	18,00	183330,00
70	0,47	0,25	1,3	0,14	1425,90	1,9	0,37	3768,45	18,00	21,00	213885,00
80	0,57	0,17	1,2	0,096	977,76	1,9	0,33	3361,05	20,00	24,00	244440,00
90	0,69	0,12	1,1	0,042	427,77	1,8	0,27	2749,95	21,00	26,00	264810,00
100	0,81	0,09	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	-----	1,7	0,2	2037,00	23,00	28,00	285180,00
120	1,00	0,06	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	-----	1,4	0,039	397,22	25,00	31,00	315735,00
150	1,40	0,03	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	-----	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	-----	27,00	34,00	346290,00
750	8,20	1,59E-03	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	-----	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	-----	21,00	12,00	122220,00
1000	9,90	1,21E-03	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	-----	NÃO EXCEDIDO	NÃO EXCEDIDO	-----	17,00	5,30	53980,50
LEGENDA	Sv	Ref.: Norma CNEN-NN-3.01.									
INTERNA	0,10	Área de controle operacional cujo limite de dose em situações de emergência para executar ações de prevenção de situações catastróficas é atingido.									
MÉDIA	0,05	Área de controle operacional cujo nível de ação para evacuação de população em situações de emergência é atingido.									
EXTERNA	0,001	Área de controle operacional cujo limite anual para público em situação em operação normal é atingido.									
DMD	DISTÂNCIA DA MÁXIMA DOSE - Distância em que se observa a maior dose.										
MAX DETE	MÁXIMA DOSE EQUIVALENTE TOTAL EFETIVA.										
NÃO EXCEDIDO	Indica que os limites de dose definidos para as condições de contorno não foram atingidos.										

Fig 2: Distribuição da dose em função da altura da dispersão atmosférica.

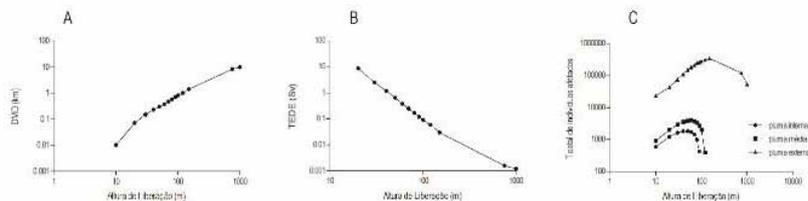


Fig. 3. (a) Máxima distância de dose em função da altura da dispersão atmosférica, (b) Dose equivalente total efetiva em função da altura da dispersão atmosférica e (c) Indivíduos afetados nas áreas de controle operacional interna, média e externa em função da altura da dispersão atmosférica.

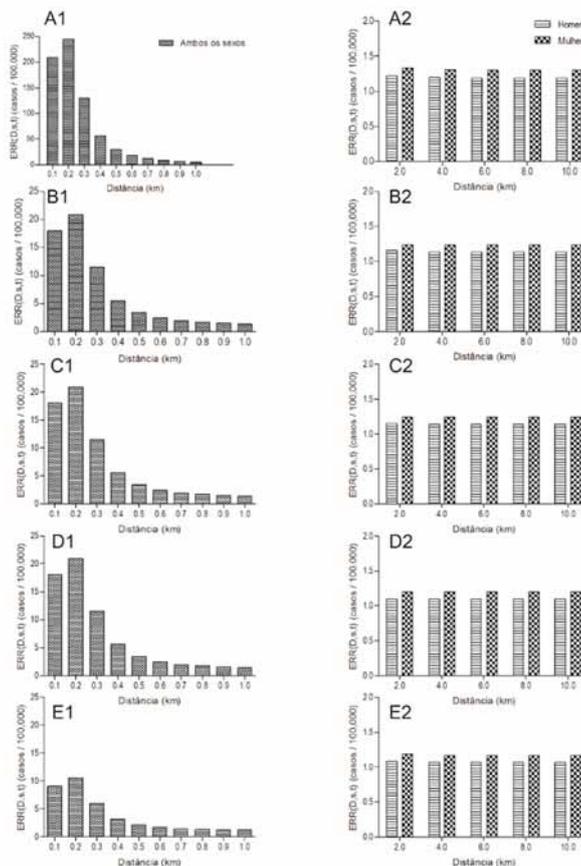


FIG. 4. Relação entre o excesso de risco relativo e a distância de máxima dose para homens e mulheres, tomando por base as variáveis a = Idade na exposição, T = tempo desde a exposição e para a radiação gama do Césio 137 e análise através do BEIR V ou VII: (A1) a<sub>≤20</sub>, T<sub>≤15</sub> e BEIR V, (A2) a<sub>≤20</sub>, T<sub>≤15</sub> e BEIR VII, (B1) a<sub>≤20</sub>, 15<T<sub>≤25</sub> e BEIR V, (B2) a<sub>≤20</sub>, 15<T<sub>≤25</sub> e BEIR VII, (C1) a<sub>≤20</sub>, T<sub>>25</sub> e BEIR V, (C2) a<sub>≤20</sub>, T<sub>>25</sub> e BEIR VII, (D1) a<sub>>20</sub>, T<sub>≤25</sub> e BEIR V, (D2) a<sub>>20</sub>, T<sub>≤25</sub> e BEIR VII, (E1) a<sub>>20</sub>, 25<T<sub>≤30</sub> e BEIR V, (E2) a<sub>>20</sub>, 25<T<sub>≤30</sub> e BEIR VII.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A população afetada nas áreas de controle operacional definidas a partir da Norma CNEN 3.01. [9] apresentou a mesma característica para as três condições de contorno, porém com valores distintos, sendo os números máximos de habitantes afetados encontrados nas áreas relativas às alturas de dispersão atmosféricas de 50, 60 e 150m para as áreas interna, média e externa respectivamente, conforme Fig. 2.

A partir das informações da tabela, foi possível verificar as tendências de distribuição das doses de radiação em função das alturas de dispersão atmosférica, onde se pode observar que as máximas distâncias de dose tendem a aumentar com a altura, conforme gráficos da Fig. 3.

Então, de posse desses dados, foi possível verificar, por meio do uso das equações do BEIR, os excessos de risco relativos, conforme Fig. 4.

Uma vez conhecidos os possíveis cenários desencadeados por um acidente e suas consequências, estimáveis a partir das tabelas e figuras até aqui apresentadas, pode-se, após a ocorrência de um acidente real, estimar os danos relacionados às máximas doses, máximas distâncias de dose, áreas atingidas por cada condição de contorno e a população afetada, podendo se identificar informações relevantes para tomadas de decisão, tais como:

- Alcance da pluma com dose de 1mSv em até 27Km, podendo chegar a expor mais 346.000 indivíduos ao limite de doses para público em situação operacional normal;
- Aproximadamente 3.900 indivíduos afetados por doses superiores a 50mSv, considerado o nível de ação para evacuação da população em situação de emergência;
- Cerca de 1.800 indivíduos afetados por doses superiores a 100mSv, considerado o limite de dose em situações de emergência para executar ações no intuito de prevenir o desenvolvimento de situações catastróficas;
- Excesso de Risco Relativo em até 15 indivíduos a 200m da fonte para doses agudas, mostrando a necessidade de preocupação com a população fixa do prédio e com os respondedores;
- Maior vulnerabilidade para indivíduos que receberem doses com idade inferior a 20 anos para doses agudas, favorecendo a composição de equipes de resposta compostas por indivíduos de idade mais elevada;
- Excesso de Risco Relativo em até 45 indivíduos para baixas doses, isto é, para a população fluminense;
- Maior vulnerabilidade para mulheres que receberem baixas doses.
- Os gráficos apresentados na FIG. 4. permitem também estudos para a redução de risco absoluto e análises estatísticas de números necessários a tratar, evitando-se o tratamento de toda a população e facilitando a triagem dos afetados além de servir de apoio à tomada de decisão, uma vez que lista possíveis cenários que podem ser comparados em uma situação de emergência real futura, bem como investigações de relação causal das eventuais enfermidades que afetem a população exposta.

### 4. CONCLUSÃO

Assim, com base no conhecimento dos riscos associados a um possível incêndio em irradiadores de sangue que façam uso de material radioativo, pode-se estimar previamente suas

consequências, de modo a permitir o devido planejamento de ações preventivas, preparatórias, mitigatórias e de resposta capazes de reduzir as consequências na população potencialmente afetada.

Em síntese, podem ser listados alguns procedimentos de auxílio à redução de riscos de desastres envolvendo incêndios em materiais radioativos:

- Conhecimento e identificação prévia dos riscos;
- Controle de acesso à fonte;
- Capacitação específica de profissionais que habitem edificações que possuam irradiadores, mesmo que suas atividades não sejam diretamente relacionadas aos mesmos, quanto às medidas preventivas;
- Uso de medidas de orientação de evacuação de público;
- Utilização de dispositivos fixos e portáteis de combate a incêndios para primeira resposta, evitando-se atingir a queima generalizada;
- Revisão de legislação relativa à prevenção e combate a incêndios, tratando especificamente de materiais radioativos;
- Criação de Planos Operacionais Padrão para operações integradas nas ações de combate a incêndios em materiais radioativos;
- Elaboração de planos de contingências específicos para a ameaça de incêndios em material radioativos; e
- Realização de simulados multiagências.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Santos. J. R; Qualharine. E. L.. Proteção contra incêndio em instalações nucleares - fator de integração da segurança. XII SIMPEP - Bauru, SP. 2005.
- [2] Vieira, Suzane de A.. Estudo sobre fatores causais, consequências e ações de resposta no acidente com Césio 137 em Goiânia/GO. Revista emergência. Edição 2/2015, novo Hamburgo-RS, p. 10, fev. 2015. Entrevista concedida a Josué dos Santos.
- [3] Instituto Estadual de Hematologia do Rio de Janeiro – Hemorio. Projeto de adequação do Hemocentro Público. Avaliação pós-ocupação, diagnóstico energético e etiquetagem do nível de eficiência energética. Brasília, 2012.
- [4] International Atomic Energy Agency–IAEA. Categorization of Radioactive Sources. IAEA –TECDOC –1344. 2003.
- [5] Corpo de Bombeiros – Polícia Militar do Estado de São Paulo (CB-PMESP). Controle de fumaça. Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros. IT 15:04. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2004.
- [6] National Atmospheric Release Advisory Center-NARAC. Hotspot Health Physics Codes. Lawrence Livermore national laboratory livermore, CA, USA. 2013.
- [7] COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais. In: V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. Anais. São Paulo: EPUSP, 2003.
- [8] Biological Effects Of Ionizing Radiation V (Beir V). National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Natl Acad. Press. Washington, DC. 1990.
- [9] Comissão Nacional de Energia Nuclear; Ministério da Ciência e Tecnologia. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Norma CNEN-NN-3.01:2011. Rio de Janeiro: CNEN. Setembro de 2011.