

## O estudo de caso da dose efetiva de radiação ionizante no voo da aeronave T-27 Tucano da Força Aérea Brasileira

Manoela Alves Pires<sup>1</sup>  
Bruno Eduardo Teixeira<sup>2</sup>  
Alan Rodrigo Marinho Gualberto<sup>3</sup>  
Vinicius Jacobi Quatrin<sup>4</sup>

### Resumo

O presente trabalho teve como principal objetivo analisar a incidência média da dose efetiva de radiação cósmica que afeta os pilotos que voam na aeronave T-27, durante o curso de formação de oficiais aviadores da Academia da Força Aérea Brasileira, a partir de dados de voo como altitude, velocidade, coordenadas geográficas e tempo de voo inseridos no programa *Flight Cosmic Radiation Dose* (FLICRAD). Os resultados obtidos apresentaram uma média de 0,953654  $\mu\text{Sv}$  por voo no T-27, e isso permite concluir que seriam necessárias aproximadamente 2.429 horas desse tipo de voo para se obter a dose mínima de segurança prevista. Com um curso de aproximadamente 91 horas de voo, os alunos/cadetes, pilotos do T-27, teriam 0,0375 % da dose anual prevista de 1  $\text{mSv}$ . Nesse contexto, este trabalho concluiu que a dose efetiva, no voo do cadete, não tem influência significativa no seu acúmulo anual de radiação cósmica.

**Palavras-chave:** Radiação cósmica. *Low*-LET. Aeronave militar. Programa FLICRAD.

---

<sup>1</sup> Doutora e Mestre em Ciências da Engenharia de Alimentos pela Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo e bacharel em Química pela Faculdade Oswaldo Cruz. E-mail: manoela.alvespires@hotmail.com.

<sup>2</sup> Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo, mestre em Gestão e Inovação na Indústria Animal pela Universidade de São Paulo e bacharel em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Central Paulista. E-mail: eduardobet@fab.mil.br.

<sup>3</sup> Doutor e mestre em Ciências e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo e graduado em Física pela Universidade Federal de São Carlos. E-mail: alan.gualberto@anhanguera.com.

<sup>4</sup> Bacharel em Administração e Ciências Logísticas pela Academia da Força Aérea (AFA). E-mail: quatrinvj@fab.mil.br.

## 1 Introdução

A radiação é energia que se propaga por uma fonte emissora e se apresenta em forma de partículas atômicas ou subatômicas energéticas (OKUNO, 2013). Segundo Gonçalves *et al.* (2008), a radiação eletromagnética pode ser classificada em dois tipos: ionizante e não ionizante. A radiação não ionizante enquadra a maior parte daquela que se propaga através de ondas eletromagnéticas, como exemplo, podem ser citadas as ondas mais conhecidas como: ultravioleta, infravermelho, luz visível e ondas de rádio. Já a radiação ionizante tem a capacidade de ionizar outros materiais, como a radiação gama, raios-X e raios cósmicos (ou radiação de fundo) (GONÇALVES; FARIAS; GONÇALVES, 2008).

A radiação cósmica é a intensidade de energia ionizante proveniente do espaço com a qual a Terra é bombardeada (OKUNO, 2013). Essa energia é distribuída para a Terra de diversas formas, por meio de um espalhamento, e entre elas estão o infravermelho e ultravioleta (GONÇALVES; FARIAS; GONÇALVES, 2008). Porém as camadas da atmosfera conseguem absorver essas ondas até que, em superfície, o nível de radiação atinja um nível aceitável aos seres humanos, uma vez que a radiação interage com corpos, incluindo os dos humanos. Essa interação depende do tipo da energia da radiação e do meio absorvedor (OKUNO, 2013).

Entretanto, a radiação cósmica varia proporcionalmente com a altitude e latitude. Quanto maior a latitude e/ou a altitude maior a incidência daqueles raios (compostos principalmente de partículas subatômicas), por terem mais energia relativa, pois perdem menos energia para a atmosfera (FIORAVANTI, 2012).

Nesse contexto, pilotos e tripulantes de aeronaves estão mais expostos à radiação cósmica, devido à altitude de voos convencionais, sendo que, os efeitos biológicos das radiações ionizantes, como a cósmica, aos seres humanos podem variar de acordo com várias características, tais como: estágios da ação, mecanismos de ação, natureza dos efeitos biológicos, dose limiar e outros (OKUNO, 2013).

De acordo com Xavier *et al.* (2014), qualquer indivíduo que tenha sido exposto à radiação poderá desenvolver ou manifestar efeitos somáticos em longo prazo, e esses são classificados como estocásticos, de consequência direta ou indireta. As consequências diretas são as somáticas, ou seja, são o resultado da exposição ao próprio organismo, e as indiretas são da herança genética, fornecidas por outros organismos. Os efeitos estocásticos ocorrem, normalmente, em indivíduos ocupacionalmente expostos, em longo prazo, que não necessitam de dosagens mínimas para desenvolvimento de patologias.

A radioatividade pode causar nos seres humanos efeitos como: câncer, leucemia, tumores benignos, aumento dos níveis de colesterol, diminuição da fertilidade e do crescimento, aberrações cromossômicas, mutações em células sanguíneas, danos no sistema imunológico, efeitos neurológicos, retardamento mental, efeitos psicológicos, efeitos no processo do envelhecimento, geração de radicais livres, catarata (TEMPORAL, 2005). Mas nem todos esses efeitos se adaptam à realidade dos passageiros, pilotos e tripulações. Para os que voam regularmente, o risco mais comum é o aparecimento de câncer, tanto para si quanto para um descendente, em decorrência do acúmulo de radiação (COPELAND; FRIEDBERG, 2013).

Em estudo realizado por Band *et al.* (1996), pilotos da empresa *Air Canada* que trabalharam por pelo menos um ano, entre 1950 e 1992, foram avaliados quanto à mortalidade, incidência de câncer e risco de leucemia. Os resultados indicaram que os avaliados apresentaram maior incidência de leucemia mieloide aguda do que a população comum. Aqueles autores sugeriram que um monitoramento da exposição da radiação em voo, em longo prazo, seria necessário para a avaliação da incidência de câncer e do risco de leucemia nesse grupo ocupacional.

Desde então, diferentes estudos sobre a radiação durante os voos têm sido abordados (BARTLETT, 2004; FEDERICO *et al.*, 2012; FORTES *et al.*, 2017; KYLLONEN; LINDBORG; SAMUELSON, 2001; LINDBORG *et al.*, 2004), uma vez que a aviação está diretamente envolvida nesse processo, pois as aerovias são o próprio fluido atmosférico. Dessa forma, mesmo havendo uma atenuação do feixe por parte das camadas da atmosfera, as pessoas estão expostas à radiação durante todos os voos, pois esta sempre chega à Terra, assim como os aviários ficam expostos à radiação cósmica secundária em voos, uma vez que a atmosfera terrestre a degrada (OKUNO, 2013).

Com a modernização da aviação, o trânsito das aeronaves se dá em altitudes maiores do que as de antigamente. Assim, sem a proteção da camada mais densa da atmosfera – a troposfera –, os pilotos estão expostos a maiores níveis de radioatividade e raios cósmicos (TEMPORAL, 2005).

A aeronave Embraer 312, batizada na Força Aérea Brasileira (FAB) por T-27 Tucano, é um exemplo de avião amplamente utilizado na instrução dos cadetes da Academia da Força Aérea (AFA), e, por esse motivo, tal utilização possibilita certa facilidade na obtenção de informações, o que torna viável a pesquisa primária com esclarecimento de dúvidas. Há a hipótese de que o grupo dos cadetes aviadores está mais suscetível à ação das radiações (em geral os raios cósmicos) que podem produzir efeitos nocivos, em longo prazo (estocástico), aos pilotos daquele tipo de aeronave. Nessa perspectiva, este estudo teve como principal objetivo

avaliar o nível de exposição de radiação nos pilotos da aeronave militar T-27 Tucano, em um voo específico, de maior navegação, durante a instrução do cadete aviador, mediante a utilização de um programa.

## 2 Material e métodos

A aeronave de estudo foi o T-27 Tucano da Embraer, as radiações analisadas foram baseadas no *Committee To Assess Health Risks From Exposure To Low Levels Of Ionizing Radiation* – Comissão para Avaliar os Riscos de Saúde Decorrentes da Exposição a Níveis Baixos da Radiação Ionizante (2006), chamadas *low-LET* e *high-LET* (*LET linear energy transfere*). Os resultados consideraram que o limite máximo anual que uma pessoa pode absorver, segundo a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP-103) (1991), seja de 1 *mSv* (milisievert, unidade usada pelo Sistema Internacional de Unidade para avaliar o impacto da radiação ionizante sobre os seres humanos).

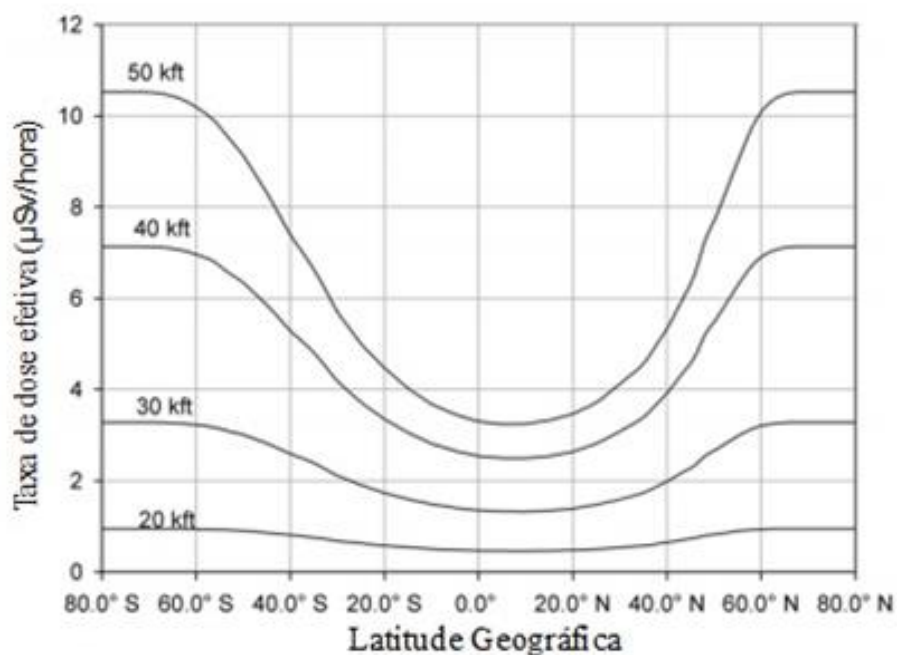
Para possibilitar a avaliação do efeito biológico de cada tipo de radiação, foi necessário definir a grandeza Dose Equivalente (H), essa equivalente à Dose Absorvida (D) no corpo humano, modificada pelo fator Q, de modo a constituir essa avaliação do efeito biológico, sendo expressa por  $H = D \cdot Q$ . Nessa dose (H), também foram considerados fatores como Energia (E), fator de absorção do tecido ( $W_t$ ) e fator de peso da radiação ( $W_r$ ) (HEILBRON; GUERRERO, 2013).

Os dados foram processados em um programa desenvolvido no Brasil pelos professores Paulo Heilbron e Jesus Guerreiro e pelos estudantes de engenharia da PUC-RJ Rafael Cabidulusso Lavallo Heilbron e Mario Luth Gonçalves Henrique do Amaral, no ano de 2013. O programa chamado de *Flight Cosmic Radiation Dose* (FLICRAD) foi desenvolvido por meio do *software Mathematica* e possibilitou calcular uma dose efetiva presente no voo analisado. Supõe-se uma rota geodésica na curvatura da Terra e dela inferem-se medidas que transformam latitudes e longitudes em coordenadas nas três dimensões (x, y, z), e, após outras transformações, conseguem apresentar o tempo de permanência em cada altitude, conforme a velocidade de voo. Os dados e equações atribuídos no programa foram inseridos de acordo com o trabalho desenvolvido por Heilbron *et al.* (2013).

O FLICRAD foi utilizado na sede da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), localizada no Rio de Janeiro – RJ, no ano de 2015, com autorização e supervisão do professor Paulo Heilbron. Foram considerados alguns pontos importantes para o uso do *software*: primeiramente o potencial solar foi estimado em 683 MeV e atmosfera livre.

Outros pontos considerados foram as altitudes/latitudes e a velocidade do voo. Em relação a eles, o programa interage com uma curva que mantém dados desde 1958 e contém as taxas médias de radiação encontradas em cada latitude para dada altitude de voo, conforme Figura 1. O FLICRAD é baseado em conceitos de álgebra linear, portanto não foi projetado para medir radiações dos voos com mudança na rota, nem com mudanças de altitude durante o trajeto. Os dados utilizados no FLICRAD foram obtidos das medidas de taxa de dose efetiva relacionada com a latitude geográfica em determinadas altitudes, na longitude 020E, coletados no período de janeiro de 1958 até dezembro de 2008 (Figura 1).

Figura 1 – Taxa de dose efetiva relacionada com a latitude geográfica em determinadas altitudes, na longitude 020E.



Fonte: Adaptado de Copeland e Friedberg (2011). Taxa de dose efetiva da radiação cósmica, relacionada com fatores geográficos latitude, em altitudes selecionadas a 20° E de longitude. As doses são para a atividade solar média de janeiro de 1958 a dezembro de 2008. O potencial heliocêntrico usado na estimativa das taxas de dose é baseado na taxa média equivalente de contagem do *Deep River* para o período de 51 anos relatado.

A região analisada para o presente estudo foi localizada na faixa de 20,0° a 23,0° de latitude sul, ou seja, próxima ao centro (0,0°) do gráfico (Figura 1). Uma vez que as altitudes de voo de aeronaves são entre 39.000 *ft* e 51.000 *ft*, de acordo com Ruas (2017). Importante ressaltar que, a partir de 25.000 *ft*, a dose de radiação dobra a cada 6.000 *ft*, portanto, quanto mais alto for o voo, maior a radiação.

A pesquisa foi realizada com a frota das aeronaves Tucanos da Academia da Força Aérea (AFA), local em que quase a totalidade dessas aeronaves está sediada. Os dados do voo foram coletados com base nas missões de navegação dos cadetes, estudantes do Curso de Formação

de Oficiais Aviadores (CFOAv). A missão escolhida para ser analisada foi a da fase de navegação por instrumento, que ocorre de Pirassununga-SP (SBYS) a Campo Grande-MS, com descidas em Bauru-SP (BRU), e em Presidente Prudente-SP (PRR), e finaliza em Campo Grande-MS (SBCG). Essa fase consiste em voos de longa duração, de aproximadamente 2 horas e 30 minutos, nos quais os cadetes percorrem rotas preestabelecidas no meio aéreo: as aerovias. As coordenadas foram inseridas no programa conforme dados na Tabela 1. O tráfego considerado foi a situação em que o avião manobra para enquadrar-se de maneira correta na posição de pouso. Nesse caso, foi calculado como a altitude média do tráfego sendo igual a 4.000 pés (*ft*).

Tabela 1 – Coordenadas de latitude, longitude e altitude inseridas no programa FLICRAD para considerar o voo de SBYS a SBCG.

<b>Fixo aeronáutico da cidade</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
SBYS	21°58.25'S	47°21.15'W
BRU	22°19.42'S	49°06,54'W
PRR	20°11,69'S	51°24,61'W
SBCG	20°27,31'S	54°40,61'W
<b>Altitude dos voos</b>	14.000 pés	

Fonte: própria autoria. SBYS: Pirassununga-SP; BRU: Bauru-SP; PRR: Presidente Prudente-SP; SBCG: Campo Grande-MS.

Quanto à velocidade da aeronave, visto que os aviões que voam alto são de alto desempenho e desenvolvem velocidades por volta dos 400 kt (kt = nó no sistema internacional de unidade), para que se completasse a avaliação, outros dados foram inseridos no programa: velocidade de subida, velocidade de descida, ângulo de subida, ângulo de descida e velocidade de cruzeiro, respectivamente (Tabela 2).

A análise dos dados, por meio do FLICARD, partiu do princípio de que um cadete realiza, conforme previsto no Plano de Instrução e Manutenção Operacional do Primeiro Esquadrão de Instrução Aérea (1º EIA), um curso de 66 missões, num total de aproximadamente 91 h.

Os resultados obtidos foram calculados em doses microsievert,  $\mu\text{SV}$ , do Sistema Internacional. De acordo com Heilbron e Guerreiro (2013), a dose total estabelecida pelo FLICRAD deve ser corrigida em 0,45%, (valor fixo para qualquer dose de radiação calculado pelo programa) para fornecer uma melhor aproximação ao valor real. Esse valor corrigido foi nomeado de dose computada e será utilizado nas demais discussões.

Tabela 2 – Velocidades (kt) de descida, subida e de cruzeiro e seus ângulos, respectivamente, inseridos no programa FLICRAD.

Voo	Velocidade/ângulo subida	Velocidade/ângulo descida	Velocidade de cruzeiro
1°	$V_s=140 \text{ kt} / \theta_s=07^\circ$	$V_d=500 \text{ kt} / \theta_d=89^\circ$	$V_c=140 \text{ kt}$
2°	$V_s=500 \text{ kt} / \theta_s=89^\circ$	$V_d=500 \text{ kt} / \theta_d=89^\circ$	$V_c=140 \text{ kt}$
3°	$V_s=500 \text{ kt} / \theta_s=89^\circ$	$V_d=100 \text{ kt} / \theta_d=03^\circ$	$V_c=140 \text{ kt}$

Fonte: própria autoria.  $V_s$ : velocidade de subida;  $V_d$ : Velocidade descida;  $V_c$ : Velocidade de cruzeiro; kt: nó; 1° Voo: de SBYS a BRU; 2° Voo: de BRU a PRR; 3° Voo: de PRR a SBCG; SBYS: Pirassununga-SP; BRU: Bauru-SP; PRR: Presidente Prudente-SP; SBCG: Campo Grande-MS.

### 3 Resultados e discussões

Os resultados podem ser observados na Tabela 3. Conforme metodologia descrita, esses valores foram baseados nos parâmetros de voo normal do T-27, na configuração para navegação por instrumento.

Tabela 3 – Resultados obtidos no programa FLICRAD, com as doses em  $\mu\text{SV}$  (microsievert)

VOO INSERIDO	DOSE DA SUBIDA	DOSE DO CRUZEIRO	DOSE DA DESCIDA	DOSE TOTAL	DOSE COMPUTADA
1°	0,0315247	0,17792	0,00107888	0,210524	0,209445
2°	0,00107888	0,3868714	0,00107888	0,389029	0,386871
3°	0,00107888	0,254169	0,103169	0,358417	0,357338
<i>TOTAL</i>					0,953654

Fonte: própria autoria. 1° Voo: de SBYS a BRU; 2° Voo: de BRU a PRR; 3° Voo: de PRR a SBCG; SBYS: Pirassununga-SP; BRU: Bauru-SP; PRR: Presidente Prudente-SP; SBCG: Campo Grande-MS. Dose total: sem correção; Dose computada com correção de 0,45%.

O valor  $0,953654 \mu\text{Sv}$  representa todo o voo real, com duração de 2 horas e 19 minutos, que percorreu 438 milhas náuticas (NM) e passou pelos pontos de controle previstos.

Baseado no estipulado pela ICRP-103, de que o valor da dose efetiva acumulada é de 1  $\text{mSv}$ , para que se atinja tal valor em um ano de voo, nas mesmas condições apresentadas anteriormente, seriam necessárias aproximadamente 2.429 horas de voo. Por outro lado, analisando-se os voos completos e distribuindo-se as horas totais de todo o curso pelas missões, encontra-se uma média de 1 hora e 11 minutos por missão, o que equivale a aproximadamente 1.048 voos no mesmo estilo do analisado, para atingir o limite máximo estabelecido.

Com base nos resultados, observou-se que um cadete aviador realiza normalmente o seu curso de formação e não atinge o limite previsto de dose efetiva acumulada no ano. Portanto, em um voo, o aluno acumularia aproximadamente 0,00095% do total, o que poderia ser

absorvido em um ano. Ao considerar todas as horas de voo, um valor de 0,0375% da dose anual é obtido. O pequeno valor, comparado ao estipulado de  $1mSv$ , leva à conclusão de que os riscos imediatos para a saúde são improváveis.

O valor é consistente com o do estudo realizado por Federico *et al.* (2010), que obtiveram doses de  $0.02 \mu Sv$  até  $2.00 \mu Sv$  em voos monitorados, durante um período de 2 anos, na região de São José dos Campos – SP. Fortes *et al.* (2017) confirmaram, por meio de monitoramento do espectro de partículas durante voo e simulação realizada em *software* EXPACS, valores similares da radiação ionizante em voo sob o espaço aéreo brasileiro. Isso sugere que as ferramentas de *software* de simulação *Mathematica* podem apresentar concordância com coletas experimentais.

### 3.1 Outras perspectivas de voo e aeronaves

Apesar de a dose final obtida neste estudo ter sido considerada baixa, outros tipos de voo ou de aeronaves podem apresentar perspectiva diversa, pois as altitudes do trânsito aéreo podem englobar um *Flight Level* (FL) de 140 (14.000 pés) até 40.000 pés (FL440). Esse tipo de voo, relativamente comum, pode ser encontrado no trânsito aéreo militar, no trânsito regional, na rota de táxis-aéreos ou até mesmo em voos de atividade de lazer.

Considerando a mesma rota anterior, a influência da altitude na quantidade de radiação absorvida foi avaliada para o intervalo de 14.000 (FL140) até 34.000 (FL340) pés, considerando um espaçamento regular de 5.000 pés. Os resultados numéricos são mostrados na forma de gráfico de barras, na Figura 2.

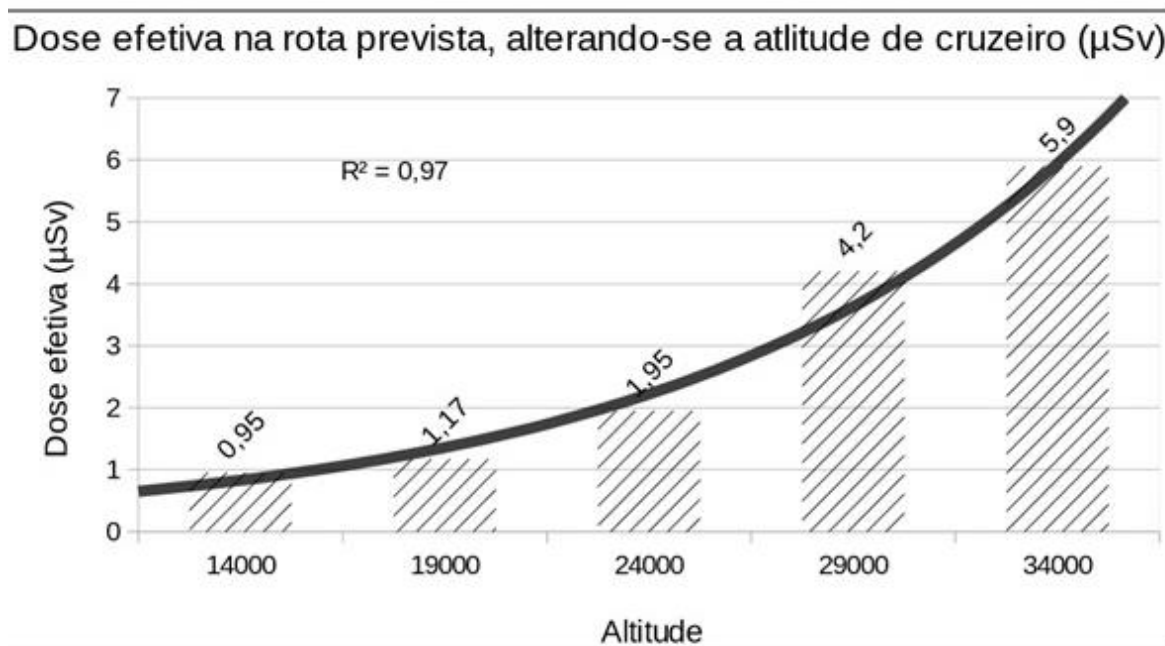
Após análise visual, um ajuste exponencial, obtido por meio do Microsoft Excel, foi realizado. A curva exponencial ajustada e o coeficiente  $R^2$  são apresentados sobrepostos aos dados simulados, na Figura 2.

A análise mostra um ajuste adequado aos dados com coeficiente  $R^2=0,97$ . Este pode ser considerado útil (QUININO; REIS; BESSEGATO, 2011) provendo confiança na regressão e um baixo desvio dos dados. Assim, pode-se dizer que, com base nas hipóteses e simplificações adotadas, há uma relação exponencial entre a altitude de operação e a dose efetiva recebida em voo.

É importante ressaltar que, para voar em altitudes altas, acima de FL140, faz-se necessário mudar de aeronave. Embora as estruturas/materiais dessas aeronaves possam variar, isso não inibe a exposição às radiações cósmicas de seus pilotos e tripulantes.



Figura 2 – Gráfico da dose efetiva na rota prevista, alterando-se somente a altitude de cruzeiro.



Fonte: própria autoria.

A relação exponencial obtida na Figura 2 permite a análise de outras altitudes. Por exemplo, para uma aeronave em FL190, com a velocidade utilizada no presente estudo, a dose efetiva do voo subiria a  $1,1735702 \mu\text{Sv}$ . Dessa forma, seriam necessárias aproximadamente 1.956 h (852 voos) para atingir o limite máximo de exposição à radiação. Dessa maneira, a porcentagem de exposição ao risco passaria de 0,00095 % para 0,00117 % em cada voo.

Essa nova configuração traz, no contexto do curso de formação dos cadetes completo, uma exposição de 0,0461 % da dose anual. Logo, com base nessa variação, qualquer outra mudança no voo de navegação dos cadetes do CFOAv não acarretaria um aumento capaz de atingir a dose máxima permitida.

Apesar de os resultados numéricos sugerirem que o limite permitido não é atingido, experimentos mais detalhados são necessários para uma melhor avaliação da radiação absorvida ao se considerarem outros tipos de aeronaves e diferentes altitudes. Além disso, vale ressaltar que, embora aqueles resultados apontem valores de exposição à radiação cósmica considerados baixos, ainda há o efeito estocástico, que é a indução dos efeitos da radiação, mesmo em doses pequenas (GONÇALVES, 2012), as quais estão sempre presentes durante os voos (PRADO *et al.*, 2015).

## 4 Conclusão

Esta pesquisa estimou a dose de radiação cósmica absorvida pelos pilotos, durante uma missão de voo no CFOAv da AFA, por meio do programa FLICRAD. Os resultados obtidos mostraram que os alunos do curso, na instrução do voo do T-27 Tucano, não sofrem efeitos imediatos, nem de médio prazo, da absorção de dose mínima de radiação cósmica, pois supõe-se que a missão adotada para efeito de cálculo foi representativa do contexto. Efeitos em longo prazo – os estocásticos – podem ser decorrentes de outros fatores, por hora desconhecidos no âmbito científico (GONÇALVES, 2012; PRADO *et al.*, 2015).

Em outra linha, podemos aprimorar também a própria medição das radiações, com dados de altitude e longitude mais recentes, assim como propor melhorias e/ou adicionar mais informações no programa (FLICRAD) utilizado. Embora a presente pesquisa tenha apresentado dados pertinentes para o conhecimento do voo adotado nas instruções áreas da AFA quanto ao índice de radiação a que o piloto possa ser submetido durante o curso, os dados refletem apenas uma estimativa. É necessária a avaliação física das doses utilizando-se de contadores e dosímetros adequados. Dessa forma, as estimativas podem ser comprovadas ou contestadas. Caso comprovadas, tornam-se efetivas para avaliação e controle da dose absorvida. Caso contrário, novos processos, considerações e hipóteses devem ser formulados para adequação dos resultados numéricos aos resultados experimentais.

### Referências Bibliográficas

- BAND, P. R. *et al.* Cohort Study of Air Canada Pilots: Mortality, Cancer Incidence, and Leukemia Risk. **American Journal of Epidemiology**, v. 143, n. 2, p. 137-143, 1996.
- BARTLETT, D.T. Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 109, n. 4, p. 349-355, 2004.
- COMMITTEE TO ASSESS HEALTH RISKS FROM EXPOSURE TO LOW LEVELS OF IONIZING RADIATION, **Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation**, National Research Council. Washington DC, 2006.
- COPELAND, K.; FRIEDBERG, W. **Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth**. Oklahoma City: FAA Civil Aerospace Medical Institute, 2011.
- COPELAND, K.; FRIEDBERG, W. **What Aircrews Should Know About Their Occupational Exposure to Ionizing Radiation**. Oklahoma City: FAA Civil Aerospace Medical Institute, 2013.
- FEDERICO, C. A. *et al.* Estimates of cosmic radiation received by aircrew of DCTA's flight test special group. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 2, n. 2, p. 137-144, 2010.
- FEDERICO, C. A. *et al.* Effects of cosmic radiation in aircrafts: A discussion about aircrew over South America. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 4, n. 2, p. 219-225, 2012.
- FIORAVANTI, C. O início e o fim dos raios cósmicos. **Revista Pesquisa FAPESP**, Ed. 200, 2012.
- FORTES, M. A. B. *et al.* Resultados e discussões sobre medidas da radiação ionizante em voo sob o espaço aéreo brasileiro. **Revista Conexão Sipaer**, v. 8, n. 2, p. 132-141, 2017.
- GONÇALVES, G.; FARIAS, J.; GONÇALVES, T. **Radioatividade X Radiação**. São Paulo: USP, 2008.
- GONÇALVES, V. D. G. **Caracterização da dose em pacientes devido à produção de imagens de raios-x utilizadas em radioterapia guiada por imagem – IGRT. 2012.** 64f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- HEILBRON, P. F. L. *et al.* **A simple model to estimate radiation doses to aircrew during flights in Brazil and abroad**. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2013.
- HEILBRON, P. F. L.; GUERRERO, J. P. **FLICRAD** [programa de computador]. Rio de Janeiro, 2013.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 60, 1991.

KYLLONEN, J-E.; LINDBORG, L.; SAMUELSON, G. Cosmic Radiation Measurements On-board Aircraft with the variance method. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 93, n. 3, p. 197-205, 2001.

LINDBORG, L. *et al.* Cosmic radiation exposure of aircraft crew: compilation of measured and calculated data. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 110, n. 1-4, p. 417-422, 2004.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia. **Estudos avançados**, v. 27, n.77, p. 185-199, 2013.

PRADO, A. C. M. *et al.* Estudo de caso sobre o efeito da radiação cósmica em sistemas embarcados em aeronaves. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 3, n. 1-A, p. 1-22, 2015.

QUININO, R. C.; REIS, E. A.; BESSEGATO, L. F. **O coeficiente de determinação R<sup>2</sup> como instrumento didático para avaliar a utilidade de um modelo de regressão linear múltipla**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. Disponível em: [www.est.ufmg.br/portal/arquivos/PD\\_28102011\\_Final](http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/PD_28102011_Final). Acesso em: 15 dez. 2017.

RUAS, A. C. **O Tripulante de Aeronaves e a Radiação Ionizante**. São Paulo: Bianch, 2017.

TEMPORAL, W. *et al.* **Medicina Aeroespacial**. Rio de Janeiro: Editora Luzes, 2005.

XAVIER, A. M. *et al.* **Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2014.

## **The case study of the effective dose of ionizing radiation on the Brazilian Air Force T-27 Tucano aircraft flight**

### **Abstract**

The main objective of this study was to analyze the average incidence of the effective dose of cosmic radiation that affects pilots flying the T-27 aircraft during the training course of Brazilian Air Force Academy, from flight data such as altitudes, speed, geographic coordinates and flight time that were entered in the FLICRAD program (Flight Cosmic Radiation Dose). The results obtained showed an average of  $0.953654 \mu\text{Sv}$  per flight in the T-27, concluding that it would take 2,429 hours of this type of flight to obtain the minimum safety dose predicted. With a course of approximately 91 flight hours, students/cadets, T-27 pilots, would have 0.0375% of the predicted annual dose of 1 mSv. In this context, this study concluded that the effective dose in the cadet flight has no significant influence on its annual accumulation of cosmic radiation.

**Keywords:** Cosmic radiation. Low-LET. Military airplane. FLICRAD program.