

Considerações sobre a Utilização de Aeronaves e Dosimetria de Pilotos em Cenários DQBRN

Joyce Carolynne de Melo Silvestre¹, José Elias Matieli¹ e Claudio Antonio Federico²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – A defesa contra agentes QBRN é delicada e o sucesso de operações nesse cenário depende de cautela em todas as suas etapas, desde o pré ao pós-missão. O principal meio de proteger as equipes envolvidas, o público e os equipamentos utilizados é o monitoramento individual e ambiental. Este trabalho versa sobre a utilização de aeronaves em cenários de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (DQBRN), efetuando breves considerações sobre os cuidados necessários nas diferentes fases para esse tipo de missão e entrando em detalhe no monitoramento radiológico de tripulações em eventos radiológicos e nucleares, com foco especial na aeronave H-36, na qual é feita uma análise técnica cuidadosa da condição de trabalho dos pilotos para esse tipo de missão e dos fatores de conversão de dose apropriados para as medições de radiação. Também são efetuados testes práticos de posicionamento de detectores e sugerido o uso de monitores individuais na lateral do macacão, alertando-se sobre a necessidade do uso de fatores de correção para a conversão da dose assim obtida para a dose efetiva incidente sobre o organismo de tripulantes nesse tipo de cenário.

Palavras-Chave – Defesa radiológica e nuclear, DQBRN, radiação ionizante.

I. INTRODUÇÃO

Operações em cenários de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (DQBRN) se baseiam em cinco princípios: evitar a contaminação, proteção, monitoramento e detecção, descontaminação e controle de danos [1]; que foram estabelecidos em função das peculiaridades desse tipo de evento. Os princípios participam da teia de possibilidades e limitações diante de ameaças envolvendo esses tipos de agente. O primeiro princípio é o básico da DQBRN e é realizado através de medidas ativas e passivas de proteção que constituem informações que balizarão as decisões em eventos dessa natureza.

A defesa contra esses tipos de agentes é delicada e o sucesso da missão depende de cautela em todas as etapas envolvidas, desde o planejamento e acionamento da missão até a descontaminação e liberação de equipamentos. Durante a missão aérea em cenários radiológicos e nucleares, é imprescindível o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) pela equipe de controle QBRN, além de dosímetros pessoais nestes e na tripulação, como também o uso de monitores de radiação no ambiente. As

medições efetuadas por estes equipamentos devem ser verificadas periodicamente e comparadas com valores de referência estabelecidos em normas.

As missões aéreas em eventos radiológicos e nucleares podem ser de dois tipos: de transporte e de monitoramento. O primeiro tipo refere-se ao transporte de equipes de apoio, de equipamentos e de evacuação aeromédica – no caso de vítimas contaminadas, apenas se estiverem adequadamente encapsuladas. O segundo pode ser utilizado na localização de fontes radioativas e no mapeamento de dispersão de agentes no ar, muitas vezes para fins de comparação com a simulação de propagação de plumas radiológicas e previsão de suas consequências para a população e áreas potencialmente afetadas.

Essas missões são específicas e requerem critérios operacionais bem estabelecidos em todas as suas etapas a fim de garantir a segurança do público, da equipe, dos tripulantes e da aeronave. Abaixo são pontuadas algumas características de cada etapa de missão nesse tipo de cenário:

1) *Planejamento/Acionamento da missão*: definição do tipo de missão; escolha e preparação da aeronave a ser utilizada (asa rotativa, asa fixa, VANT) de acordo com o objetivo; acionamento da equipe de apoio QBRN; verificação da simulação da pluma radiológica a fim de especificar a rota e as doses previstas, especificação dos EPIs e equipamentos de monitoramento compatíveis com os emissores radioativos esperados; avaliação de doses previstas, do risco envolvido e do envelope radiológico da missão.

O acionamento de uma missão aérea em evento radiológico ou nuclear depende da definição de critérios de acordo com o cenário inserido. Primeiramente, quanto ao tipo de missão, de monitoramento ou de transporte, que guiará a decisão da aeronave a ser utilizada. Aeronaves de asa rotativa são adequadas para ambas – com mais restrição quanto à carga suportada e às distâncias a serem percorridas em missões de transporte se comparadas a aeronaves de asa fixa; com restrição de dose à tripulação e altitude de voo em missões de monitoramento, quando comparadas aos VANTs. Aeronaves de asa fixa não são adequadas para missões de monitoramento, devido à alta velocidade de voo e altitude. VANTs, por sua vez, somente realizam missões de monitoramento, e são as aeronaves mais indicadas neste caso, devido à possibilidade de voo em baixas altitudes e velocidades e à isenção de exposição da tripulação. Missões de monitoramento usando VANTs desdobram-se em possibilidades quando estudadas as diversas

J. C. M. Silvestre, joycejcms@fab.mil.br; J. E. Matieli, matieli@ita.br; C. A. Federico, claudiofederico@ieav.cta.br.

Este trabalho foi apoiado pelo Laboratório de Bioengenharia do ITA (LABBIO) e pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv), por meio do Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais (PPGAO) e do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais (PG-CTE) do ITA.

combinações entre veículos e detectores, aplicadas a diferentes graus de monitoramento [2].

- 2) *Durante a missão*: necessidade de monitoramento contínuo da equipe, tanto da taxa de dose quanto da dose acumulada; as repostas devem servir de controle de intercorrências, acidentes ou mesmo como missão regular, a fim de auxiliar o comandante em decisões de abortar ou alterar a missão; necessidade de acompanhamento da simulação da pluma; avaliação de recebimento da carga a ser transportada, quanto à contaminação externa, nível de radiação e estanqueidade de cápsulas e recipientes de acordo com critérios de aceitação.

Eventos radiológicos e nucleares são complexos no que tange à natureza dos elementos envolvidos, visto que, a depender das características da radiação emitida, os riscos situacionais são alterados e a escolha de equipamentos, de monitoramento e de proteção, a serem utilizados também. Há uma ferramenta bastante útil nesse tipo de situação, que colabora nas decisões de rotas aéreas, de acionamento/alteração de missão e de definição de áreas de risco e evacuação, que é a simulação de propagação de plumas radiológicas. Os dois tipos de missão citados requerem o acompanhamento constante da simulação da propagação da pluma radiológica, devido às interferências da mesma nas situações descritas.

- 3) *Recebimento da aeronave*: normas de tráfego aéreo; isolamento da área; monitoramento das equipes, dos equipamentos, da tripulação e da aeronave a fim de verificar a necessidade de descontaminação, observando critérios para reutilização em missões semelhantes ou liberação para normalidade.

O recebimento da aeronave em solo deve ser criterioso a fim de não propagar eventuais contaminações nem expor desnecessariamente indivíduos do público. As normas devem detalhar o processo de monitoramento das equipes, dos equipamentos utilizados, da tripulação e da aeronave, com os limites previstos para cada situação. A aeronave, por exemplo, pode apresentar limites de verificação e contaminação mais rigorosos ao voltar para operações normais do que ao voltarem para missões semelhantes. É necessário também o registro dos monitoramentos individuais das equipes e da tripulação para fins de comprovação posterior junto às autoridades competentes.

- 4) *Descontaminação*: observação dos procedimentos e critérios de aceite de descontaminação.

A descontaminação radiológica é um processo delicado que exige cuidados em todas as suas etapas, desde a escolha do local onde será realizada a descontaminação até o acondicionamento, tratamento ou descarte dos rejeitos radioativos resultantes.

- 5) *Retorno à normalidade*: emissão de laudo de liberação da aeronave e equipamentos, acondicionamento, tratamento, transporte e descarte de rejeitos radioativos, conforme normas vigentes.

II. MONITORAMENTO RADIOLÓGICO DE TRIPULAÇÕES E EQUIPES EM CENÁRIOS RADIOLÓGICOS E NUCLEARES

O transporte de vítimas em acidentes QBRN pela FAB prevê uma das seguintes situações: (a) as vítimas foram previamente verificadas pela equipe de controle e não estão contaminadas; ou (b) as vítimas contaminadas estão alocadas em cápsulas de isolamento individual adequadas, e a contaminação encontra-se em níveis controlados [1]. A contaminação radiológica pode ser definida como a presença de substâncias radioativas em superfícies, sólidas, líquidas ou gasosas (incluindo o corpo humano), de forma não intencional ou indesejável, ou ao processo que dá origem a essa presença [3]. No caso (b), há, portanto, emissão radioativa no interior da aeronave, que não é blindada pelas cápsulas de isolamento, que servem para evitar novas contaminações.

Em eventos QBRN, a aeronave é dividida internamente em três zonas, diferenciadas a partir do risco de contaminação:

- a) Zona quente: área de alto risco de contaminação, local de permanência da equipe médica e da equipe de controle.
- b) Zona morna: área de baixo risco de contaminação, destinada à colocação de EPI e armazenamento de materiais médicos. Tripulantes só devem adentrar essa região em operações de entrada e saída de pessoal ou material;
- c) Zona fria: área que deve estar livre contaminação de líquidos e vapores. Não é necessária a utilização de EPI, porém não é dispensável o uso de dosímetro de leitura direta em missões radiológicas e nucleares. Local de permanência do mecânico, que inclui a cabine de comando.

Em eventos radiológicos e nucleares, a aeronave H-36 (Airbus H-225M) é considerada como zona quente em toda sua extensão. A consideração e o uso de dosímetros pessoais em toda a aeronave ocorre devido à possibilidade de irradiação, bem como à necessidade de registro de dose para fins de comprovação posterior junto à autoridade competente.

A aeronave H-36 comporta até duas cápsulas de isolamento individual, e as mesmas devem ser colocadas nas posições D e C, conforme Fig. 1.

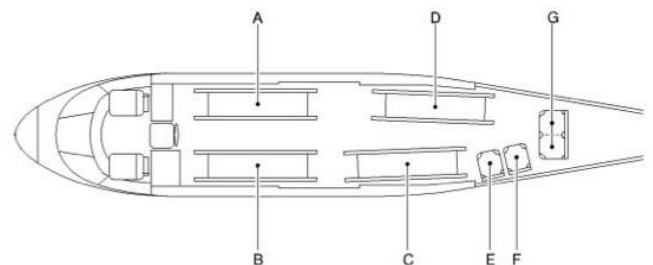


Fig. 1. Posicionamento de macas na aeronave H-36 para transporte aeromédico (adaptado de [4]).

No caso de missões em cenários radiológicos e nucleares, a avaliação de doses decorrentes de exposição à radiação proveniente de fontes externas é normalmente desempenhada por meio de dosímetros e monitores de radiação.

A denominada dosimetria legal é realizada por meio de dosímetros pessoais de leitura indireta, fornecidos por laboratório certificado, que são utilizados junto ao corpo em posição que caracterize sua exposição, usualmente na frente do tronco, na posição da lapela. Estes dosímetros são utilizados por todo o período da missão e devem ser lidos pelo laboratório após o final da atividade, quando é emitido um relatório das doses recebidas, relatório este que possui valor legal.

Esta dosimetria pode ser complementada por dosímetros eletrônicos, que são considerados como dosimetria complementar e possuem a função de acompanhar continuamente as taxas de dose e permitir uma avaliação da dose acumulada a qualquer momento durante a missão, comparando-a com limites operacionais previamente especificados para a missão. Em proteção radiológica, podem ser definidos limites operacionais a fim de controlar a radiação no local e definir ações específicas a serem desencadeadas quando estes limites forem atingidos. Diferentes cenários e condições ocupacionais de operação podem requerer limites operacionais diferentes, assim como equipamentos adequados e devidamente calibrados.

O campo de radiação captado por um monitor de ambiente difere daquele captado por um dosímetro individual, em que a radiação é fortemente influenciada pelo fenômeno de retro espalhamento e pela absorção no organismo [5]. Os dosímetros utilizados para dosimetria pessoal devem ser calibrados na grandeza operacional Equivalente de Dose Pessoal ($H_p(10)$) ou grandeza similar, a qual deve ser convertida em dose efetiva (E) levando-se em consideração os fatores ocupacionais aplicáveis a cada situação. A dose efetiva é a grandeza de proteção adequada para avaliar o risco radiobiológico no organismo como um todo e deve ser a grandeza utilizada para comparação com os limites aplicáveis advindos de normas e regulamentos [6].

III. ESTUDO DE CASO PARA TRIPULAÇÕES E EQUIPES

Como dosímetros de $H_p(10)$, os dosímetros individuais em geral são calibrados para utilização na frente do tronco, sendo bastantes representativos da dose efetiva recebida por um trabalhador em um campo de radiação com incidência frontal. No caso de tripulantes de aeronaves militares em missões DQBRN, que estão sempre sentados de costas para a fonte de radiação, o uso de dosímetro pessoal na condição usual pode não representar diretamente uma medida representativa da dose que estão efetivamente recebendo. Este trabalho se propõe a estudar a influência do posicionamento do dosímetro em tripulantes da aeronave H-36 em missões de defesa radiológica e nuclear.

Considerando a geometria das cápsulas (fontes de radiação) em relação aos tripulantes no H-36, observa-se que a condição de trabalho dos mesmos implica em uma exposição PA (pósterio-anterior) em praticamente 100% do tempo. Ao contrário, as equipes de atendimento médico, por sua constante movimentação ao redor dos pacientes, podem ser representadas como sendo expostas em uma condição de exposição rotacional (ROT), onde a radiação incide por diferentes angulações no plano horizontal ao longo da missão.

A Fig. 2, extraída de [7], demonstra a relação entre a dose efetiva em geometria PA em relação ao equivalente de dose pessoal medido por dosímetros posicionados em frente a um simulador de tronco tipo *slab* para uma extensa faixa de energia de fótons. Observa-se que o $H_p(10)$ a 180° subestima o E por um fator que varia de 1,5 a dois, dependendo da energia, para energias acima de 30 keV, que abrange a maior parte das energias emitidas por fontes convencionais de radiação encontradas em situações QBRN, tais como ^{137}Cs (662 keV), ^{131}I (364 keV), entre outras.

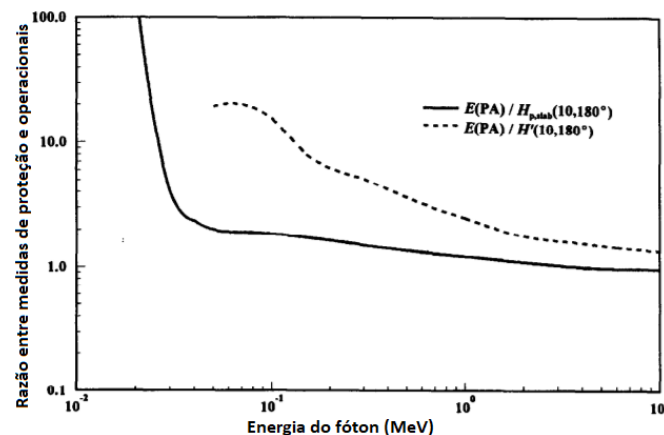


Fig. 2. Relação entre a dose efetiva (E) e o equivalente de dose pessoal para incidência pósterio-anterior ($H_p(10,180)$) em função da energia do fóton incidente (adaptado de [7]).

De forma similar, a Fig. 3 apresenta a relação entre E e $H_p(10)$ para geometria rotacional, aplicável às equipes de atendimento médico, onde pode-se observar que o $H_p(10)$ superestima o E para energias baixas (até cerca de 70 keV), sendo um estimador adequado para energias acima desse valor.

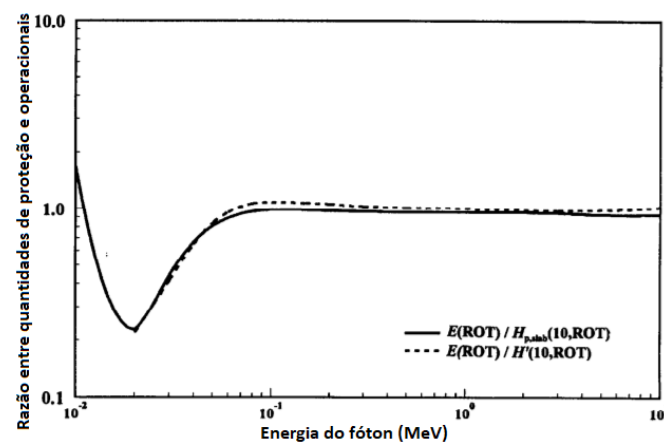


Fig. 3. Relação entre a dose efetiva (E) e o equivalente de dose pessoal para incidência rotacional ($H_p(10,ROT)$) em função da energia do fóton incidente (adaptado de [7]).

Para incidência de nêutrons, as relações entre os coeficientes se alteram, devido à diferença nos efeitos ocasionados pelas partículas. Como nêutrons são altamente penetrantes, não há um consenso sobre coeficientes de conversão para equivalente de dose direcional ou pessoal para nêutrons [7]. A energia depositada na geometria PA pode ser comparada com os coeficientes de conversão para o

equivalente de dose ambiente ($H^*(10)$) e diretamente com $H^*(10,180^\circ)$ e $H_p(10,180^\circ)$. Na prática, considera-se que a irradiação de nêutrons é distribuída em uma gama de energias, visto que raramente há feixes monoenergéticos de nêutrons. Sob essas circunstâncias, a medida de equivalente de dose ambiente ($H^*(10)$) normalmente representa uma estimativa conservativa para a dose efetiva.

Entretanto, para a situação de trabalho típica do piloto em missões QBRN, pode-se observar, na Fig. 4, que a medida de $H^*(10)$ é representativa do E (ou superestima esta grandeza) para nêutrons de energias até 10 eV e acima de 20 keV, para incidência PA. Para outras energias, a razão entre as duas grandezas varia entre 1,0 e 1,5 nessa região, e só cresce novamente para nêutrons acima de 40 MeV. Ou seja, a medição efetuada por equipamentos portáteis calibrados em $H^*(10)$ pode subestimar a dose efetiva (E) recebida pelos pilotos, dependendo da faixa de energia de interesse. Para as fontes convencionais de nêutrons, tais como $^{241}\text{Am/Be}$, Pu/Be , entre outras, as energias variam entre algumas frações de eV até 11 MeV, tornando difícil esta avaliação devido ao largo espectro de energia.

A Tabela I resume a análise realizada nesta seção.

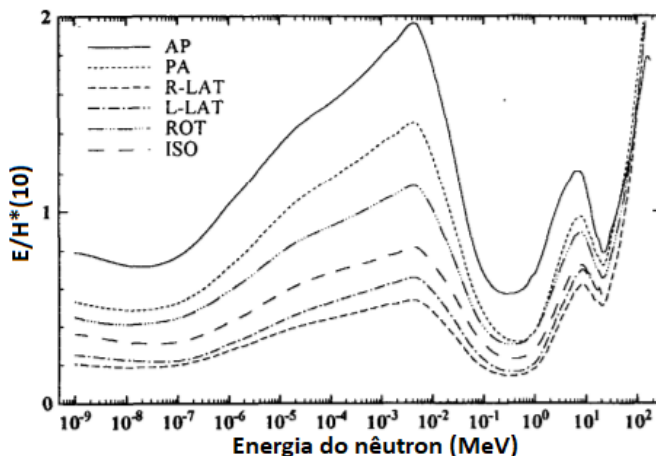


Fig. 4. Relação entre a dose efetiva (E) e o equivalente de dose ambiente ($H^*(10)$) para diferentes incidências em função da energia do nêutron incidente (adaptado de [6]).

TABELA I. SUMÁRIO DAS CONDIÇÕES E APLICABILIDADE DO MONITORAMENTO RADIOMÉTRICO E DOSIMÉTRICO.

Grandeza	Condição	Aplicabilidade	Resultado	Ref.
$H_p(10,180)$ para RX e gama	Dosímetro posicionado na lapela, com incidência PA	Condição ocupacional dos pilotos	Subestima a dose efetiva (E) por um fator até 2, dependendo da energia	Fig. 2
$H_p(10,ROT)$ para RX e gama	Dosímetro posicionado na lapela, com incidência ROT	Condição ocupacional das equipes médicas	Representa adequadamente ou superestima a dose efetiva	Fig. 3
$H^*(10)$ para campos neutrônicos	Medição realizada na posição do piloto com monitores calibrados em $H^*(10)$	Medição prévia à missão, efetuada sem o piloto na posição	Pode subestimar E por um fator até 1,5 ou superestimar por fatores até 0,4, dependendo da energia do nêutron incidente	Fig. 4

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de confrontar as análises apresentadas na seção II com a situação operacional de medida, foram realizadas irradiações com um simulador antropomórfico, que reproduz com precisão a constituição, anatomia e densidade do organismo humano, utilizando-se fontes de radiação gama e nêutrons em laboratório e medindo-se as taxas de $H^*(10)$ por meio de detectores portáteis de radiação, conforme arranjo experimental apresentado na Fig. 5.



Fig. 5. Arranjo experimental utilizando o simulador antropomórfico.

O experimento de posicionamento do detector foi realizado com os seguintes materiais:

- Simulador antropomórfico humano do tipo Alderson RANDO [8];
- Detector de radiação gama tipo RadEye G-10;
- Detector de nêutrons tipo RadEye GN;
- Fonte de radiação gama de ^{60}Co , com energia média em torno de 1,25 MeV; e
- Fonte de nêutrons de $^{241}\text{Am/Be}$ com espectro de nêutrons com energia média em torno de 4,5 MeV e máxima em torno de 11 MeV.

O simulador antropomórfico, utilizando um macacão de voo, foi posicionado à 3,80 m das fontes de radiação com auxílio de uma trena à laser. A distância escolhida foi à referente à menor distância de um tripulante, no caso, o mecânico, a uma das macas em situação normal. Inicialmente, mediu-se o *background* ambiental para subtraí-lo das medidas posteriores.

Foram realizadas medidas em três posições diferentes: (a) simulador de frente para a fonte com os monitores nos bolsos frontais, simulando a condição usual de calibração de dosímetros pessoais, ou seja, a condição de obtenção do $H_p(10,0^\circ)$, ou simplesmente $H_p(10)$; (b) simulador de costas para a fonte com os monitores nos bolsos frontais, simulando a condição de utilização de dosímetros pessoais com

incidência traseira do campo, ou seja $H_p(10, 180^\circ)$; (c) simulador de costas para a fonte com os monitores no bolso lateral, sendo esta uma geometria de uso de dosímetros pessoais proposta pelo presente trabalho. Para a fonte gama de ^{60}Co , foram realizadas medições com o equipamento RadEye G-10, enquanto que para a fonte de $^{241}\text{Am/Be}$ foi utilizado o detector RadEye GN, uma vez que é o único que permite obter resposta para campos neutrônicos. Os resultados são apresentados na Tabela II, na forma de razão da taxa de dose medida em cada situação, em relação à taxa de dose medida em incidência frontal (AP).

TABELA II. RELAÇÕES ENTRE AS DOSES OBTIDAS NOS DIFERENTES POSICIONAMENTOS E FONTES DE RADIAÇÃO.

Condição	Razão da dose medida em relação à incidência frontal	
	Gama (^{60}Co)	Nêutron (Am/Be)
A (AP)	1	1
B (PA)	0,65	0,92
C (PA), com monitor lateral	0,95	1,34

Observa-se que, para radiação gama do cobalto 60 (energia em torno de 1,25 MeV) a utilização do dosímetro no bolso frontal do macacão, com exposição traseira (condição B) subestima em 35% a dose efetiva (E) no organismo do piloto, sendo este resultado consistente com a indicação obtida a partir da Fig. 2.

Para nêutrons, a medição efetuada indica que a utilização do dosímetros na posição da lapela com exposição traseira (condição B) subestima a dose em cerca de 8% para a fonte utilizada ($^{241}\text{Am/Be}$).

Em ambos os casos, para as fontes gama ou neutrônica utilizadas, a dose efetiva (E) pode ser determinada com razoável precisão, ou superestimação, com o dosímetro sendo posicionado no bolso lateral do uniforme (condição C).

V. OBSERVAÇÕES FINAIS

Pode-se resumir os seguintes pontos em relação ao estudo realizado, para a dosimetria na condição de trabalho dos pilotos em missões radiológicas ou nucleares:

1 – a estimativa do E para radiação gama por meio de dosímetros pessoais posicionados na lapela, calibrados em $H_p(10)$, ou grandeza equivalente, nem sempre é adequada pois pode subestimar o E por um fator de até 2 para energias acima de 30 keV, fatores estes consistentes com as medições experimentais realizadas no presente estudo.

2 – Para radiação neutrônica, a medida por meio de dosímetros pessoais posicionados na lapela, calibrados em $H_p(10)$, ou grandeza equivalente, pode subestimar ou superestimar a E, dependendo da faixa de energia utilizada, conforme indicado pelos dados apresentados em [6]. No caso específico da fonte utilizada no presente estudo, houve uma subestimação de 8%.

3 – A utilização do dosímetro no bolso lateral parece ser uma boa alternativa, pois aproxima razoavelmente o resultado do esperado ou o superestima, para o caso do campo neutrônico utilizado no presente estudo.

Em suma, observa-se que há uma divergência significativa na determinação da dose efetiva (E) a partir de medidas realizadas com dosímetros pessoais, para a condição de trabalho típica de um piloto em missão QBRN.

Longe da pretensão de esgotar o assunto, o presente trabalho demonstra que as incertezas e aproximações decorrentes da condição operacional de medida devem ser analisadas com o apoio de especialistas com experiência na área de radioproteção e dosimetria, reforçando a necessidade de uma análise técnica especializada.

Pode ser observada a necessidade de estudos mais detalhados envolvendo outros tipos de fontes de radiação de diferentes energias e com diferentes equipamentos de detecção. Finalmente, ressalta-se assim a importância da coordenação entre as equipes de suporte técnico-científico e as equipes operacionais, sem a qual erros grosseiros podem ser cometidos, com possível comprometimento da saúde ocupacional dos tripulantes para esse tipo de missão devido à possibilidade de interpretações errôneas das leituras obtidas.

REFERÊNCIAS

- [1] Comando da Aeronáutica. “Doutrina de preparo e emprego da FAB em missões de transporte na defesa química, biológica, radiológica e nuclear (DQBRN)”. DCA 1-6. Brasil, 2014.
- [2] D. Connor, P. G. Martin & T. B. Scott. “Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems”. *International Journal of Remote Sensing*, 37:24, 5953-5987, 2016.
- [3] IAEA. “IAEA safety glossary: terminology used in nuclear safety and radiation protection”. 2007 edition. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007.
- [4] Helibras. “Manual de voo complementar”. EC 725 AP.
- [5] ICRP. “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4). International Commission on Radiological Protection, 2007.
- [6] ICRP. “Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures”. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40(2-5). International Commission on Radiological Protection, 2010.
- [7] ICRP. “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation”. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4). International Commission of Radiological Protection, 1996.
- [8] Radiology Support Devices. “The Alderson Radiation Therapy Phantom (ART)”. Disponível em: <http://www.rsdphantoms.com/rt_art.htm>. Acesso em: 15/07/2018.