



Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear e Bioengenharia: Proteção Nuclear e Radiológica

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

Considerations on the Use of Aircraft and Pilot Dosimetry in CBRN Defense Scenario

Joyce Carolynne de Melo Silvestre¹, José Elias Matieli², Edson Ramos de Andrade^{3,4} Claudio Antônio Federico^{3,2}¹Instituto de Aplicações Operacionais (IAOp), São José dos Campos/SP – Brasil²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil³Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil⁴Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Article Info

Article History:

Received	01 July	2024
Revised	08 August	2024
Accepted	06 September	2024
Available online	22 October	2024

Palavras Chave:

Defesa radiológica e nuclear
DQBRN
Radiação ionizante
Dosimetria

Keywords:

Radiological and nuclear defense
CBRN defense
Ionizing radiation
Dosimetry

E-mail addresses:

joycejems@fab.mil.br (J.C.M. Silvestre),
jematieli1@gmail.com (J.E. Matieli),
claudiofedericocef@fab.mil.br (C.A. Federico),
andradepped@ime.eb.br (E.R. Andrade).

Resumo

A defesa contra agentes Químicos, Biológicos, Radiológicos e Nucleares (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 são 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 Caracal, 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 foram efetuados testes práticos de posicionamento de detectores e sugerida a possibilidade do 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.

Abstract

Defense against Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) agents is delicate and the success of operations in this type of scenario relies on caution in every step, from pre to post mission. The main way to protect the involved teams, the public and the equipment used is individual and ambient monitoring. This work is about the use of aircraft in CBRN Defense scenario, presenting brief considerations on the necessary precautions on different phases of this kind of mission, and detailing the radiological monitoring of aircrew members in radiological and nuclear events. This analysis focuses on H-36 Caracal aircraft, in which a careful technical analysis on the operational condition of pilots for this kind of mission is performed, as long as the appropriate dose conversion factors for radiation measurements. We also performed practical detector positioning experiments and suggested the possible use of individual monitors in the side pocket of the operational overall, warning on the need of the use of correction factors for conversion of measured dose to effective dose incident on aircrew body in this type of scenario.

I. INTRODUÇÃO

Operações em cenários de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (DQBRN) se baseiam em cinco princípios: (a) evitar a contaminação, (b) proteção, (c) monitoramento e detecção, (d) descontaminação e (e) controle de danos [1]; estabelecidos em função das peculiaridades dessa categoria de evento. Os princípios participam da teia de possibilidades e limitações diante de ameaças envolvendo agentes QBRN. O primeiro princípio é o básico da DQBRN sendo realizado por meio de medidas ativas e passivas de proteção que constituem informações balizadoras para a tomada de decisões.

A defesa contra esses tipos de agentes requer visão multidisciplinar e o sucesso da missão depende fundamentalmente do rigor operacional exercido em todas as etapas envolvidas, desde o planejamento e acionamento da missão até a descontaminação e liberação de equipamentos utilizados. Durante a execução de 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 radiológico hostil. No contexto deste estudo considera-se ambiente radiológico hostil qualquer espaço transitável onde se esperam doses em níveis tais que produzam efeitos biológicos observáveis ou esperados. As medições efetuadas por estes equipamentos devem ser verificadas periodicamente e comparadas com valores de referência estabelecidos em normas.

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.

As missões aéreas em atendimento a eventos radiológicos e nucleares podem ser basicamente classificadas em dois tipos: (a) de transporte e (b) 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. Contudo não se deve desconsiderar a preparação para missões de combate, nas quais seja necessário interagir com campos de radiação ionizante decorrentes de ações inimigas. Neutralização de plantas nucleares gerando plumas de contaminação e acionamento de dispositivos nucleares táticos são possibilidades dentro deste espectro.

Essas missões são específicas e devem considerar critérios operacionais bem estabelecidos em todas as suas etapas a fim de garantir a segurança dos tripulantes, da equipe operacional, da aeronave e do público externo às atividades. Podem ser pontuadas algumas características de cada etapa de uma missão em cenário QBRN, mais especificamente Radiológico e Nuclear (RN):

- 1) *Planejamento/Acionamento da missão*: definição do tipo de missão; escolha e preparação da aeronave a ser utilizada (asa rotativa, asa fixa, VANT, etc.) 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 (região do espaço 3D sob influência dos contaminantes) da missão. O acionamento de uma missão aérea em evento RN depende da definição de critérios de acordo com o cenário. Primeiramente, quanto ao tipo de missão, de monitoramento ou de transporte, que guiará a decisão sobre a escolha da aeronave a ser utilizada. Aeronaves de asa rotativa são adequadas para ambas – com maiores restrições quanto à carga suportada e às distâncias a serem percorridas em missões de transporte se comparadas a aeronaves de asa fixa especialistas; com restrição de dose à tripulação e altitude de voo em missões de monitoramento, quando comparadas aos VANTs. Aeronaves de asa fixa não são tão adequadas para missões de monitoramento, devido à alta velocidade de voo e altitude, fatores que limitam estatísticas de medidas. 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 combinações entre veículos e detectores, aplicadas a diferentes graus de monitoramento [2]. Pode-se considerar a necessidade de envelopamento interno da aeronave com o objetivo de reduzir possível contaminação e acelerar o processo de descomissionamento da aeronave na etapa de Recebimento.
- 2) *Durante a missão*: necessidade de monitoramento contínuo da equipe, tanto acerca da taxa de dose quanto da dose acumulada; as respostas 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 recomendados em normas específicas para cada caso. Eventos radiológicos e nucleares carregam alta complexidade no que diz respeito à fenomenologia e à natureza dos elementos envolvidos, visto que, a depender das características da radiação emanada, os riscos situacionais são alterados e a escolha de equipamentos, de monitoramento e de proteção, a serem utilizados também podem sofrer atualizações. 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 missões.
- 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, ainda que esta situação não seja esperada. 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 [3] e devem ser observadas as especificidades dos meios aeroespaciais. A aeronave, por exemplo, pode apresentar limites de verificação e contaminação mais rigorosos ao retornar para operações ordinárias do que ao retornarem para cumprimento de missões semelhantes [4]. É imprescindível também o registro dos monitoramentos individuais das equipes e da tripulação para fins de comprovação posterior junto às autoridades competentes e para registro dosimétrico e epidemiológico.
- 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 [5]. 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. É importante destacar a diferença entre os conceitos de contaminação e exposição radiológica. No primeiro o há interação entre objeto e a fonte emissora de modo que as partes passam a ser consideradas fontes. No segundo caso, exposição radiológica, a interação se dá sem incorporação da fonte e o objeto exposto passa a ser considerado irradiado, não sendo um emissor secundário.

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

- Zona quente*: área de alto risco de contaminação, local de permanência da equipe médica e da equipe de controle.
- Zona morna*: área de baixo risco de contaminação, destinada à colocação de EPI e armazenamento de materiais médicos. Tripulantes só devem circular nessa região em operações de entrada e saída de pessoal ou material;
- 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.

Como exemplo, em eventos radiológicos e nucleares, a aeronave H-36 Caracal (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 exposição (não necessariamente contaminação), 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.

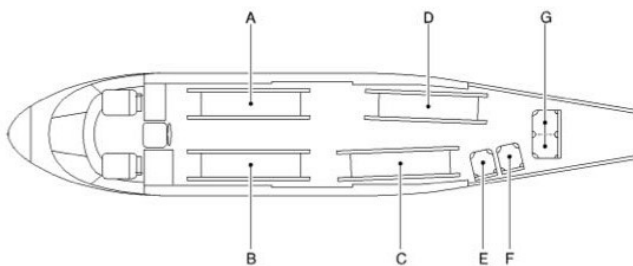


Fig. 1. Posicionamento de macas na aeronave H-36 para transporte aeromédico (adaptado de [6]).

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 parte anterior 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 no Brasil 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 (espalhamento por objetos circundantes – radiação secundária) e pela absorção no organismo [7]. Os dosímetros utilizados para dosimetria pessoal devem ser calibrados com base na grandeza operacional Equivalente de Dose Pessoal ($H_p(d)$) ou grandeza similar, a qual deve ser convertida em dose efetiva (E) levando-se em consideração os fatores ocupacionais aplicáveis a cada situação. Para a avaliação de órgãos profundos e o controle da dose efetiva $H_p(10)$, com profundidade $d = 10$ mm, também conhecido como dose equivalente de profundidade, é uma boa referência. Para doses baixas, típicas de missões dessa natureza, com exposição de corpo inteiro isotrópica (uniforme em 3D), o valor de $H_p(10)$ fornece uma estimativa razoável da dose efetiva (E) para fins de proteção radiológica [8].

O campo de radiação mensurado por monitores de ambiente é diferente de dosímetros pessoais, e devem ser calibrados com base na grandeza operacional Equivalente de Dose Ambiente ($H^*(d)$) e Equivalente de Dose Direcional ($H'(d,\Omega)$). $H^*(d)$ é o equivalente de dose que seria produzido pelo campo correspondente expandido e alinhado à uma esfera ICRU a uma profundidade d , no raio oposto à direção do campo alinhado, em um ponto do campo de radiação. $H'(d,\Omega)$, por sua vez, é similar ao $H^*(d)$, porém em um raio numa direção especificada Ω . Ambas grandezas devem ser convertidas para E considerando os fatores ocupacionais aplicáveis em cada situação. O valor recomendado de d para dose efetiva é de 10 mm, que é o valor que este trabalho utiliza.

A dose efetiva (E) 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 recomendados pelas normas e regulamentos [9], embora não seja a grandeza na qual os equipamentos de monitoração são calibrados.

III. ESTUDO DE CASO PARA TRIPULAÇÕES E EQUIPES

Como dosímetros de $H_p(10)$, os dosímetros individuais em geral são calibrados para utilização na parte anterior 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 ordinária pode não oferecer 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, por meio da análise da relação entre grandezas de proteção (E) e grandezas operacionais (H^* ou H_p) para gamas e nêutrons.

Considerando a geometria das cápsulas (fontes de radiação) em relação aos tripulantes no H-36, observa-se que sua condição de trabalho implica em uma exposição pósterio-anterior (PA) 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 publicação mais recente da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) [9] não dispõe de resultados diretos de correlação de $H_p(10)$ para fótons, porém afirma que a relação entre $H_p(10)$ e E para diferentes geometrias se comporta de maneira similar à relação de $H^*(10)$ e E de acordo com a energia do fóton, então esta relação também é estudada, como mostrado na Fig. 2. Nota-se que a grandeza operacional superestima a dose efetiva para energias até aproximadamente 4 MeV, para qualquer geometria de exposição, a partir de onde começa a subestimar de forma significativa. O intervalo de fótons até 4 MeV compreende a maioria das fontes de radiação encontradas em situações QBRN, e a superestimação não será considerada neste trabalho, visto que implica num fator favorável à segurança das equipes.

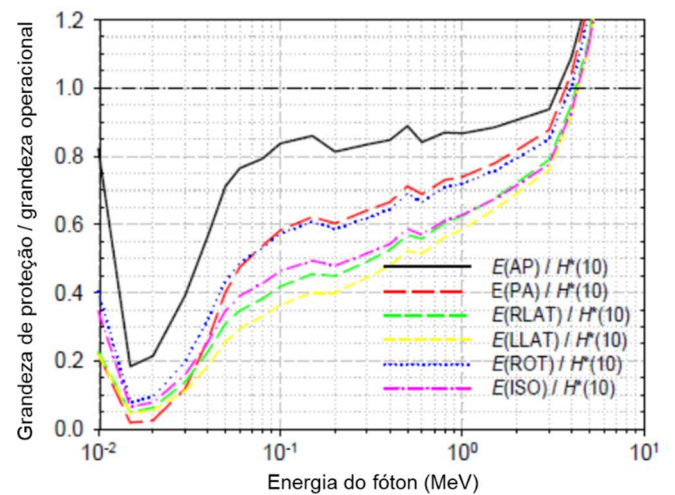


Fig. 2. Relação entre a dose efetiva (E) e o equivalente de dose ambiente ($H^*(10)$) para diferentes geometrias de incidência em função da energia do fóton (adaptado de [9]).

Para fótons, a publicação mais recente da ICRP [9] relaciona apenas gráficos de $H_p(10)$ com $H^*(10)$, sem definição de geometria, portanto faz-se necessário utilizar gráficos da publicação anterior da ICRP [10] para comparar adequadamente as relações entre as grandezas.

A Fig. 3, extraída de [10], apresenta 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 (radiação eletromagnética). 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.

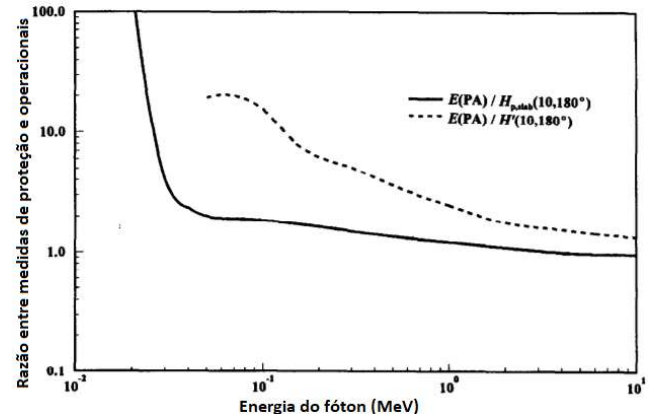


Fig. 3. Relação entre a dose efetiva (E) e o equivalente de dose pessoal para incidência pósterio-anterior ($H_p(10,180)$) em função da energia do fóton incidente (adaptado de [10]).

De forma similar, a Fig. 4 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 mais baixas (até cerca de 70 keV), como o ^{241}Am (60 keV), sendo um estimador adequado para energias acima desse valor.

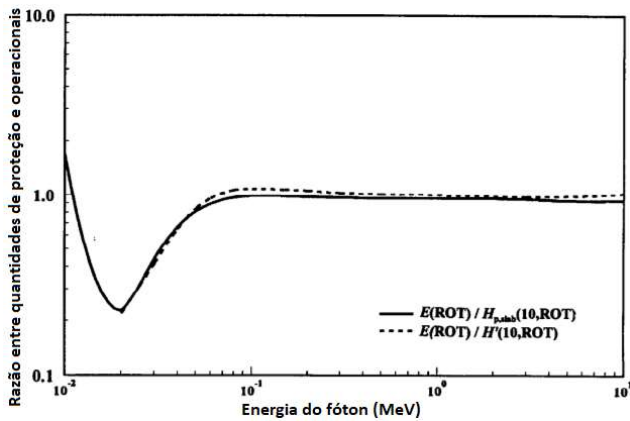


Fig. 4. Relação entre a dose efetiva (E) e o equivalente de dose pessoal para incidência rotacional ($H_p(10,ROT)$) em função da energia do fóton (adaptado de [10]).

Para incidência de nêutrons, as relações entre os coeficientes se alteram, devido à diferença nos efeitos ocasionados pelas partículas. A energia depositada na geometria PA pode ser comparada com os coeficientes de conversão para $H^*(10)$ e $H_p(10)$ para diferentes incidências. 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 conservadora (pessimista) para a dose efetiva.

Entretanto, para a situação de trabalho típica das equipes em missões QBRN, pode-se observar, na Fig. 5, que a medida de $H^*(10)$ é representativa do E (ou superestima esta grandeza) para nêutrons de energias até 30 MeV, para incidência PA e rotacional. Esse intervalo inclui todas as formas isotópicas de nêutrons, e energias mais altas somente são encontradas em aceleradores de partículas, que não é o caso deste estudo. Porém, como nêutrons são altamente penetrantes, não há um consenso sobre coeficientes de conversão para equivalente de dose direcional ou pessoal para nêutrons [10], por isso os valores teóricos não podem ser comparados diretamente com os experimentos realizados.

A Tabela I resume a análise realizada nesta seção.

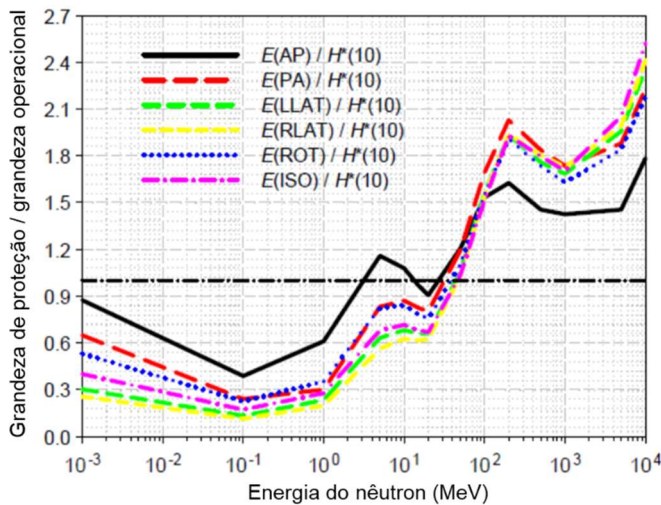


Fig. 5. Relação entre a dose efetiva (E) e o equivalente de dose ambiente ($H^*(10)$) para diferentes geometrias de incidência em função da energia do nêutron (adaptado de [9]).

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

Grandeza	Condição	Aplicabilidade	Resultado	Ref.
$E(PA)/H_p(10,180)$ para RX e gama	Dosímetro posicionado na lapela, com incidência PA	Condição ocupacional dos pilotos	Subestima a dose efetiva por um fator de 1,5 a 2, dependendo da energia, para energias acima de 30 keV	Fig. 3
$E(ROT)/H_p(10,ROT)$ para RX e gama	Dosímetro posicionado na lapela, com incidência ROT	Condição ocupacional das equipes médicas	Superestima a dose efetiva até 70 keV e representa adequadamente para energias superiores	Fig. 4
$H^*(10)$ para RX e gama	Monitores eletrônicos medindo no ar	Monitoramento de área	Representa adequadamente ou superestima a dose efetiva até 4 MeV	Fig. 2
$H^*(10)$ para campos nêutronicos	Medição na posição do piloto com monitores calibrados em $H^*(10)$	Monitoramento de área	Representa adequadamente ou superestima a dose efetiva até 40 MeV	Fig. 5

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 no Laboratório de Radiação Ionizante (LRI) do Instituto de Estudos avançados (IEAv) do DCTA, medindo-se as taxas de $H^*(10)$ por meio de detectores portáteis de radiação, conforme arranjo experimental apresentado na Fig. 6.

Apesar de os monitores de radiação serem calibrados em $H^*(10)$ – não em $H_p(10)$ – nossa análise é realizada com os dispositivos junto ao corpo, caracterizando medidas de equivalente de dose pessoal – não equivalente de dose ambiente. Como o estudo visa analisar apenas valores relativos de medidas em diferentes geometrias de incidência, e não os valores absolutos em si, o arranjo é válido. Os resultados, então, são comparados com a predição teórica da relação entre grandezas de proteção e operacionais para $H_p(10)$ tanto para monitores, quanto para dosímetros.

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

- Simulador antropomórfico humano feminino do tipo Alderson RANDO [11];
- Detector de radiação gama tipo RadEye G-10;
- Detector de gama e nêutrons tipo RadEye GN;
- Dosímetros pessoais termoluminescentes (TLD), fornecidos pela Metrobras;
- Duas fontes de radiação gama de ^{60}Co , com energia média em torno de 1,25 MeV, uma de baixa atividade e outra com maior atividade (alteram o tempo de exposição necessário para aquisição de dados mensuráveis e confiáveis); e
- Fonte de nêutrons de $^{241}Am/Be$ com espectro de nêutrons com energia média em torno de 4,5 MeV e máxima em torno de 11 MeV.



Fig. 6. Arranjos experimentais utilizando o simulador antropomórfico.

Os testes com o simulador antropomórfico, utilizando um macacão de voo, e com auxílio de uma trena a laser, foram realizados em dois blocos:

- (i) O simulador foi posicionado à 3,80 m da fonte de $^{241}\text{Am/Be}$ e da fonte de ^{60}Co , utilizando os monitores RadEye GN e RadEye G-10, respectivamente. A distância escolhida foi referente à menor distância de um tripulante, no caso, o mecânico de voo, a uma das macas em situação normal; e
- (ii) O simulador foi posicionado à 3,06 m da fonte forte de ^{60}Co , devido a restrições nas dimensões do laboratório – irradiador isolado, buscando minimizar o retro espalhamento. Neste caso, foram utilizados os dosímetros TLD.

Foram realizadas medidas em três posições diferentes:

- a) *Geometria AP*: (i) simulador de frente para a fonte com os monitores nos bolsos frontais e (ii) dosímetros na lapela e no bolso frontal, 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) *Geometria PA*: (i) simulador de costas para a fonte com os monitores nos bolsos frontais e (ii) simulador de frente para a fonte com dosímetros nas costas do macacão, simulando a condição de utilização de dosímetros pessoais com incidência traseira do campo, ou seja $H_p(10, 180^\circ)$; e
- c) *Proposta no bolso lateral*: (i) simulador de costas para a fonte com os monitores no bolso lateral e (ii) simulador de frente para a fonte com dosímetros no bolso lateral, sendo esta uma geometria de uso de dosímetros pessoais proposta pelo presente trabalho.

Inicialmente, mediu-se o *background* ambiental para subtrai-lo das medidas posteriores e 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, FONTES DE RADIAÇÃO E DETECTORES.

Detector	RadEye G-10	RadEye GN	Dosímetro TLD	Dosímetro TLD
Posição	Bolso frontal	Bolso frontal	Lapela	Bolso frontal
Fonte	Gama (^{60}Co)	Nêutron ($^{241}\text{Am/Be}$)	Gama (^{60}Co)	Gama (^{60}Co)
Condição	Razão entre a dose medida e incidência frontal			
A (AP)	$1 \pm 0,02$	$1 \pm 0,09$	$1 \pm 0,05$	$1 \pm 0,14$
B (PA)	$0,60 \pm 0,02$	$0,90 \pm 0,11$	$0,43 \pm 0,02$	$0,64 \pm 0,06$
C (com monitor lateral)	$0,92 \pm 0,02$	$1,22 \pm 0,12$	$1,09 \pm 0,33$	$1,61 \pm 0,51$

Observa-se que, para radiação gama de ^{60}Co , os resultados de dosímetros e monitores na condição B (PA) são basicamente os mesmos, podendo subestimar a dose efetiva no organismo de 36-57%, dependendo do dispositivo utilizado e sua posição, sendo este resultado consistente com a indicação teórica obtida a partir da Fig. 3.

Para nêutrons, a medição efetuada indica que a utilização do dosímetros na posição da lapela com exposição traseira (condição B) subestima a dose efetiva em cerca de 10% para a fonte de $^{241}\text{Am/Be}$.

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

Além das observações sobre a amplitude e abrangência das ações, dentro das diferentes etapas do atendimento à este tipo de cenário, 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 parte anterior do tronco, 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, representa adequadamente ou superestima E. No caso específico da fonte utilizada no presente estudo, houve uma subestimação de 10%.
- 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. Recomenda-se, porém, uma análise mais profunda desse posicionamento.

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.

Essa divergência precisa ser levada em consideração na interpretação de grandezas operacionais pelo supervisor de radioproteção responsável pela operação, na orientação de posicionamento dos dispositivos e na determinação de níveis de referência para a missão.

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.

É clara 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] J. C. M. Silvestre, “Technical study on the use of aircraft in radiological and nuclear scenario”, 2021, Dissertation of Master of Science in Space Science and Technologies, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [4] Comando da Aeronáutica,, “Manual Básico de Descontaminação Radiológica de Aeronaves”, MCA 55-39, Brasil, 2011.
- [5] IAEA, “IAEA safety glossary: terminology used in nuclear safety and radiation protection”, 2007 edition, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007.
- [6] Helibras, “Manual de voo complementar”, EC 725 AP.
- [7] 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.
- [8] N. Connor, “O que é equivalente à dose pessoal – Hp (10) – Hp (0,07) – Definição”, *Radiation Dosimetry*, 24 Junho 2020. Disponível em: <<https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-equivalente-a-dose-pessoal-hp-10-hp-007-definicao/>>. Acesso em: 04/05/2023.
- [9] 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.
- [10] ICRP, “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation”, ICRP Publication 7., Ann. ICRP 26 (3-4), International Commission of Radiological Protection, 1996.
- [11] Radiology Support Devices, “The Alderson Radiation Therapy Phantom”, Disponível em: < <https://rsdphantoms.com/product/the-alderson-radiation-therapy-phantom/> >. Acesso em: 04/05/2023.