

CENTRO UNIVERSITÁRIO BRASILEIRO - UNIBRA
TECNÓLOGO EM RADIOLOGIA

CRISTIANO GOIANA DA SILVA
FABÍOLA SANTOS DE SOUZA
GIAN BOM DA SILVA
MARIA DAS GRAÇAS DE SANTANA
MISLLEY CRISTINA DA SILVA
TATIANE BONFIM DA SILVA

**DOSIMETRIA DE TRIPULANTES EM AERONAVES
COMERCIAIS DEVIDO A RADIAÇÃO CÓSMICA**

RECIFE/2021

CRISTIANO GOIANA DA SILVA
FABÍOLA SANTOS DE SOUZA
GIAN BOM DA SILVA
MARIA DAS GRAÇAS DE SANTANA
MISLLEY CRISTINA DA SILVA
TATIANE BONFIM DA SILVA

DOSIMETRIA DE TRIPULANTES EM AERONAVES COMERCIAIS DEVIDO A RADIAÇÃO CÓSMICA

Artigo apresentado ao Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA,
como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em
Radiologia.

Professor(a) Orientador(a): Elaine Cavalcanti Rodrigues Vaz

RECIFE/2021

D723

Dosimetria de tripulantes em aeronaves comerciais devido a radiação cósmica. / Cristiano Goiana da Silva; Fabíola Santos de Souza; Gian Bom da Silva; Maria das Graças de Santana; Misley Cristina da Silva; Tatiane Bonfim da Silva. - Recife: O Autor, 2021.

21 p.

Orientador(a): Elaine Cavalcanti Rodrigues Vaz.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA. Tecnólogo em Radiologia, 2021.

1.Radiação Cósmica. 2.Dosimetria. 3.Tripulantes.
4.Aeronauta. I. Centro Universitário Brasileiro - UNIBRA. II. Título.

CDU: 616-073

CRISTIANO GOIANA DA SILVA
FABÍOLA SANTOS DE SOUZA
GIAN BOM DA SILVA
MARIA DAS GRAÇAS DE SANTANA
MISLLEY CRISTINA DA SILVA
TATIANE BONFIM DA SILVA

DOSIMETRIA DE TRIPULANTES EM AERONAVES COMERCIAIS DEVIDO A RADIAÇÃO CÓSMICA

Artigo aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Radiologia, pelo Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA, por uma comissão examinadora formada pelos seguintes professores:

Nome do Professor(a) Orientador(a)
Professor Orientador

Professor(a) Examinador(a)

Professor(a) Examinador(a)

Recife, _____ de _____ de 2021.

NOTA: _____

Dedicamos esse trabalho primeiramente a Deus, que com sua graça estamos vencendo cada batalha e avançando na trajetória da vida. Segundamente as pessoas que nos dá forças para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os nossos familiares que nos incentivaram, com toda paciência, confiança e fé na nossa capacidade.

Aos nossos professores de toda a graduação que transmitiram com virtude e paixão seus conhecimentos, com calma, clareza.

Aos companheiros de classe, que sempre nos apoiou e ofereceram total suporte.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”
(José de Alencar)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 DELINEAMENTO METODOLÓGICO.....	10
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
3.1 DESCOBERTA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES.....	10
3.2 RADIAÇÃO CÓSMICA.....	12
3.2.1 RADIAÇÃO CÓSMICA GALÁCTICA.....	12
3.2.2 RADIAÇÃO CÓSMICA SOLAR.....	13
3.2.3 RADIAÇÃO CÓSMICA APRISIONADA.....	13
3.3 A ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL.....	13
3.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA COM A ATMOSFERA.....	14
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	19
REFERÊNCIAS.....	20
ANEXOS.....	22

DOSIMETRIA DE TRIPULANTES EM AERONAVES COMERCIAIS DEVIDO A RADIAÇÃO CÓSMICA

Cristiano Goiana da Silva
Fabíola Santos de Souza
Gian Bom da Silva
Maria Das Graças de Santana
Misley Cristina da Silva
Tatiane Bonfim da Silva
Elaine Cavalcanti Rodrigues Vaz¹

Resumo

As radiações possuem um papel fundamental na vida humana, sendo englobada em diversos aspectos, facilitando diagnósticos e realizando terapias pela medicina, inspecionando materiais no meio industrial, entre outros setores. Contudo, é sabido que o uso inadequado ou utilização sem as devidas precauções podem gerar efeitos biológicos de diferentes magnitudes. O universo vive em constantes interações, por exemplo: nas estrelas, como o sol, há grande liberação de energia devido a fusão nuclear, grande parte desta energia se transfere em forma de calor, gerando também átomos de hélio a qual são acelerados em todas as direções. A atmosfera terrestre tem um papel fundamental para a proteção da humanidade da radiação cósmica, capaz de absorver boa parte dessas energias, entretanto, essa interação gera uma cascata de partículas de menor energia. Alguns estudos comprovam que a altitude e a latitude afetam diretamente a intensidade dessas energias, quanto maior a altitude, maior a intensidade dessas partículas, analisando desta seguinte forma, os tripulantes presentes nas aeronaves comerciais cada vez mais tecnológicos elevando ainda mais suas altitudes nos voos, os tornando mais expostos a essas energias. De acordo com dados fornecidos pelas agências de proteção radiológica, algumas dosimetrias de até 7 mSv, apresentando uma média de 2,4 mSv, valores superiores ao limite de dose para gestante de 1 mSv. Gerando assim, um questionamento quanto à legislação de proteção radiológica para esta classe, com o intuito de registrar, monitorar, as doses recebidas, a qual existem diversos fatores que influenciam na dosagem, altitude, duração do voo, ciclo solar, entre outros.

Palavras-chave: Radiação Cósmica, Dosimetria, Tripulantes, Aeronauta.

1 INTRODUÇÃO

As radiações possuem um papel fundamental para o ser humano, desde a descoberta dos raios-x, o diagnóstico de pacientes sem a necessidade de um procedimento invasivo tornou-se mais acessível. Desta forma, houve uma redução considerável quanto a infecções hospitalares, principalmente em meados de 1896, entretanto, o descobrimento da radioatividade¹, acarretou uma “febre”, onde havia alimentos, medicamentos, produtos de beleza, utensílios domésticos a base de Rádio e Polônio, radioisótopos encontrados na natureza, nesse período não havia ciência dos malefícios causados pelo mau uso dessas radiações (FERREIRA, 2021).

Este acontecimento, pode nos levar ao seguinte questionamento: baseado no modelo cosmológico do *Big Bang*, o qual gerou elementos químicos instáveis encontrados naturalmente no planeta terra, será que há também a presença de outras radiações rodeando todo o nosso sistema solar e universo?

É sabido que no sol ocorrem diversas interações entre os átomos, entre estas, a fusão nuclear, que consiste em uma união entre dois átomos leves conhecidos como deutério e trítio (H^2 e H^3) (SOBRINHO,2012), resultando em uma forte liberação de energia em forma de calor decorrente da formação do He (Hélio).

A radiação cósmica trata-se de energias liberadas devido a interações em todo o universo, a qual se constitui por fluxo primário isotrópico de radiações corpusculares (em sua maioria composta por átomos ionizados, e em menor parcela de elétrons, nêutrons e neutrinos) e radiações eletromagnéticas de alta energia (PEREIRA, 2015). Essas energias são originadas no meio interestelar e extragaláctica, ocasionadas por supernovas, dando origem a uma poeira cósmica. Para o nosso planeta terra, grande parte dessas radiações se origina do sol, presente na via láctea, a qual a emissão de radiação está diretamente relacionada com a atividade solar (LOBATO, 2019).

Na atmosfera terrestre, a interação dessas radiações a tornam mais intensas de acordo com as camadas mais externas, ou seja, quanto maior for a altitude, maior a concentração de radiação cósmica, podendo gerar preocupação aos profissionais responsáveis pelo tráfego aéreo. Devido ao avanço tecnológico nas aviações, cada vez mais pode-se realizar voos em maiores altitudes, conseqüentemente os torna mais expostos as energias oriundas das interações que ocorrem no universo. Devido

¹ Consiste na capacidade de certos elementos químicos considerados como instáveis emitem energia de seus núcleos com o intuito de se estabilizar.

a isto, devem ser analisadas as condições trabalhistas referentes aos profissionais de voos comerciais, com o intuito de preservar a saúde a longo prazo.

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar, estudar e alertar os efeitos causados pela radiação cósmica dando ênfase aos profissionais que possuem maior tempo de exposição a esta energia, decorrente a altitude atingida pela aeronave, bem como para as viagens mais próximas dos polos magnéticos da terra (em que a dose absorvida pode ser ainda maior).

2 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

A presente pesquisa foi constituída através de revisão bibliográfica e documental, os artigos e documentos foram obtidos pelos sites **Google Acadêmico** e **SciELO**, foram utilizados 30 artigos científicos, qualitativos e quantitativos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DESCOBERTA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

Inicialmente, a radiação era desconhecida pela humanidade, juntamente com os efeitos referentes ao uso inadequado dessa energia. No ano de 1895, o físico Wilhelm Conrad Roentgen realizava seus estudos sobre os raios catódicos, utilizando uma ampola de Crookes, a qual tinha como objetivo a aceleração de elétrons através do efeito termiônico, formando uma nuvem de elétrons livres, onde eram acelerados e direcionados para a ampola, ao haver a interação destes elétrons, causava uma luminescência no vidro (MARQUES, 2019). Entretanto, Roentgen questionou o que ocorreria com os raios catódicos caso fosse adicionado um anteparo metálico entre as extremidades da ampola.

Ao colocar este anteparo, realizando a DDP (diferença de potencial elétrico) notou-se a ausência da luminescência no vidro, porém, uma placa fosforescente localizado na extremidade da sala é sensibilizada, incrédulo com a situação, Roentgen agora envolve a ampola em uma caixa escura, imaginando que a reação não irá acontecer, entretanto, ao realizar novamente a aceleração dos elétrons a placa floresceu novamente, sem compreender o ocorrido, denominou-se de raios-x, o raio misterioso (FERREIRA, 2021).

Em 1896, uma descoberta revolucionou a ciência, descobriu-se a radioatividade, a capacidade de elementos encontrados na natureza de emitir energia como forma de se estabilizar, Henri Becquerel armazenou uma rocha em sua gaveta, a qual tinha uma película fotográfica. No dia seguinte, ao retirar a rocha, notou que a película havia sido sensibilizada pela rocha, Becquerel chegou à conclusão de que havia emissão de energia daquele material (CAVALCANTE, 2017).

Posteriormente, Marie Curie juntamente com Pierre Curie ao estudar essa energia oriunda desses materiais, chegou à conclusão de que as emissões de energia fazem com que o elemento químico sofra alterações estruturais, fazendo com que haja uma mudança de elemento químico, se transformando em um novo elemento, esse fenômeno da natureza foi denominado de radioatividade, juntamente com a descoberta de dois novos elementos químicos radioativos, o Ra-226 (rádio) e Po-218 (polônio) (CARDOSO, 2000).

Infelizmente a população não conhecia os efeitos biológicos gerados pela radiação ionizante², pois não se tinha consciência de radioproteção, onde as pessoas consumiam produtos contendo radioisótopos, tornando-se fontes radioativas. Desta forma as radiações estavam causando alterações em células, proteínas e até mesmo em moléculas de DNA, causando assim a aparição da doença do século, o câncer (XAVIER, 2007).

Com o surgimento de alterações celulares tornou-se necessário a utilização de proteção radiológica, que é composta por três fatores (SOARES, 2011):

- Tempo de exposição, definido como o tempo em que as células (ser humano) está sendo exposta a radiação ionizante,
- Distância em que se localiza a origem da radiação, quanto menor a distância mais energética será a radiação;
- Blindagem, barreiras ou estruturas capazes de absorver aquela radiação, fazendo com que ocorra o efeito fotoelétrico³ na estrutura

O conceito de radioproteção começou a ser utilizado, fazendo com que haja a preservação da saúde a longo prazo.

² Radiação que possui energia suficiente para ionizar o átomo da matéria, ou seja, ejetar elétrons.

³ Efeito em que há uma transferência total da radiação, para o elétron localizado na matéria.

3.2 RADIAÇÃO CÓSMICA

Em 1911, o físico italiano Domenico Pacini (1878 - 1934) realizou um estudo que revolucionou a física, ao posicionar um eletroscópio nas águas do Golfo de Gênova com o objetivo de medir a condutividade residual do ar presente no interior do aparelho. O resultado estimado confirmaria a hipótese de que o solo emitiria radiação a qual ioniza os átomos gasosos da atmosfera terrestre, entretanto, os resultados coletados pelo estudo apresentaram pouca ionização dos átomos gasosos (BUSTAMANTE, 2013).

Dando seguimento aos estudos de Domenico Pacini, o físico austríaco Victor Franz Hess (1883 – 1964) supôs que a energia responsável pela ionização dos átomos gasosos da atmosfera seria originada da própria atmosfera, a fim de comprovar sua hipótese, Hess realizou um experimento a bordo de balões chegando à altitude 5.350 m, portando um eletroscópio associado a um detector de ionização (MARTINHO, 2018). O resultado obtido determinou um aumento da ação da radiação ionizante à medida que maior altura se alcançava, trazendo a conclusão de que a radiação responsável pela ionização gasosa se originava do meio extraterrestre, sendo chamada de radiação cósmica (TREVIZOLI, 2020).

Pfotzer no ano de 1936 constatou que a intensidade das radiações não cresce continuamente com relação ao aumento da altitude, a qual atingia seu pico de intensidade ao alcançar aproximadamente 15 km a 20 km de altitude, após 20 km de altitude esta intensidade decresce rapidamente (OKUNO, 2013). A altitude em que a intensidade da radiação é máxima tem como nomenclatura de máximo de Pfotzer, a qual está altitude varia de acordo com o ciclo solar e com a latitude geomagnética.

A radiação cósmica primária (RC) tem como composição partículas e ondas oriundas do universo a partir de estrelas e fenômenos cósmicos em todo o universo, sendo classificadas de acordo com a sua origem como *Galactic Cosmic Radiation* (GCR) - extragaláctica, galáctica, interplanetária, magnetosfera; *Solar Cosmic Radiation* (SCR) – radiação cósmica solar, a qual suas emissões estão diretamente relacionadas com a atividade estelar, (DORMAN, 2004).

3.2.1 RADIAÇÃO CÓSMICA GALÁCTICA

A GCR tem é composta de partículas aceleradas com energia de até 10^{20} eV originadas principalmente por supernovas, estrelas binárias ou por onda de choque

no espaço interestelar. Aproximadamente 98% da composição da GCR é de núcleos (sendo subdivididos em 87% hidrogênio, 12% de hélio e 1% aproximadamente de núcleos pesados) e 2% por pósitrons e elétrons (DORMAN, 2004).

3.2.2 RADIAÇÃO CÓSMICA SOLAR

O campo magnético solar se distende, contrai e evolui ao longo do tempo. As manchas solares que se apresentam na superfície estelar são consideradas indícios visíveis de fenômenos magnéticos, causando uma descarga de matéria composta por hidrogênio e hélio. Estas partículas são aceleradas em direção a terra com velocidade aproximada de 450 km/s, chamadas de tempestades solares (DAL POZ, 2006). O tamanho das erupções solares decorrente do seu ciclo em ato comparativo ao tamanho do planeta terra se encontra no anexo 1, localizado na página 22;

A Terra está conectada ao sol devido às linhas do campo magnético, a qual o número de partículas e o espectro de energia observados por um evento solar depende desta ligação.

3.2.3 RADIAÇÃO CÓSMICA APRISIONADA

O planeta terra é protegido de forma parcial dessas partículas devido ao campo magnético presente na terra e na região interplanetária, estudos geomagnéticos afirmam que partículas de baixa energia são aprisionadas nas linhas de campo magnético terrestre, onde essas partículas são constituídas por elétrons, prótons e em pouquíssima quantidade alguns íons pesados (FEDERICO, 2009). Estas partículas giram em formato de espiral pelas linhas do campo, originando cinturões dessas partículas envolvendo o planeta, chamado de cinturões de Van Allen, descobertos pelo físico James Van Allen em 1958 (DUTRA, 2020). É possível visualizar a influência do vento solar no campo geomagnético no anexo 2 na página 22;

3.3 A ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL

O campo magnético terrestre (CMT) possui algumas anomalias, dentre estas, a anomalia magnética do atlântico sul (AMAS) tem uma atenção especial, onde sua origem pode estar associada a uma característica particular do material constituinte da região externa do núcleo terrestre (HARTMANN, 2005). A região do AMAS tem como característica possuir menor intensidade do CMT, onde a “espessura” do

“isolamento” proporcionado pelo cinturão de Van Allen é significativamente menor, tornando a localização com intensa radiação mais próximo a terra, agindo como uma cavidade de entrada das partículas (HEIRTZLER, 2002).

O AMAS sofre alterações com o passar dos anos, modificando sua localização e tamanho, embora esse fenômeno magnético não seja explicado cientificamente. Podemos ver sua evolução de acordo com o tempo no anexo 3, localizado na página 23.

3.4 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA COM A ATMOSFERA

A fluência e composição da RC varia de acordo com o ciclo solar a qual possui um período de 11 anos. Ao percorrer o meio interplanetário e o campo geomagnético, uma parcela dessas partículas penetram a atmosfera, gerando uma cascata nucleônica devido a interação das partículas oriundas da RC com os átomos que compõem a atmosfera terrestre, esta cascata é conhecida como chuviros de radiação cósmica secundária (FAUTH, A. C. et al, 2007). Esta cascata nucleônica gerada a partir da interação da radiação com a atmosfera está ilustrada na figura 4, localizada na página 23. A radiação cósmica secundária inclui píons, que se decaem para múons, neutrinos e raios gama, bem como elétrons, pósitrons originados do decaimento do múon e raios gama.

A produção da radiação cósmica secundária torna-se mais intensa a uma altitude de aproximadamente 55 km, a partir deste ponto, há uma crescente na fluência dessas partículas atingindo seu máximo a uma altitude de 20 km, esta região de máximo é chamada de Pfotzer. Após este ponto máximo, a fluência é reduzida drasticamente devido a perda de energia por colisão (ALVES, 2017).

Levando em consideração a RC e seus princípios, se o tráfego aéreo de aeronaves comerciais for analisado, devido a localização em uma altitude elevada se tem maior concentração de energia cósmica, os profissionais atuantes na aeronave estão expostos durante o percurso a ser realizado, gerando assim alguns efeitos biológicos aos envolvidos.

Desta forma o presente trabalho tem como objetivo analisar as interações dessas radiações aos tripulantes de voos comerciais e suas respectivas problemáticas a esta exposição. Alertar com relação à dosimetria destes profissionais perante a legislação de limites de doses para os IOEs.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desde o reconhecimento dos profissionais ocupacionalmente expostos, em 1991, se iniciaram os registros e análises contínua de dados da exposição à radiação ocupacional dos tripulantes de voos comerciais tem sido realizado por diversos países, assim como, as publicações de recomendações preventivas estabelecidas pela ICPR (*International Commission on Radiological Protection*), conseqüentemente adotadas por entidades nacionais. O interesse surgiu após o significativo avanço tecnológico referente às viagens *performance*, a qual realiza voos em ambientes mais expostos, com relação a altitude e rotas localizadas nos polos (BAGSHAW, 2014).

Os métodos atuais para dosimetria de RC podem ser mensurados de duas formas: ativamente e passivamente. A forma ativa se dá pela medição direta de todas as partículas ionizantes que interagem com os tripulantes, através do uso de equipamentos específicos capazes de coletar continuamente, sendo considerada a forma mais precisa. Entretanto, é a forma mais trabalhosa e com alto custo para as companhias aéreas.

Para a dosimetria em voos comerciais, se faz a utilização de medição passiva das RC, realizada através de *softwares* específicos capazes de calcular a exposição dos tripulantes por meio de códigos de programação e da interpolação linear de dados reais inseridos, a qual necessita a execução a validação dos programas, “calibragem”, com medições diretas e posteriormente comparações entre a real exposição e a medição calculada pelo *software*. Atualmente os programas mais utilizados por entidades protetivas ou reguladoras estão dispostos na tabela a seguir:

PROGRAMA / CÓDIGO	FATOR DE CONVERSÃO	TIPO DE CÁLCULO	MEIO DISPONÍVEL	DESENVOLVEDOR
AVIDOS	ICPR 60 (ICPR,1991)	Rota	<i>On-line</i>	<i>Austrian Institute of Technology (AIT)</i>
CARI-6	ICPR 60 (ICPR,1991)	Rota, coordenada fixa	<i>Pacote de software</i>	<i>Civil Aerospace Medical Institute (FAA)</i>
EPCARD	ICPR 60 (ICPR,1991)	Rota, coordenada fixa	<i>On-line</i>	<i>German Research Center of Environmental Health (HMGU)</i>

EXPACS	ICPR 60 ou ICPR 103 (ICPR,1991; ICPR,2008)	Coordenada fixa	<i>Pacote de software</i>	Método Monte Carlo
PCAIRE	ICPR 60 (ICPR,1991)	Rota	<i>On-line</i>	Código FLUKA e LUIN
QARM	ICPR 74 (ICPR,1997)	Rota, coordenada fixa	<i>On-line</i>	Método Monte Carlo
SIEVERT	ICPR 60 e EPCARD (ICPR,1991)	Rota	<i>On-line</i>	<i>French General Directorate of Civil Aviation (DGAC)</i>

Software utilizados para medição passiva no mundo - (HEILBRON FILHO et al., 2012)

Os *softwares* apresentados acima para realizar os cálculos de estimativa dosimétrica, levam em considerações os seguintes dados:

- I. A data e duração total do voo;
- II. As altitudes de todos os momentos do voo;
- III. A atividade solar no período de realização do voo;
- IV. A latitude e longitude de cada ponto da rota sobrevoada;
- V. A qualidade das radiações na rota executada pela aeronave;
- VI. As coordenadas geográficas do aeroporto de origem e destino;

A exposição ocupacional dos tripulantes dos voos comerciais a radiação cósmica, em média, apresenta valores de dosagens entre 1 a 5 $\mu\text{Sv/h}$, nos voos de longas distâncias essas dosagens podem ser ainda mais intensas, apresentando dosagens entre 4 e 5 $\mu\text{Sv/h}$, enquanto voos de curtas distâncias apresentam dosagens entre 1 e 3 $\mu\text{Sv/h}$. Como parâmetro comparativo, os dados obtidos pela aeronave Concorde, a qual realizou uma medição ativa das RC, coletou a dosimetria entre 12 e 15 $\mu\text{Sv/h}$ (cerca de 3 vezes maior que os voos comerciais), devido a altitude ser superior (ICPR,2016).

Com a ausência de uma legislação brasileira a qual determine a empresas aéreas a registrar oficialmente a exposição dos tripulantes, na tabela a seguir, são apresentados dados reais fornecidos por diversos países da União Europeia (onde há a obrigatoriedade dos registros dosimétricos) de modo a demonstrar exemplos oficiais de doses (EAN, 2012).

PAÍS	MÉTODO DE AVALIAÇÃO	NÚMERO DE TRIPULANTES	DOSE ANUAL EFETIVA
Bélgica ⁽¹⁾	PCAIRE, CARI	2,912	Média: 1.27 mSv Máximo: 4.77 mSv
República Tcheca	CARI-6	2,158	Média: 1.09 mSv Máximo: 3.95 mSv
Dinamarca ⁽¹⁾	EPCARD, CARI-6	3,824	Média: 1.8 mSv Máximo: 6.0 mSv
Finlândia ⁽¹⁾	CARI-6	3,655	Média: 2.39 mSv Máximo: 5.6 mSv
França ⁽¹⁾	SIEVERT	19,830	Média: 2.2 mSv Máximo: 5.5 mSv
Alemanha ⁽¹⁾	EPCARD, PCAIRE	36,596	Média: 2.3 mSv Máximo: 7.0 mSv
Lituânia ⁽¹⁾	CARI-6	213	Média: 2 mSv Máximo: 4.57 mSv
Eslovênia ⁽¹⁾	CARI-6	322	Média: 1.16 mSv Máximo: 1.74 mSv
Suécia ⁽²⁾	CARI-6	1,431	Média: 2.55 mSv Máximo: 5.43 mSv
Holanda ⁽³⁾	CARI-6	11,100	Média: 1.73 mSv Máximo: 4.55 mSv
Reino Unido	NÃO INFORMADO	40,000	Média geral: 2 mSv

Fonte: Friedberg; Copeland (2003).

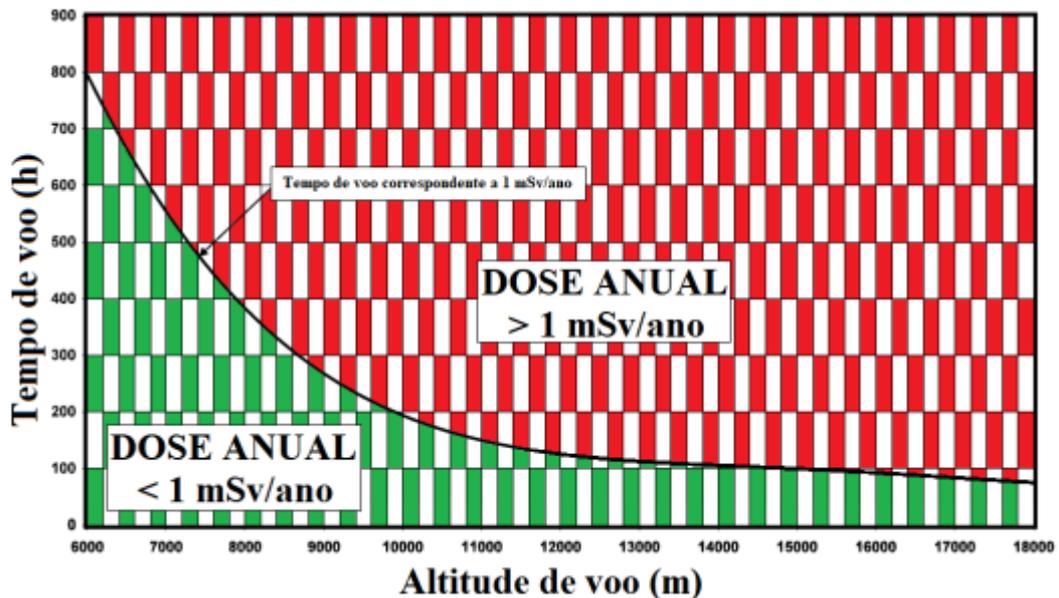
No Brasil, dados extraoficiais obtidos por pesquisadores, com medições diretas e comparações com cálculos obtidos pelo *software* CARI-6, indicam as doses dos tripulantes na tabela a seguir:

TRECHO	ALTITUDE	DOSE MÉDIA CALCULADA	DOSE MÉDIA REGISTRADA
Rio de Janeiro para Brasília	31.000 pés	1.41 $\mu\text{Sv/h}$	1.42 $\mu\text{Sv/h}$
Brasília para Manaus	35.000 pés	1.91 $\mu\text{Sv/h}$	1.87 $\mu\text{Sv/h}$
Manaus para Rio de Janeiro	37.000 pés	2.13 $\mu\text{Sv/h}$	2.12 $\mu\text{Sv/h}$

Doses médias extraoficiais no Brasil - (HEILBRON FILHO et al., 2012)

Considerando a dose média mais intensa demonstrada na tabela acima com valor de 2,12 $\mu\text{Sv/h}$, aplicando matematicamente ao limite máximo anual de 850 horas de voos no Brasil (resultando em 1,81 mSv/ano), o tripulante brasileiro ultrapassa o limite de 1 mSv/ano, tornando-o ocupacionalmente exposto, entretanto, permanece com a margem baixa em relação ao limite anual de dose máximo determinado pela CNEN, de 20 mSv/ano (HEILBRON FILHO et al., 2012). De acordo com as estimativas do *software* CARI-6, a dose média efetiva dos tripulantes na região brasileira anualmente varia entre 1,45 mSv e 1,67 mSv. Durante o máximo solar, 99,9% dos tripulantes brasileiros não ultrapassaram doses entre 2,31 a 2,73 mSv/ano (FEDERICO, 2011).

Os dados fornecidos pela entidade alemã (*Luftfahrt-Bundesamt*), constituiu um gráfico que determina a dose efetiva de 1 mSv em função do tempo de voo, juntamente com a altitude, afim de demonstrar os parâmetros para a classificação do indivíduo ocupacionalmente exposto a radiação cósmica:



Dose anual em função da altitude e tempo de voo- (HEILBRON FILHO et al., 2012)

Com a análise das informações dosimétricas informadas em todo o resultado obtido através das revisões bibliográficas, as doses coletadas de forma direta e passiva demonstram que as doses anuais dos profissionais presente nas aeronaves comerciais possuem uma margem significativa com relação às legislações a qual determinam uma dosagem de 20 mSv/ano como limite de exposição, entretanto, através das pesquisas realizadas torna-se preocupante os fatores de proteção radiológica com relação aos tripulantes, que por sua vez, chegam facilmente a dosagem de 1 mSv/ano, sendo considerados então como IOEs.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos dados expostos neste trabalho, tornou-se possível a compreensão dos impactos relacionados à exposição dos tripulantes dos voos comerciais a radiação cósmica, com o intuito de analisar uma legislação específica do governo brasileiro, a qual determine a obrigatoriedade de registro das doses individuais dos tripulantes pelas companhias aéreas, visando a proteção e preservação da saúde a longo prazo.

De acordo com os dados coletados por dosimetria passiva e ativa, pode-se afirmar que o risco ocupacional dos tripulantes de voos comerciais brasileiros, os danos biológicos causadas pela radiação cósmica é considerada relativamente baixa considerando o limite de dose de 20mSv/ano, entretanto, são bem significativas com relação a proteção radiológica. A preocupação com relação ao risco dos profissionais

da classe se dá justamente pela falta de conhecimento científico necessário para determinar os danos a longo prazo e as possíveis alterações nas dosagens com relação aos próximos anos, ressaltando a importância de legislações específicas com o intuito de controle e preservação da saúde dos aeronautas brasileiros.

A presente pesquisa foi realizada por meio de revisão bibliográfica, a qual demonstra incerteza científica, especialmente pela falta de dados e estudos a longo prazo com relação à temática. Assim como, a ausência de dados oficiais com relação aos tripulantes brasileiros, sendo assim, valores estimados, sem alta precisão acadêmica.

REFERÊNCIAS

ALVES, Matheus Carvalho. Estimativa da taxa de dose de radiação em tripulantes de aeronaves utilizando o método Monte Carlo. 2017.

BAGSHAW, Michael. Cosmic Radiation in Commercial Aviation. London: King's College

BUSTAMANTE, Martha Cecilia. A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, 2013.

CARDOSO, ELIEZER DE MOURA et al. Radioatividade. **Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN**, 2000.

CAVALCANTE, Fernanda. **Avaliação da radioatividade natural e artificial em rações comerciais para animais domésticos**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DAL POZ, William Rodrigo; DE OLIVEIRA CAMARGO, Paulo. Conseqüências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo com receptores GPS de simples freqüência. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p. 275-294, 2006.

DORMAN, L.I., Cosmic rays in the earth's atmosphere and underground. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.

DUTRA, R. S. et al. Efeitos do vento solar na magnetosfera terrestre: uma abordagem didática dos cinturões de Van Allen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.

EUROPEAN ALARA NETWORK (EAN). Results of the EAN request on radiation protection of aircraft crew. 2012. Disponível em: <https://www.eu-alara.net/index.php/activities/ean-documents-and-publications/docman-menu/survey/85-aircraft-crew/file.html>.

FAUTH, A. C. et al. Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço dos múons da radiação cósmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, p. 585-591, 2007.

FEDERICO, Claudio Antonio et al. Estudo da dose devida à radiação cósmica em tripulações no espaço aéreo brasileiro. **Anais do VIII Simpósio de Transporte Aéreo VIII SITRAER/II RIDITA**, p. 337-348, 2009.

FEDERICO, Claudio Antonio. Dosimetria da radiação cósmica no interior de aeronaves no espaço aéreo brasileiro. **São Paulo, Brasil: Instituto Nacional de Energia Nuclear**, 2011.

FERREIRA, Paulo. **Física: Radioatividade E Raios X**. Clube de Autores, 2021.

HARTMANN, Gelvam A.; PACCA, Igor G. Time evolution of the South Atlantic magnetic anomaly. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 81, p. 243-255, 2009.

HARTMANN, Gelvam Andre. **A anomalia magnética do Atlântico Sul: causas e efeitos**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HEILBRON FILHO, Paulo F. L. et al. A Simple Model to Estimate Radiation Doses to

HEIRTZLER, James R. The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 16, p. 1701-1708, 2002.

<http://www.andreaminini.org/scienza/campo-magnetico-terrestre>. Acesso em 02 de nov. 2021.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation. Publication 132. Annals of the ICRP, v. 45, n. 1, 2016.

LOBATO, Marcio Amarante. Os impactos da radiação cósmica na aviação. **Ciências Aeronáuticas-Unisul Virtual**, 2019.
London, 2014.

MARQUES, Nelson Luiz Reyes; DE SOUSA BULHÕES, Luis Otavio. Uma abordagem histórica sobre a interação da radiação com a matéria. **Revista Educar Mais**, v. 3, n. 2, p. 219-229, 2019.

MARTINHO, Marcos PC; VIDEIRA, Antônio AP; NOBRE, Bruno. Quando a física vai ao campo: as pesquisas do Pe. Francisco X. Roser SJ sobre radioatividade natural, 2018.

MININI, Andrea. Il campo magnetico terrestre. Disponível em:

OKUNO, Emico. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos avançados**, v. 27, p. 185-200, 2013.

OKUNO, Emico. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos avançados**, v. 27, p. 185-200, 2013.

OKUNO, Emico. **Radiação: efeitos, riscos e benefícios**. Oficina de Textos, 2018.

PEREIRA, Marlon Antonio et al. Avaliação da contribuição dos diferentes componentes da radiação cósmica atmosférica na dose em tripulações de aeronaves. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 3, n. 1A, 2015.

SOARES, Flávio Augusto Penna; PEREIRA, Aline Garcia; FLÔR, Rita de Cássia. Utilização de vestimentas de proteção radiológica para redução de dose absorvida: uma revisão integrativa da literatura. **Radiologia Brasileira**, v. 44, p. 97-103, 2011.

SOBRINHO, J. L. G. O Sol e o seu interior. **Formação Continua de docentes: Introdução a Astronomia (texto de apoio ao módulo 1)**, v. 18, 2012.

TREVIZOLI, Veronica et al. Estudos de Radiação Cósmica de Alta Altitude: Uma Experiência no Ensino Médio Público do Estado de São Paulo.

XAVIER, Allan Moreira et al. Marcos da história da radioatividade e tendências atuais. **Química Nova**, v. 30, p. 83-91, 2007.

ANEXOS

Figura 1: Fonte: NASA, 2008. Ilustração de explosão solar em contraste com o planeta Terra.

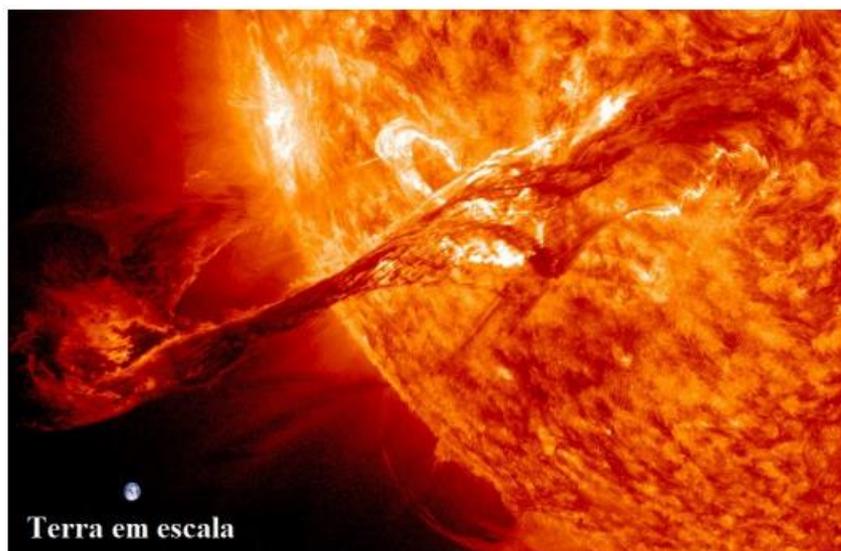


Figura 2: Fonte: MININI, 2019. Representação gráfica das linhas do campo magnético terrestre.

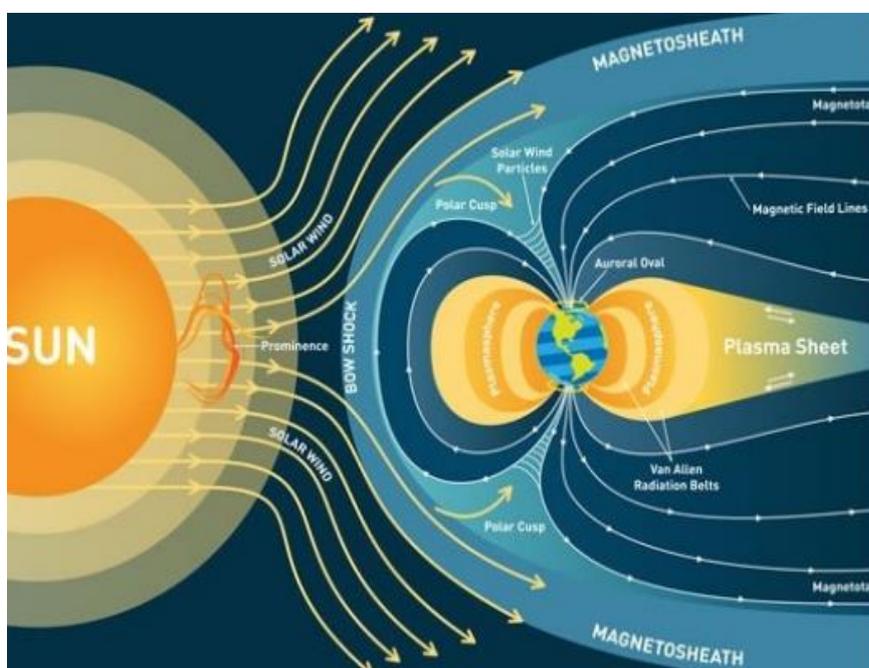


Figura 3: Fonte: HARTMANN, 2009. Evolução da Anomalia magnética do Atlântico Sul em relação ao tempo.

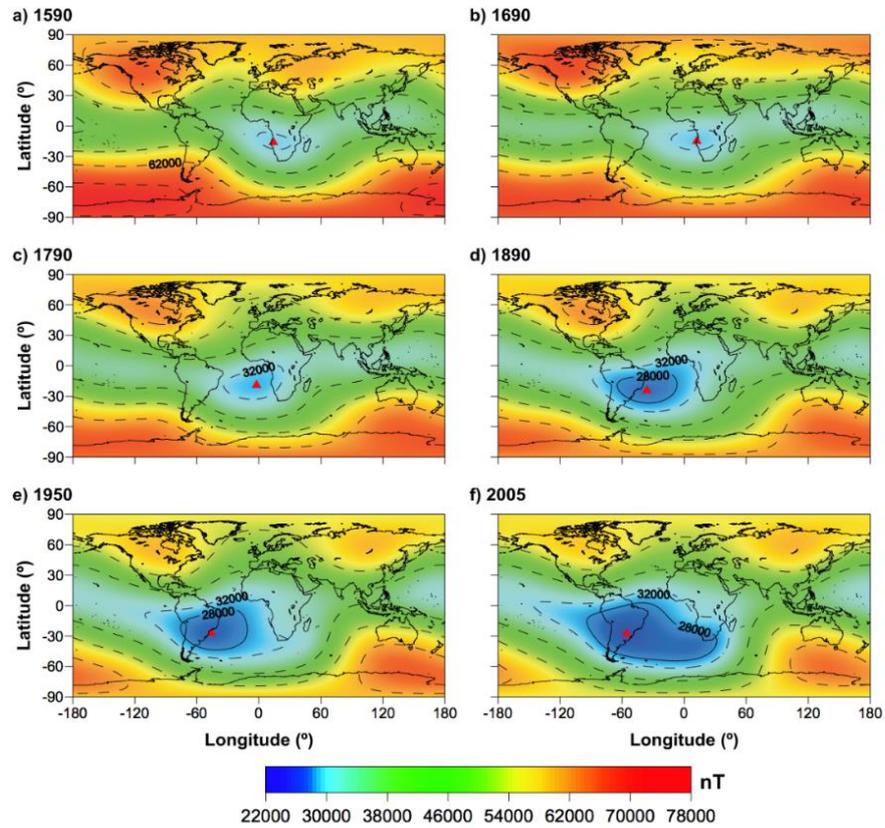


Figura 4: Fonte:(HEILBRON FILHO et al., 2012). Interação da radiação cósmica na atmosfera.

