



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
ELITON GABRIEL RAIMONDI

**RADIAÇÃO CÓSMICA E O RISCO OCUPACIONAL DOS TRIPULANTES DE
VOOS COMERCIAIS NO BRASIL**

Palhoça
2019

ELITON GABRIEL RAIMONDI

**RADIAÇÃO CÓSMICA E O RISCO OCUPACIONAL DOS TRIPULANTES DE
VOOS COMERCIAIS NO BRASIL**

Monografia apresentada ao Curso de graduação
em Ciências Aeronáuticas, da Universidade do
Sul de Santa Catarina, como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Profa. Conceição Aparecida Kindermann, Dra.

Palhoça

2019

ELITON GABRIEL RAIMONDI

**RADIAÇÃO CÓSMICA E O RISCO OCUPACIONAL DOS TRIPULANTES DE
VOOS COMERCIAIS NO BRASIL**

Esta monografia foi julgada adequada à obtenção do título de Bacharel em Ciências Aeronáuticas e aprovada em sua forma final pelo Curso de Ciências Aeronáuticas, da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 25 de novembro de 2019.

Profª. Orientadora Conceição Aparecida Kindermann, Dra.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Joel Irineu Lohn, MSc.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família, que me desenvolveu capaz de ir atrás dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, que constitui a base de tudo que sou e ainda pretendo ser. Especialmente à minha mãe, Marcia Machado, que me educou e me desenvolveu como uma pessoa capaz de buscar aquilo que deseja, sempre a partir dos meios íntegros e legítimos. E nunca mediu esforços para me fazer feliz.

Ao meu avô, Pedro Machado, todo o seu apoio e admiração pela carreira aeronáutica, que me inspira a cada dia nessa trajetória contínua de realização pessoal e profissional. E que repetidas vezes incentivou-me, dizendo: “muito trabalho, competência e honestidade”.

À compreensão das pessoas especiais com quem convivo, devido à minha ausência nos momentos que dediquei a este trabalho.

À minha orientadora, Dra. Conceição Aparecida Kindermann, o método organizado que conduziu a sua orientação, e a sua paciência em compreender e buscar extrair a melhor das artes desta pesquisa.

E aos professores da UNISUL, que de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento da lógica científica no meu pensar, e possibilitaram a expansão irreversível da minha perspectiva e conhecimento de mundo, especialmente do universo aeronáutico.

“Devemos seguir sempre o caminho que conduz ao mais alto”. (PLATÃO).

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo compreender os impactos da exposição dos tripulantes de voos comerciais à radiação cósmica, a fim de possibilitar a análise do risco ocupacional dos profissionais desta classe, no intuito de refletir sobre a necessidade da criação de legislações governamentais brasileiras específicas para a proteção da saúde de longo prazo dos aeronautas no país. Foi adotada a metodologia científica exploratória com abordagem qualitativa, utilizando dos procedimentos de pesquisas bibliográfico e documental, através da busca direta de conceitos, informações e dados relacionados ao tema proposto, com posterior sintetização, interpretação e análise, de modo a proporcionar a exposição metódica, didática e concisa das ideias. Os principais embasamentos teóricos estão obtidos em autores como Oliveira *et al.* (2016), Okuno (1982, 1988, 2013) e Peruzzo (2012), propiciando a descrição de diversas das conceituações físicas e biofísicas, e em Federico (2011), *Federal Aviation Administration* (2011), Friedberg; Copeland (2003) e Grieder (2001), que constituem fontes relacionadas diretamente aos raios cósmicos. Além de publicações gerais como as da *European Commission* (2004), *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2006, 2012), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), *International Air Transport Association* (IATA, 2018), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2012, 2014) e da *International Commission on Radiological Protection* (ICRP, 2016). O trabalho resulta na identificação dos impactos da exposição dos tripulantes de voos comerciais à radiação cósmica, e na demonstração de um risco de morte ocupacional relativamente baixo, de até 0,1% de aumento induzido pelo fenômeno, correspondente a 20 vezes o risco de profissões não expostas a radiação. A pesquisa conclui ser necessário que o governo brasileiro legisle sobre a obrigatoriedade do registro, controle e gerenciamento das doses individuais dos tripulantes pelas companhias aéreas, de modo a proporcionar a adequada proteção de longo prazo à saúde dos aeronautas do Brasil.

Palavras-chave: Raios cósmicos. Efeitos biológicos. Risco ocupacional. Proteção radiológica. Aviação.

ABSTRACT

This research work aims to understand the impacts of the exposure of commercial aircrew to cosmic radiation, enabling the analysis of occupational risk, in order to reflect on the need of the Brazilian government to specifically legislate on radiation long-term health protection for Brazilian airmen. The exploratory scientific methodology with a qualitative approach was adopted, using the procedures of bibliographic and documentary research, with subsequent synthesis, interpretation and analysis, in order to provide methodical, didactic and concise exposition of ideas. The main theoretical foundations are obtained from authors such as Oliveira *et al.* (2016), Okuno (1982, 1988, 2013) and Peruzzo (2012), which enabled the description of several of the physical and biophysical conceptualizations, and such as Federico (2011), Federal Aviation Administration (2011), Friedberg; Copeland (2003) and Grieder (2001), which constitute sources directly related to cosmic rays. In addition, publications such as European Commission (2004), International Civil Aviation Organization (ICAO, 2006, 2012), *Agência Nacional de Aviação Civil* (ANAC), International Air Transport Association (IATA, 2018), *Comissão Nacional de Energia Nuclear* (CNEN, 2012, 2014) and International Commission on Radiological Protection (ICRP, 2016) were included to support as references. The research results in the impacts identification of commercial flight crew members' exposure to cosmic radiation, and in a demonstration of a relatively low occupational death risk, up to 0.1% phenomenon induced increase, which corresponds to 20 times the risk of non-radiation exposed professions. It also concludes that it is necessary for the Brazilian government to legislate on the mandatory registration, control and management of individual aircrew doses by airlines, in order to provide adequate long-term health protection for Brazilian airmen.

Keywords: Cosmic rays. Biological effects. Occupational risk. Radiological protection. Aviation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Experimento de Rutherford para a determinação da carga elétrica das radiações ..	26
Figura 2 – Modelo atômico de Rutherford	27
Figura 3 – Espectro eletromagnético - Instituto de Física UFRGS	30
Figura 4 – Penetração dos tipos de radiação.....	33
Figura 5 – Victor Hess partindo de Vienna no seu balão, em 1911	35
Figura 6 – Cascata de partículas dos raios cósmicos na atmosfera terrestre	37
Figura 7 – Representação gráfica das linhas do campo magnético terrestre	43
Figura 8 – Evolução da Anomalia Magnética do Atlântico Sul entre 1590 e 2005	44
Figura 9 – Representação gráfica de intensidades do campo magnético terrestre	45
Figura 10 – Ilustração de explosão solar em contraste com o planeta Terra.....	49
Figura 11 – Exemplo comparativo entre doses de radiações - (UNEP, 2016; CNEN, 2012) ..	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Estimativa de crescimento do número de passageiros até 2037.....	19
Gráfico 2 – Representatividade da incidência das fontes de radiações ionizantes.....	29
Gráfico 3 – Variação da densidade atmosférica em decorrência da altitude.....	40
Gráfico 4 – Taxa de dose ambiente equivalente em função da altitude ISA.....	41
Gráfico 5 – Taxa de dose radioativa efetiva equivalente em função da latitude.....	46
Gráfico 6 – Relação inversa entre a atividade solar e a exposição à GCR - (ICRP 2016).....	48
Gráfico 7 – Fluxo de prótons durante SPE entre 1 e 30 de abril de 1989 (GOES-7).....	50
Gráfico 8 – Doses de radiações anuais recebidas por profissionais diversos - (ICRP, 2016)..	58
Gráfico 9 – Delimitação da zona de dose de radiação efetiva anual de 1 mSv - (EAN, 2012)	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alcance da interação das partículas α com o ar, o tecido humano e o alumínio. ...	31
Tabela 2 – Alcance da interação das partículas β com o ar, o tecido humano e o alumínio. ...	31
Tabela 3 – Interações das radiações com a matéria atmosférica.	38
Tabela 4 – Contribuições dos componentes nas doses de CR em função da latitude	46
Tabela 5 – Efeitos e limiares da radio-exposição de corpo inteiro em adultos	55
Tabela 6 – Riscos de morte por áreas de atuação nos EUA em 1989 – (HALL, 2000).....	59
Tabela 7 – Resumo de limites máximos de dose radioativa efetiva por entidades	61
Tabela 8 – Limites anuais máximos de doses radioativas individuais no Brasil.....	62
Tabela 9 – Características dos <i>softwares</i> /códigos para estimativas - (BAGSHAW, 2014)	66
Tabela 10 – Exposição ocupacional dos tripulantes em diversos países - (EAN, 2012).....	68
Tabela 11 – Dose efetiva de GCR recebida por tripulantes americanos	69
Tabela 12 – Doses médias extraoficiais no Brasil - (HEILBRON FILHO <i>et al.</i> , 2012).....	70
Tabela 13 – Risco de morte fatal por câncer induzido pela radiação ionizante ocupacional. ...	73

LISTA DE SIGLAS

AIT	Austrian Institute of Technology
ALARA	As Low as Reasonably Achievable
AMAS	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CEU	Council of the European Union
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
CME	Coronal Mass Ejection
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CR	Cosmic Radiation
DGAC	French General Directorate of Civil Aviation
DNA	Deoxyribonucleic Acid
DRIEAB	Dosimetria da Radiação Ionizante no Espaço Aéreo Brasileiro
EAN	European ALARA Network
EC	European Commission
EPCARD	European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses
ERISA	Efeitos das Radiações Ionizantes em Sistemas Aeronáuticos
EU	European Union
EURATOM	European Atomic Energy Community
EXPACS	Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum
FAA	Federal Aviation Administration
GCR	Galactic Cosmic Radiation
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
HMGU	German Research Center for Environmental Health
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ISA	International Standard Atmosphere
ISO	International Organization for Standardization
JAA	Joint Aviation Authority
LET	Linear Energy Transfer

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ONU	Organização das Nações Unidas
PCAIRE	Predictive Code for Aircrew Radiation Exposure
RCMA	Radiação Cósmica em Memórias embarcadas em equipamentos Aviónicos
SAMA	South Atlantic Magnetic Anomaly
SCR	Solar Cosmic Radiation
SGSO	Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional
SNA	Sindicato Nacional Dos Aeronautas
SPE	Solar Particle Event
SSP	State Safety Program
UNEP	United Nations Environment Programme

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Po	Polônio
Ra	Rádio
α	Alfa
β	Beta
γ	Gama
Z	Número Atômico
A	Número de Massa
N	Número de Nêutrons
m	Metros
W	Tungstênio
eV	Elétron-volt
Hz	Hertz
n	Nêutron
km/s	Quilômetro por segundo
He	Hélio
mm	Milímetro
cm	Centímetro
MeV	Megaelétron-volt
e	Elétron
p	Próton
μ	Múon
π	Píon
K	Méson
H	Hidrogênio
C	Carbono
O	Oxigênio
Ne	Neônio
Si	Silício
Fe	Ferro

nT	Nanotesla
Gy	Gray
Sv	Sievert
mSv	Milisievert
μSv	Microsievert
ft	Pés

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 JUSTIFICATIVA	19
1.4 METODOLOGIA.....	21
1.4.1 Natureza e tipo da pesquisa.....	21
1.4.2 Materiais e métodos	22
1.4.3 Procedimentos de coleta de dados	22
1.4.4 Procedimentos de análise dos dados.....	22
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2 A RADIAÇÃO	25
2.1 CONCEITUAÇÃO E FÍSICA DE FUNCIONAMENTO	27
2.2 TIPOS DE RADIAÇÕES E SUAS FONTES EMISSORAS.....	28
2.3 FORMAS DE TRANSMISSÃO E FORÇA DE PENETRAÇÃO.....	30
3 RAIOS CÓSMICOS	34
3.1 FONTES DE RADIAÇÕES CÓSMICAS IONIZANTES.....	36
3.2 INTERAÇÃO DOS RAIOS CÓSMICOS COM A ATMOSFERA TERRESTRE.....	36
3.3 VARIABILIDADE DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO CÓSMICA	39
3.3.1 A altitude e a atmosfera terrestre	39
3.3.2 A latitude e o campo magnético terrestre	41
3.3.3 A atividade solar cíclica e atemporal.....	47
4 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO	52
4.1 EFEITOS BIOLÓGICOS DETERMINÍSTICOS (A CURTO PRAZO).....	54
4.2 EFEITOS BIOLÓGICOS ESTOCÁSTICOS (A LONGO PRAZO).....	55
4.3 EFEITOS DA RADIAÇÃO CÓSMICA EM TRIPULANTES	57
4.4 MÉTODOS ATENUANTES CONTRA OS EFEITOS DA RADIAÇÃO CÓSMICA.....	60
5 EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL DOS TRIPULANTES.....	65
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

O universo da aviação é um ambiente complexo, e desde sempre exigiu-se elevado nível de conhecimento técnico para que esta atividade pudesse ser executada com sucesso. Diversos pioneiros como Otto Lilienthal, Clément Ader e Wilbur e Orville Wright, fizeram de suas experiências contribuições técnicas práticas e teóricas para que no dia 23 de outubro de 1906, Alberto Santos Dumont, realizasse o primeiro voo, tripulando um avião impulsionado por meios próprios, sob o olhar de uma comissão oficial, no campo de *Bagatelle* em Paris. (BARROS, 2003).

A partir deste feito, as máquinas voadoras passaram a ser vistas de uma forma diferente, e a ideia de um novo meio de transporte despertou interesses para o desenvolvimento de diversos setores da sociedade. A evolução do avião ocorreu de forma intensa, durante a Primeira Guerra Mundial, mas foi no pós-guerra, com as aeronaves e infraestruturas herdadas, que as aplicações na área civil foram impulsionadas. (CROUCH, 2008).

Por volta de 1950 a evolução tecnológica dos aviões já se encontrava na era dos motores a jato, o que proporcionou às aeronaves *performance* para voarem em maiores altitudes e, conseqüentemente, a expor o corpo humano dos tripulantes e passageiros a um ambiente de características peculiares e não naturais ao de seu *habitat*. (CASAGRANDE, 2010).

Desta forma, os estudos dos efeitos deste novo ambiente, agora habitado pelo ser humano, passaram a ter maior importância. Porém, as alterações fisiológicas do voo não eram nenhuma novidade para os envolvidos neste setor. Desde 1878, o fisiologista francês, Dr. Paul Bert, conhecido como o “Pai da Medicina Aeroespacial”, já havia publicado o livro *La Pression Barometrique*, no qual concentrou informações de diversos estudos e experimentos, envolvendo os efeitos da altitude na fisiologia humana, demonstrando, desta forma, que o interesse do homem pelos efeitos do voo no corpo humano surgiu muito tempo antes da era dos motores a jato (BERT, 1943). Mas, somente após a intensa evolução do meio de transporte aéreo e do conseqüente aumento do tempo de exposição do organismo humano ao novo ambiente, que iniciaram-se os aprofundamentos da medicina aeroespacial, assim como o início de novas pesquisas no ramo.

No Brasil, um dos primeiros registros governamentais oficiais em defesa da saúde dos aeronautas ocorreu após o decreto nº 21.713, de 27 de agosto de 1946 que ratificou, pelo governo brasileiro, a Convenção sobre Aviação Civil Internacional, ocorrida em Chicago em 1944 (BRASIL, 1946). Com o passar dos anos, surgiram outras leis, que de forma mais direta, buscaram proteger e amenizar os impactos biológicos da profissão do aeronauta, como por

exemplo, a lei nº 3.807 de 1960, que dispôs sobre a lei Orgânica da Previdência Social (BRASIL, 1960), e a lei nº 7.183, de 5 de abril de 1984, que deu providências e regulou o exercício da profissão de aeronauta (BRASIL, 1984), posteriormente, revogada pela lei nº 13.475, de 28 de agosto de 2017, a qual perdura até os dias atuais. (BRASIL, 2017).

Além disso, há também a contribuição indireta dos programas de gerenciamento de segurança para a contribuição de melhorias à saúde dos aeronautas, sendo o mais atual o Sistema de Gerenciamento e Segurança Operacional (SGSO), implantado no Brasil pela ANAC a partir de 2010, sob recomendações da *Internacional Civil Aviation Organization* (ICAO), por meio do DOC 9859, que estabelece a elaboração de Programas de Segurança do Estado, denominados *State Safety Program* (SSP) (ICAO, 2006). O sistema de gerenciamento de segurança, quando implantado nas organizações de modo eficiente, colabora na proteção dos tripulantes através da aquisição de dados por meio de reportes internos e autônomos, fornecendo informações para estudos científicos, identificação de riscos e causas da degradação do organismo humano exposto às condições de voo, assim como desenvolve métodos contínuos de mitigação de riscos no setor aeronáutico. (BRASIL, 2018a).

Dentre os diversos problemas causadores da degradação da saúde dos tripulantes apresentados pela medicina aeroespacial nos últimos anos, o destaque ensejado neste projeto de pesquisa direciona-se para os fatores do risco ocupacional da exposição dos aeronautas à radiação cósmica. Conforme Hewitt (2002), todos os elementos presentes na crosta terrestre estão expostos à radiação proveniente do espaço, porém, a intensidade da exposição a esta radiação possui algumas variáveis agravantes, sendo uma delas, a altitude com que os elementos se encontram em relação a terra, ou seja, a sua proximidade com relação ao espaço sideral.

Considerando a variável destacada, é possível identificar que os tripulantes de voos comerciais, na prática de sua função ocupacional, estão expostos à radiação cósmica de maneira diferenciada das demais profissões comumente conhecidas, visto que, possuem fatores agravantes como a intensidade maior da dose de radiação ionizante por unidade de tempo, a elevada frequência com que são expostos, o expressivo tempo de permanência na condição e a ausência de regulação efetiva para o controle e proteção desta ameaça à saúde dos profissionais a longo prazo.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

O risco ocupacional dos tripulantes de voos comerciais no Brasil, no que se refere a exposição do organismo humano à radiação cósmica, é significativo ao ponto de exigir

legislações específicas para o controle e proteção da saúde de longo prazo dos profissionais da classe?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta monografia é fornecer subsídios conceituais, assim como apresentar análises e reflexões, de modo a atingir o objetivo geral do trabalho, a partir do cumprimento dos objetivos específicos estabelecidos.

1.2.1 Objetivo geral

Compreender os impactos da exposição dos tripulantes de voos comerciais à radiação cósmica, a fim de possibilitar a análise do risco ocupacional dos profissionais desta classe, no intuito de refletir sobre a necessidade da criação de legislações governamentais brasileiras específicas para a proteção da saúde de longo prazo dos aeronautas no país.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste projeto de pesquisa são:

- a) Descrever o conceito e as características físicas básicas da radiação;
- b) Identificar as propriedades físicas da radiação cósmica, os tipos de energias provenientes e as variáveis que influenciam a exposição a esta forma de radiação;
- c) Descrever os efeitos da radioatividade no organismo humano;
- d) Descrever os possíveis efeitos da radiação cósmica nos tripulantes da aviação comercial, comparando e analisando a significância desta exposição a outras profissões;
- e) Apresentar métodos atenuantes dos efeitos e da exposição à radiação cósmica;
- f) Analisar a exposição à radiação cósmica e o risco ocupacional dos tripulantes de voos comerciais, no intuito de questionar a necessidade da criação de legislação específica para a proteção e controle deste fenômeno no Brasil;

1.3 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa aprofunda-se no conhecimento relativo à radiação cósmica, proveniente do espaço sideral, e nas características da interação deste evento com os tripulantes de voos comerciais, tendo em vista a reflexão da necessidade de criação de legislação brasileira específica, para a proteção e controle desta exposição, devido à previsão de crescimento e desenvolvimento tecnológico esperados na aviação no decorrer dos próximos anos.

De acordo com IATA (2018), a tendência do crescimento da aviação comercial para os próximos 20 anos, é dobrar o número de passageiros transportados no mundo todo, atingindo o número 8,2 bilhões em 2037. Conforme as estimativas da associação, mesmo havendo modificações políticas e econômicas restritivas ao redor do mundo, ocasionando uma globalização reversa, estima-se uma taxa de crescimento anual composta de aproximadamente 2,4%, podendo chegar à 5,5%, se considerado um cenário global de liberação política e econômica máximo.

Gráfico 1 – Estimativa de crescimento do número de passageiros até 2037



Fonte: IATA (2018).

Além disso, o desenvolvimento tecnológico de aeronaves e motores demonstrou através do tempo evoluções de *performance* impressionantes, capazes de proporcionar voos em regiões e altitudes nunca antes habitadas pelo homem, como por exemplo, a aeronave supersônica comercial Concorde, que atingiu velocidades próximas a duas vezes e meia a

velocidade do som, e elevou-se em altitudes próximas de sessenta mil pés. (THURSTON, 2000).

Desta forma, considerando-se as observações históricas e projeções futuras, a perspectiva de evolução do setor aeronáutico no segmento de aviação comercial apresenta tendências de realizações de voos em altitudes mais elevadas, por consequência do aprimoramento de performance obtido com os avanços tecnológicos.

E é neste espaço aéreo moderno, onde serão realizados os voos comerciais futuros, que ocorrem interações do organismo humano com diversos fenômenos físicos, sendo um deles, os raios cósmicos. Este tipo de fenômeno, conforme Bartlet (2004), fornece radiações ionizantes de diversos tipos, capazes de influenciar negativamente na saúde dos tripulantes, sendo proveniente de fontes naturais como a atividade solar e o espaço interestelar.

A interação dos raios cósmicos com o planeta Terra ocorre através da penetração de suas partículas atômicas no topo da atmosfera, que colidem com os átomos atmosféricos e causam ionizações, gerando um processo de perda de energia. Este processo dá origem a raios cósmicos secundários, que também fornecem partículas nocivas ao organismo biológico. (PERUZZO, 2012).

À medida que os raios secundários passam através das camadas da atmosfera, são enfraquecidos e deixam de representar doses com significância radioativa para os seres humanos presentes na superfície. Porém, nas altitudes em que são realizados os voos comerciais, devido a redução da espessura do filtro atmosférico acima destas regiões, o tecido humano encontra-se suscetível à absorção de radiação sob doses nocivas à saúde. (PERUZZO, 2012).

A radiação ionizante, quando sob interação com o organismo biológico, provoca diversas reações, como a destruição de células e a mutação genética pelas reações dos radicais livres. O corpo humano possui cerca de 5 trilhões de células em sua composição, e cada tipo de célula tem sensibilidade diferente em relação à radioatividade. A maior parte dos danos celulares causados pela exposição a baixas doses radioativas é corrigida naturalmente pelo organismo, porém, algumas dessas células podem permanecer danificadas e continuarem ativas, se reproduzindo e propiciando o desenvolvimento de doenças como o câncer, podendo levar o indivíduo à morte. Além disso, as ações microscópicas de baixas doses radioativas são inicialmente insensíveis pelo organismo humano, e na maioria dos casos demoram anos para que os efeitos se tornem perceptíveis. (PERUZZO, 2012).

Atualmente, no Brasil, a legislação relacionada à proteção de trabalhadores expostos a algum tipo de radiação, está prevista pela Norma Regulamentadora nº 15, do

Ministério do Trabalho, que discorre sobre atividades e operações insalubres, baseada no constante da Norma CNEN-NN-3.01 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (BRASIL, 2018b). A norma abrange a exposição dos tripulantes à radiação cósmica de forma indireta e genérica, sem itens de proteções específicas para a função, ou características de controle e análise das variáveis que envolvem o ambiente das operações aéreas.

Portanto, apresenta-se nesta pesquisa, o conhecimento base para a reflexão da necessidade da criação de leis para o controle específico da exposição à radiação cósmica ocupacional dos tripulantes de voos comerciais no Brasil, sendo que, atualmente estes já se encontram expostos de forma diferenciada das demais profissões. A publicação deste trabalho permite maior acesso a informação por indivíduos interessados em compreender os impactos da exposição ocupacional à radiação cósmica, e eleva a percepção do tema nos meios aeronáutico e acadêmico, de modo a incentivar o aprofundamento de estudos e expandir os limites atuais do tema. Os efeitos das doses radioativas na saúde do organismo humano ainda apresentam carência de conhecimento, podendo haver diversas consequências a longo prazo desconhecidas pela ciência.

Além disso, com a evolução tecnológica prevista no setor de transporte aéreo, os aeronautas encontrar-se-ão sob exposições ainda mais críticas, aumentando a diferenciação de suas características em relação às leis genéricas de proteções radioativas, justificando o aprofundamento científico no tema, de modo a beneficiar os profissionais tripulantes do Brasil, assim como, de forma indireta, todos os demais usuários do sistema de aviação civil.

1.4 METODOLOGIA

1.4.1 Natureza e tipo da pesquisa

Para o desenvolvimento desta monografia, fora adotada a pesquisa do tipo exploratória, que tem como objetivos proporcionar uma maior familiaridade com a problemática, ainda pouco conhecida, de modo a torná-la mais explícita e construir hipóteses, através do levantamento bibliográfico, documental e da análise de exemplos que possibilitem o estímulo da compreensão. Em relação à abordagem, trata-se de uma pesquisa qualitativa. (GIL, 2007).

1.4.2 Materiais e métodos

Com base nos métodos de pesquisa abaixo descritos, os materiais analisados foram:

Bibliográficos: livros, periódicos, teses e artigos científicos que discorrem sobre a física da radiação e dos raios cósmicos, históricos de descobrimento, experimentos na ciência e estudos de aprofundamento específico em radiação cósmica na aviação.

Documentais: tabelas estatísticas, documentos oficiais, relatórios científicos e legislações de proteção trabalhista que envolvam a aviação civil e os assuntos relacionados a radiação cósmica, como: publicações de entidades reguladoras de aviação civil nacionais como ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), FAA (*Federal Aviation Administration*) e JAA (*Joint Aviation Authority*); normas e recomendações oficiais da ICAO (*International Civil Aviation Organization*), IATA (*International Air Transport Association*) e EU (*European Union*); leis e decretos, nacionais e internacionais, relacionados à saúde dos aeronautas; publicações e normas de organizações internacionais e nacionais de proteção radiológica, como a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

1.4.3 Procedimentos de coleta de dados

Os procedimentos de coleta de dados deste trabalho caracterizam-se como bibliográficos e documentais, visto que foram utilizados materiais já elaborados, como artigos científicos, livros, tabelas estatísticas, relatórios, informações de periódicos, documentos oficiais, regulamentos, ofícios e dados de fontes dispersas sem tratamento analítico, reelaborados de acordo com os temas da pesquisa e explorados para posterior exposição das ideias. (GIL, 2007).

1.4.4 Procedimentos de análise dos dados

A análise de dados fora realizada através da exploração de materiais bibliográficos e documentais, na busca de informações e dados dos conteúdos relacionados ao tema proposto, que foram sintetizados, analisados e interpretados para propiciar a adequada exposição. (GIL, 2007).

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho fora estruturado em uma composição de 6 capítulos. Conforme descrito a seguir.

O capítulo 1 consiste na apresentação da arte do trabalho, introduzindo a problemática a ser discutida, e definindo os meios que são percorridos para atingir o objetivo geral da pesquisa, subdividido em objetivos específicos. Além disso, o capítulo contém a descrição das motivações que justificaram a realização desta monografia e a metodologia utilizada no trabalho, para que fossem atribuídas características científicas aos resultados da pesquisa. Por fim, há uma breve descrição dos capítulos, apresentando ao leitor o roteiro da estrutura do trabalho.

O capítulo 2 contextualiza um pouco da história de descobrimento da radiação e possibilita a construção da base de conhecimento necessária para compreender a abordagem do objeto de estudo desta monografia, através da definição sucinta do conceito de radiação e das descrições do seu funcionamento físico e características, julgadas primordiais para um melhor aproveitamento dos capítulos seguintes.

No capítulo 3, são apresentadas a definição e as propriedades físicas da radiação cósmica, com descrições didáticas de suas características e interações com o planeta Terra, ocorrendo o aprofundamento do conhecimento nos seus fatores de variabilidade significativa, que constituem a base conceitual para as posteriores interpretações dos gráficos e tabelas das exposições ocupacionais. No decorrer do capítulo, são fornecidos exemplos com aplicações práticas na aviação, proporcionando a integração dos conceitos teóricos à realidade diária dos voos comerciais, de modo a facilitar a absorção do conteúdo transmitido.

O capítulo 4 contempla a descrição dos possíveis efeitos biológicos das interações das radiações ionizantes com o organismo humano, apresentado diferentes dimensões de doses radioativas para ampliar a perspectiva de análise e possibilitar a comparação com diferentes proporções de exposições. São também descritos os possíveis efeitos biológicos das exposições de curto e longo prazo, identificando os prováveis efeitos aos tripulantes de voos comerciais, de acordo com as suas características ocupacionais, realizando um paralelo comparativo com demais profissões de áreas não aeronáuticas. O capítulo finaliza com a apresentação dos métodos atenuantes dos efeitos da radiação cósmica, aplicados por instituições nacionais e internacionais, fornecendo informações da legalidade prevista para a proteção de profissionais radioativamente expostos no Brasil e no mundo.

No capítulo 5, são apresentados dados oficiais de diversos países sobre a exposição ocupacional dos tripulantes de voos comerciais à radiação cósmica, assim como a descrição sucinta dos métodos utilizados pelas entidades para medir ou estimar as doses de radiações ionizantes experienciadas pelos profissionais do ramo. Além disso, é realizada neste capítulo a análise desta exposição e o risco ocupacional enfrentado pelos tripulantes, finalizando com o questionamento da necessidade do estado brasileiro em aprimorar a legislação protetiva do setor, de modo a incitar o registro e o controle individual obrigatório da exposição dos tripulantes à radiação cósmica pelas companhias aéreas brasileiras.

E, por último, o capítulo 6, que compreende as considerações finais deste trabalho, por parte do autor, realizando uma síntese dos principais pontos e ideias concluídas através desta pesquisa, finalizando a seção com sugestões para trabalhos futuros que possibilitem transcender as limitações da presente pesquisa.

2 A RADIAÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o conceito e as características físicas básicas da radiação, através da composição de três seções. Inicialmente, é apresentado um breve histórico de descobrimento, seguido da seção 2.1 “Conceituação e Física de Funcionamento”, que descreve o conceito básico e o funcionamento físico da radiação. Na seção 2.2 “Tipos de Radiações e suas Fontes Emissoras”, são apresentadas algumas características básicas das radiações, como as definições dos seus principais tipos, as suas fontes emissoras e a sua classificação em ionizante ou não ionizante. A seção 2.3 “Formas de Transmissão e Força de Penetração” apresenta as características específicas da transmissão energética das radiações alfa (α), beta (β), partículas de nêutrons (n), raios X e gama (γ), e demonstra comparativos com dados de experimentos físicos das capacidades de penetrações das radiações em diversos materiais, definindo os elementos necessários para as blindagens protetivas.

O início das pesquisas relacionadas à radiação, tiveram como ponto de partida a descoberta dos raios X, pelo físico Wilhelm Röntgen, no ano de 1895. Quando em 1896, em uma das reuniões da Academia de Ciências, após a apresentação de fotografias obtidas com raios X, Henri Becquerel, professor de física do Museu de História da França, interessou-se nas características fluorescentes que os raios X deixavam em determinadas substâncias, e passou a buscar o aprofundamento no tema. Becquerel realizou diversos experimentos, vindo a constatar a emissão de radiação a partir do urânio, assim como, a ionização provocada nos gases, descobrindo a radioatividade, denominada na época como “raios de Becquerel”. (PERUZZO, 2012).

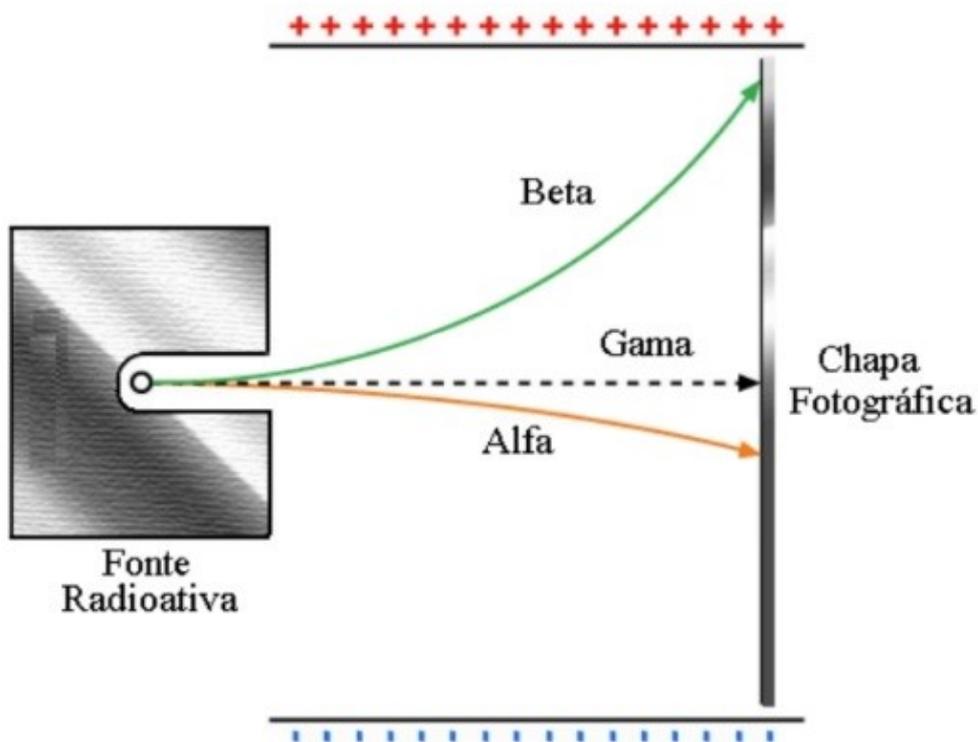
Por volta de 1898, iniciava-se um intenso trabalho de aproximadamente quatro anos de pesquisa, realizado pelo casal Pierre e Marie Curie, visando o aprofundamento dos conhecimentos levantados por Henri Becquerel, e que resultaria no Prêmio Nobel da Física de 1903. Durante a realização dos experimentos, Pierre e Marie tiveram o êxito no descobrimento de dois novos elementos químicos, o polônio (Po) e o rádio (Ra), que expressavam elevadas propriedades radioativas. (PERUZZO, 2012).

Com base nos descobrimentos de elementos capazes de emitir radiação, realizados por Becquerel e o casal Curie, por volta de 1900, Ernest Rutherford executou, com o objetivo de identificar o funcionamento físico por trás da radioatividade, o seguinte experimento:

[...] o material radioativo era colocado dentro de um invólucro de chumbo e a radiação emitida era colimada por uma abertura, resultando num feixe fino. Duas placas eletrizadas foram colocadas em planos perpendiculares à direção de propagação do feixe, e geravam um campo elétrico. O anteparo, constituído por uma chapa fotográfica, ou pintado com uma substância fluorescente, servia como visualizador do local de incidência da radiação. (PERUZZO, 2012, p. 4).

Assim, Rutherford identificou e conceituou a carga elétrica dos três tipos de radiações provenientes dos elementos com características radioativas, sendo estes, os raios alfa (α), beta (β) e gama (γ). No decorrer do experimento, a radiação α , desviava-se com sentido à placa elétrica negativa, determinando a sua composição em partículas de carga positiva. Já a radiação β , desviava-se em direção à placa positiva, demonstrando a carga negativa em sua composição. Já o feixe de radiação γ , por não sofrer desvios de sua trajetória, apresentou possuir uma carga elétrica neutra. (PERUZZO, 2012).

Figura 1 – Experimento de Rutherford para a determinação da carga elétrica das radiações



Fonte: Peruzzo (2012).

Com as informações obtidas na época, cientistas como Ernest Rutherford e Frederick Soddy já previam o uso da energia radioativa em aplicações úteis para a sociedade, como na medicina e na produção energética de uso comum em grande escala. A partir destes

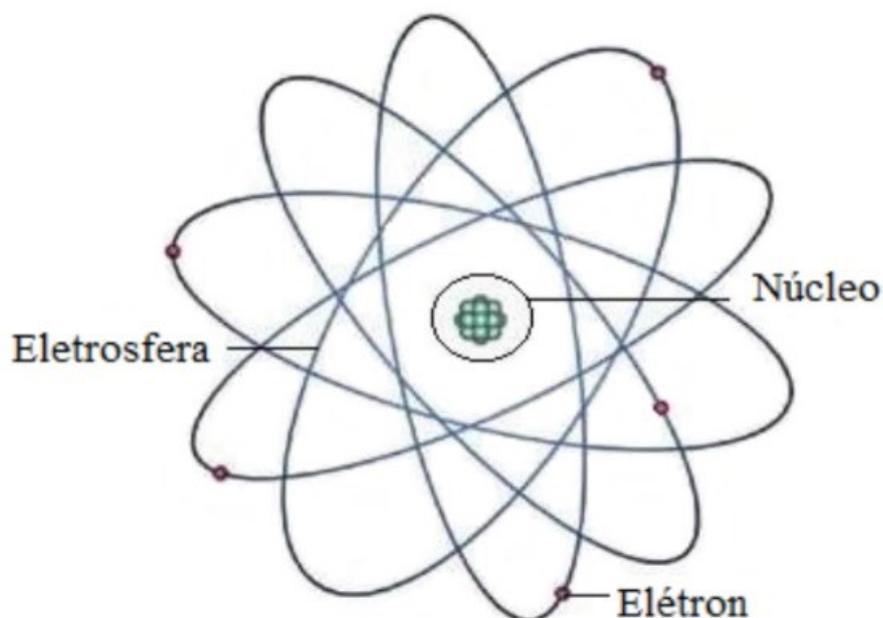
eventos, cada vez mais a ideia da necessidade de pesquisas e desenvolvimento de processos, capazes de transformar a energia nuclear radioativa em energia útil à sociedade, fora enfatizada. (PERUZZO, 2012).

2.1 CONCEITUAÇÃO E FÍSICA DE FUNCIONAMENTO

Emico Okuno (2010) define a radiação como sendo uma forma de “energia em trânsito”, assim como a transferência de calor é o trânsito de energia térmica. Segundo o mesmo, a radiação é emitida por uma fonte, na forma de partículas ou ondas eletromagnéticas, e pode se propagar em qualquer meio, tendo os seus princípios físicos de funcionamento estudados pela física de partículas.

Conforme Peruzzo (2014), todo o tipo de matéria existente no universo é composto por átomos, sendo estes constituídos por partículas subatômicas denominadas prótons, nêutrons e elétrons. Os prótons e nêutrons formam a composição do núcleo de um átomo, e possuem respectivamente uma carga elétrica positiva e neutra. Já os elétrons são partículas de cargas negativas, e ocupam a região orbital ao redor do núcleo, denominada de eletrosfera, apresentando uma massa quase duas mil vezes menor do que a do próton, porém, com um raio atômico de aproximadamente cem mil vezes maior.

Figura 2 – Modelo atômico de Rutherford



Fonte: Peruzzo (2014).

A classificação dos elementos químicos ocorre através do número de prótons dos seus átomos, denominado de número atômico (Z), e através do número de massa (A), resultante da soma de Z ao número de nêutrons do mesmo átomo (N). Naturalmente, existe uma variação do número de nêutrons em átomos de mesmos elementos, resultando nos chamados isótopos. Os isótopos são átomos com o mesmo número atômico, porém, com uma quantidade de nêutrons diferentes, resultando em átomos com massas diversas. (CHANG, 2010).

As partículas de prótons e nêutrons são mantidas juntas nos núcleos dos átomos, através de uma força denominada “interação forte”. A interação forte ocorre de forma efetiva até uma distância de aproximadamente 10^{-15} m, portanto, sendo uma força de curto alcance. Quando um átomo possui um tamanho elevado, ou seja, com um diverso número de partículas subatômicas, este, naturalmente, apresenta um maior desequilíbrio nas quantidades de prótons e nêutrons em seu núcleo. O desequilíbrio de partículas nucleares é o determinante da propriedade radioativa dos elementos, portanto, quanto maior a diferença entre Z (número de prótons) e N (número de nêutrons), maior é a instabilidade deste átomo. Este desequilíbrio, dependendo da intensidade, pode resultar na liberação espontânea de partículas nucleares, através do distanciamento das partículas da área efetiva da “interação forte”, e da busca contínua de um átomo pela estabilidade natural de partículas. O processo de liberação de partículas nucleares é chamado de desintegração radioativa, ou decaimento, e é o processo que define a emissão dos raios alfa (α), beta (β), e gama (γ), demonstrados no experimento de Rutherford. (PERUZZO, 2014).

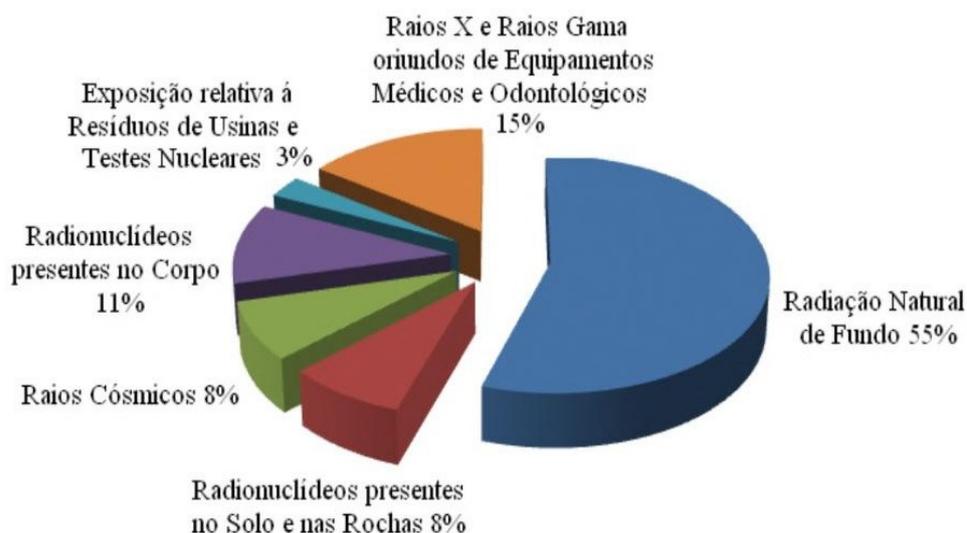
2.2 TIPOS DE RADIAÇÕES E SUAS FONTES EMISSORAS

No dia a dia do mundo moderno, o ser humano encontra-se exposto, de forma contínua, a diversas formas de radiações, sendo provenientes de fontes naturais ou não-naturais. Consideram-se fontes naturais aquelas oriundas do próprio meio-ambiente, sem nenhum tipo de manipulação humana, e as artificiais, as radiações que sofreram intervenções ou foram criadas a partir de equipamentos tecnológicos. Em condições normais de vida, ou seja, sem exercer atividades ocupacionais com agravantes radioativos, e não interagindo de forma excessiva com a radioatividade de procedimentos modernos, os níveis de exposição são considerados baixos e não proporcionam perigo ao organismo biológico. (PERUZZO, 2012).

Conforme o Gráfico 2, as fontes de radiações ionizantes naturais compõem em média cerca de 80% de toda a exposição vivenciada pelo organismo humano, e são provenientes de fontes como: alimentos, água, rochas, gases, solo terrestre e raios cósmicos. Já as radiações

artificiais, são, em sua maioria, provenientes de: procedimentos de intervenções médicas, radiodiagnósticos, manipulações energéticas, sistemas de segurança, materiais de construção e combustíveis. (USNRC, 2012).

Gráfico 2 – Representatividade da incidência das fontes de radiações ionizantes



Fonte: Peruzzo (2012).

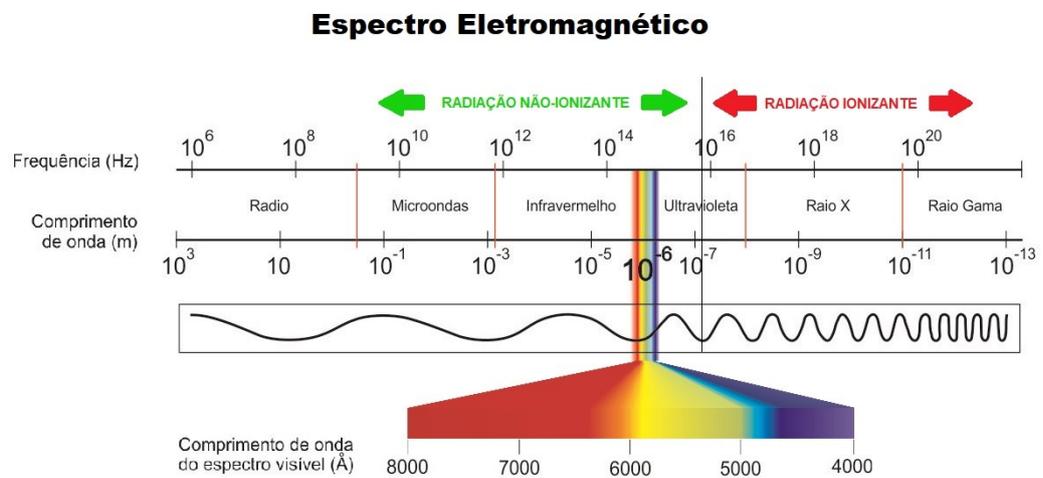
Dependendo do nível de energia, as radiações podem ser classificadas como ionizantes ou não-ionizantes.

Okuno (2010) define a radiação ionizante como sendo todo o tipo de radiação cujo potencial energético possui capacidade de remover elétrons de um átomo. As partículas de elétrons estão ligadas aos átomos através de uma força elétrica chamada de eletronegatividade, que varia em intensidade, de acordo com o distanciamento dessas partículas com o núcleo dos átomos. O núcleo atômico, por ser positivamente carregado, exerce uma força de atração maior quando as partículas negativas de elétrons se encontram em órbitas próximas. O elemento químico Tungstênio (W), por exemplo, apresenta uma energia atrativa de 69.500 eV¹, aos elétrons de sua camada mais próxima, e 7,9 eV, em sua camada orbital mais distante. Portanto, qualquer radiação que proporcione absorção de energia superior a 7,9 eV, possui potencial energético suficiente para arrancar partículas de elétrons da última camada da eletrosfera deste elemento. Alguns exemplos de radiações ionizantes são: raios X, raios γ , raios cósmicos, partículas α e β . (OKUNO, 2013).

¹ Elétron-volt: unidade de energia obtida por um elétron, quando acelerado no vácuo por uma diferença de potencial de 1 volt. (MICHAELIS, 2015).

A radiação não-ionizante, por sua própria definição, é todo o tipo de radiação cujo potencial energético é baixo, comumente inferior a 10 ou 12 eV, não possuindo a capacidade de remover elétrons e ionizar átomos em suas diversas interações físicas. As ondas eletromagnéticas, provenientes de equipamentos como o forno micro-ondas, o rádio e o televisor, são exemplos deste tipo de radiação, assim como o espectro de luz visível pelo olho humano, a radiação infravermelha ou os raios ultravioletas, que atingem a crosta terrestre, emitidos pelo sol. (BRAUER, 2006).

Figura 3 – Espectro eletromagnético - Instituto de Física UFRGS



Fonte: Adaptação do Autor (2019).

Alguns dos elementos do espectro eletromagnético são ilustrados na Figura 3, sendo possível a identificação de diversas radiações, dispostas em ordem crescente de frequência (Hz), com suas classificações destacadas entre radiações ionizantes ou não-ionizantes.

2.3 FORMAS DE TRANSMISSÃO E FORÇA DE PENETRAÇÃO

A transmissão de energia radioativa ocorre através de duas formas, sendo uma delas, por meio de transferência de partículas atômicas, denominada de radiação corpuscular, e a outra, através de fótons contidos em ondas eletromagnéticas, denominada de radiação eletromagnética. Alguns exemplos de radiações corpusculares são: raios alfa (α), raios beta (β) e as partículas de nêutrons (n). Já os raios X e gama (γ), são exemplos de radiações eletromagnéticas. (OKUNO *et al.*, 1982).

A radiação alfa (α) é proveniente do decaimento (desintegração radioativa) de elementos pesados, e basicamente, é um núcleo de átomo de hélio (He), pois em sua

composição, estão presentes duas partículas de prótons e duas partículas de nêutrons. Sua velocidade de propagação é de aproximadamente 20.000km/s, porém o alcance de sua propagação na atmosfera é curto, e o seu poder de penetração é mínimo, não sendo capaz de atravessar uma folha de papel, tornando-a facilmente blindável. (OKUNO *et al.*, 1982; PERUZZO, 2012).

Tabela 1 – Alcance da interação das partículas α com o ar, o tecido humano e o alumínio.

Energia (MeV) ²	Alcance (cm)		
	Partículas α	Ar	Tecido Humano
1,0	0,55	0,33 x 10 ⁻²	0,32 x 10 ⁻³
2,0	1,04	0,63 x 10 ⁻²	0,61 x 10 ⁻³
3,0	1,67	1,00 x 10 ⁻²	0,98 x 10 ⁻³
4,0	2,58	1,55 x 10 ⁻²	1,5 x 10 ⁻³
5,0	3,50	2,10 x 10 ⁻²	2,06 x 10 ⁻³

Fonte: Okuno *et al.* (1982).

A radiação beta (β) provém do desequilíbrio atômico e é composta de partículas de elétrons e pósitrons³. Por ser uma partícula de menor massa, o seu poder de penetração é maior do que as partículas α , e se movimenta em velocidades próximas à velocidade da luz, com cerca de 290.000km/s. O seu poder de penetração é mais profundo, sendo capaz de penetrar a pele humana em 2cm, e o chumbo em 2mm, e sua blindagem torna-se possível a partir de materiais como o plástico ou o alumínio. (OKUNO *et al.*, 1982; PERUZZO, 2012).

Tabela 2 – Alcance da interação das partículas β com o ar, o tecido humano e o alumínio.

(continua)

Energia (MeV)	Alcance (cm)		
	Partículas β	Ar	Tecido Humano
0,01	0,23	0,27 x 10 ⁻³	0

² Megaelétron-volt: unidade de energia equivalente a 10⁶eV. (MICHAELIS, 2015).

³ Antipartícula do elétron, com mesma massa subatômica, porém, com carga elétrica inversa (e⁺). (MICHAELIS, 2015).

(conclusão)

Energia (MeV)		Alcance (cm)	
Partículas β	Ar	Tecido Humano	Alumínio
0,1	12,0	$1,51 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-3}$
0,5	150	0,18	$5,9 \times 10^{-2}$
1,0	420	0,50	0,15
2,0	840	1,00	0,34
3,0	1260	1,50	0,56

Fonte: Okuno *et al.* (1982).

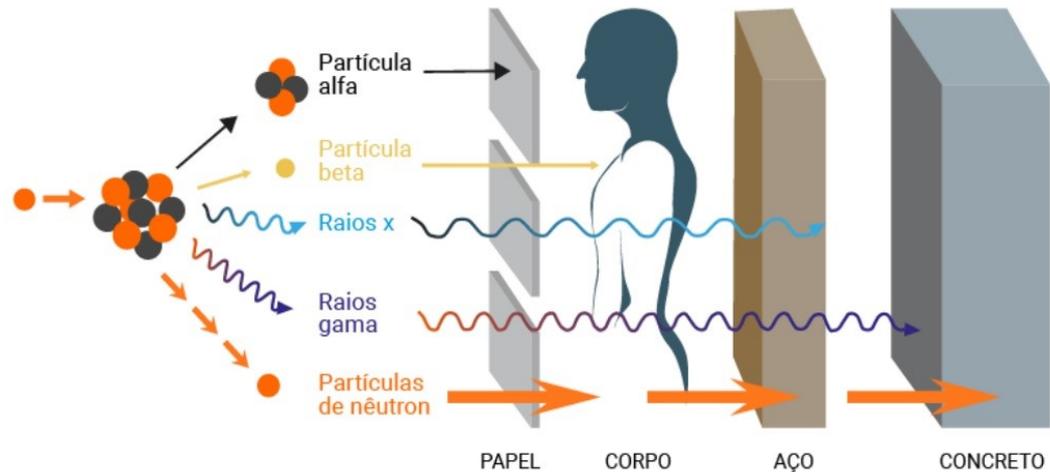
As partículas de nêutrons (n), por não possuírem carga, não produzem o processo de ionização. Porém, ao interagirem com outras partículas carregadas, podem desestabilizar átomos e provocar ionizações indiretas, através da modificação da estrutura dos elementos, fazendo com que estes passem a emitir elétrons ou a apresentarem decaimento. O seu poder de penetração é muito alto e pode ser blindado por materiais como a água e a parafina, cuja composição é rica em hidrogênio. (PERUZZO, 2012).

Os raios gama (γ) são ondas eletromagnéticas provenientes dos núcleos excitados de isótopos radioativos. Possuem um alto poder de penetração e têm a capacidade de ionizar a matéria através do efeito fotoelétrico. Por ser uma radiação eletricamente carregada, a sua trajetória e distância percorrida não pode ser prevista, e a sua blindagem é possível através de materiais como o chumbo, o aço e o concreto. (OKUNO *et al.*, 1982).

Os raios X, conforme Okuno *et al.* (1982), possuem características similares aos raios γ , diferindo somente quanto a sua formação, sendo originados fora dos núcleos, através da desexcitação dos elétrons.

Na figura 4, De Sá (2019) ilustra um comparativo em ordem crescente entre os níveis de penetração das principais formas de radiações ionizantes, descritas por Okuno *et al.* (1982) e Peruzzo (2012). Pode-se observar que são necessários diferentes tipos de materiais, com variações de espessuras consideráveis, para realizar o completo isolamento contra determinados tipos de radiações eletromagnéticas ou corpusculares.

Figura 4 – Penetração dos tipos de radiação



Fonte: De Sá (2019).

É possível identificar que a radiação de partículas alfa é o tipo mais fácil de ser blindado, e as partículas de nêutron são as mais penetrantes, pois apresentam um potencial energético maior que as radiações apresentadas. Porém, apesar de sua capacidade de penetração ser superior à das demais, isso não significa que o potencial de dano biológico seja maior. (PERUZZO, 2012).

Neste capítulo, foi possível demonstrar o conceito básico de funcionamento e diversas características físicas da radiação, como as suas fontes emissoras, a sua classificação em ionizante ou não ionizante, o modo que são transmitidos os tipos de energias, a capacidade de penetração das principais radiações que compõem os raios cósmicos e os materiais necessários para realizar as devidas blindagens contra estes elementos. De modo a proporcionar a referencia basal para o aprofundamento do objeto de estudo.

No próximo capítulo, são identificadas as propriedades físicas da radiação cósmica, os tipos de energias provenientes e as variáveis que influenciam a exposição a esta forma de radiação.

3 RAIOS CÓSMICOS

O presente capítulo tem como objetivo identificar as propriedades físicas da radiação cósmica, os tipos de energias provenientes e as variáveis que influenciam a exposição a esta forma de radiação, através da composição de três seções. Inicialmente, é contextualizado um breve histórico de descobrimento dos raios cósmicos, seguido da seção 3.1 “Fontes de Radiações Cósmicas Ionizantes”, que descreve de forma sucinta as propriedades das fontes de GCR (*galactic cosmic radiation*) e SCR (*solar cosmic radiation*). A seção 3.2 “Interação dos Raios Cósmicos com a Atmosfera Terrestre” demonstra características das interações primárias e secundárias da radiação cósmica com a atmosfera, e define as propriedades das principais partículas e energias fornecidas a partir destas interações físicas. Na seção 3.3 “Variabilidade da Exposição à Radiação Cósmica”, são demonstrados os principais fatores que influenciam na variabilidade da exposição às doses radioativas de raios cósmicos, como a alteração das referências de altitude, latitude e longitude, em decorrência de diversos fenômenos naturais, descritos detalhadamente em suas respectivas subseções.

O início do descobrimento da existência dos raios cósmicos ocorreu em 1909, quando o cientista alemão Theodore Wulf efetuou medições comparativas dos níveis de radiações ionizantes presentes na base e no topo da Torre Eiffel, em Paris. Para a realização do experimento, Wulf utilizou um eletroscópio portátil, que indicou a presença de um nível radioativo mais elevado no topo da torre, em uma altura correspondente a 300 metros. (FAA, 2011).

Com base neste advento, cerca de dois anos depois, entre 1911 e 1912, o físico australiano Victor F. Hess realizou uma série de medições radioativas em altitude, através da ascensão em seu balão de ar quente, conforme demonstra a figura 5. (FAA, 2011).

Em um de seus experimentos, também utilizando um eletroscópio para as suas medições, Hess elevou-se a uma altitude aproximada de 5 mil metros (correspondente a altitude dos voos de aeronaves de pequeno e médio porte) e constatou níveis radioativos 16 vezes superiores aos das doses de radiações ionizantes medidas em solo. E a partir deste experimento, Victor Hess concluiu que uma fonte radioativa altamente penetrante adentrava o planeta Terra pela atmosfera, com origens extraterrestres, por ele ainda desconhecidas. (FAA, 2011; DORMAN, 2004).

Figura 5 – Victor Hess partindo de Viena no seu balão, em 1911



Fonte: Breisky (2012).

O australiano havia descoberto uma das principais radiações naturais ionizantes, com potencial altamente energético, atualmente denominada de raios cósmicos, ou, radiação cósmica, e que resultaria no seu prêmio Nobel da física em 1936. (FAA, 2011; DORMAN, 2004).

Apesar da etimologia de “raios cósmicos” remeter o pensamento a fenômenos cuja composição baseia-se em ondas eletromagnéticas, a radiação cósmica é definida como uma “chuva” contínua de partículas subatômicas, de composição exclusivamente corpuscular. As partículas dos raios cósmicos movem-se através do espaço em velocidades próximas a da luz, e penetram no planeta Terra através da atmosfera, interagindo com o campo geomagnético e provocando a ionização dos átomos por meio de colisões e dissipações de energia com os elementos atmosféricos. Suas características são altamente energéticas e originam-se de fontes extraterrestres, podendo ser classificadas em radiação cósmica solar (SCR), representando o grupo de partículas radioativas provenientes do sol, ou em radiação cósmica galáctica (GCR), contemplando as demais partículas provindas de fora do nosso sistema planetário. (ICRP, 2016).

3.1 FONTES DE RADIAÇÕES CÓSMICAS IONIZANTES

De acordo com Grieder (2001), a origem dos raios cósmicos pode ser determinada com base na análise do espectro energético de suas partículas constituintes, sendo as de menor intensidade provenientes do Sol, e as mais energéticas provindas de fontes galácticas e extragalácticas.

A radiação cósmica galáctica (*galactic cosmic radiation*) é predominantemente constituída por núcleos atômicos, com apenas 2% de sua composição representada por elétrons e pósitrons. Da constituição restante, cerca de 87% consistem em núcleos de hidrogênio (H = 1 próton + 2 nêutrons), 12% em núcleos de hélio (He = 2 prótons + 2 elétrons) e 1% em núcleos pesados (BARTLETT, 2004). A distribuição energética desta fonte é caracterizada por fornecer radiações com intensidades elevadas, que variam entre 10^6 eV e 10^{19} eV no espectro energético das radiações, e possui origem em grandes estrelas, como as supernovas, presentes em nossa galáxia. As partículas com acelerações superiores a 10^{20} eV, no consenso científico atual, são consideradas de fontes não identificadas e de origem extragalácticas. (ICRP, 2016; GRIEDER, 2001).

A radiação cósmica solar (*solar cosmic radiation*) também é constituída por partículas, como os prótons, nêutrons, núcleos de He, além de radiações eletromagnéticas, porém, cerca de 99% de sua estrutura é composta por partículas com potencial energético inferior a 10^6 eV, e são originadas exclusivamente no Sol. (ICRP, 2016; GRIEDER, 2001).

3.2 INTERAÇÃO DOS RAIOS CÓSMICOS COM A ATMOSFERA TERRESTRE

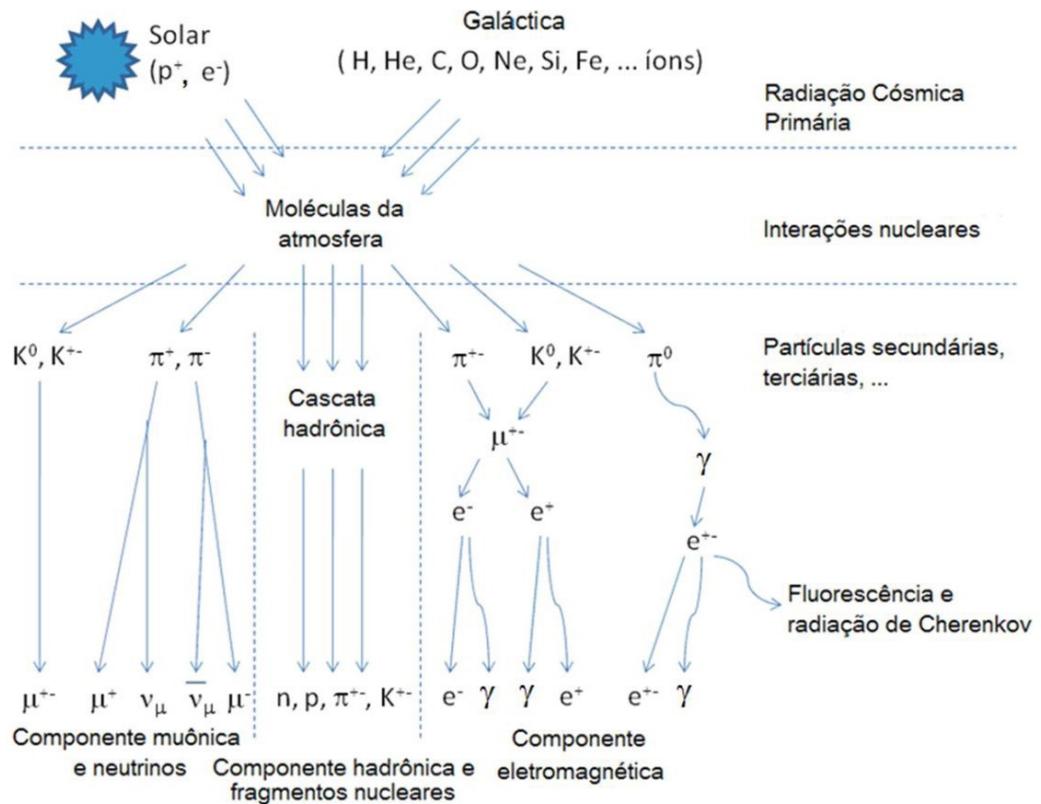
A interação dos raios cósmicos com o planeta Terra acontece de forma contínua e isotrópica, ou seja, proveniente de todas as direções do espaço. Inicialmente, ocorre através da colisão direta das partículas subatômicas de GRC e SCR com os núcleos dos elementos constituintes da atmosfera terrestre, sendo denominados de raios cósmicos primários. Essas partículas iniciais não são as mesmas observadas e detectadas na superfície terrestre, visto que durante a sua trajetória as colisões elásticas⁴ e inelásticas⁵ proporcionam reações de liberações

⁴ Colisão de dois corpos, em que após o processo de interação, ocorre a conservação do momento linear e a energia cinética total. (FRAUENFELDER; HENLEY, 1974).

⁵ Colisão que ocorre a deformação dos corpos e a absorção da energia, durante e após o processo de interação. (FRAUENFELDER; HENLEY, 1974).

energéticas e fragmentações de átomos, gerando uma cascata de radiações secundárias, como as partículas de nêutrons (n), prótons (p), fótons ionizantes (γ), elétrons (e^-), pósitrons (e^+), múons⁶ (μ), píons⁷ (π) e íons nucleares⁸ (K^\pm), descritos em ordem de significância radioativa, denominados de raios cósmicos secundários, conforme demonstra Federico (2011), na figura 6. (FAA, 2011).

Figura 6 – Cascata de partículas dos raios cósmicos na atmosfera terrestre



Fonte: Federico (2011).

De acordo com a massa e a energia das partículas dos raios cósmicos, podem ocorrer diversos tipos de interações físicas com os átomos dos elementos que compõem a atmosfera terrestre. (FRAUENFELDER; HENLEY, 1974). Algumas das interações são apresentadas na tabela 3, assim como as consequências produzidas nos respectivos processos.

⁶ Partícula elementar semelhante ao elétron e de mesma carga elétrica, porém, com massa subatômica superior. (FRAUENFELDER; HENLEY, 1974).

⁷ Partícula subatômica instável, composta por um *quark* e um *antiquark*, denominado como méson leve. (FRAUENFELDER; HENLEY, 1974).

⁸ Átomos que perderam ou adquiriram elétrons no processo de ionização. (FRAUENFELDER; HENLEY, 1974).

Tabela 3 – Interações das radiações com a matéria atmosférica.

Tipo de radiação ou partícula	Massa (MeV)	Carga elétrica (unidades de carga do e ⁻)	Tipo de interação	Partículas e radiações produzidas
p	938	+1	Colisão	K, π
e ⁺	0,511	+1	Freamento, aniquilação	Cascata eletromagnética
e	0,511	-1	Freamento, colisão com elétrons orbitais	Cascata eletromagnética
n	940	0	Espalhamento, captura, fissão	n, γ , p, α , fragmentos de fissão
fóton (ionizante)	0	0	Fotoelétrica, Compton, produção de pares	Cascata eletromagnética
π^{\pm}	140	± 1	Interação coulombiana, decaimento $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}$, captura	Raios X, partículas de alto LET oriundas de fragmentação tipo estrela
π^0	135	0	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$	Cascata eletromagnética
μ^{\pm}	106	± 1	Captura por núcleos atômicos	n, γ
K^{\pm}	498	± 1	$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}$ $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^0$	n, cascata eletromagnética
K^0	494	0	Diversos modos de decaimento em π^{\pm} e π^0	Cascata eletromagnética

Fonte: Federico (2011).

Os raios cósmicos secundários são partículas de menor energia e diminuem em intensidade à medida que penetram mais profundamente nas camadas da atmosfera terrestre, obtendo uma redução energética de forma quase linear entre 16 e 8 quilômetros de altitude, a uma razão aproximada de $1.5 \mu\text{Sv h}^{-1} \text{ km}^{-1}$, até a sua completa absorção ou frenagem pela própria atmosfera ou crosta terrestre. Essas partículas, ao atingirem elevações próximas às do nível do mar, não representam doses radioativas significantes para os seres biológicos, devido à espessura do “filtro atmosférico” acima destas elevações. Porém, nas altitudes onde são

realizados os voos comerciais, essas doses tornam-se expressivas e podem gerar consequências biológicas para os seres humanos. (ICRP, 2016).

3.3 VARIABILIDADE DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO CÓSMICA

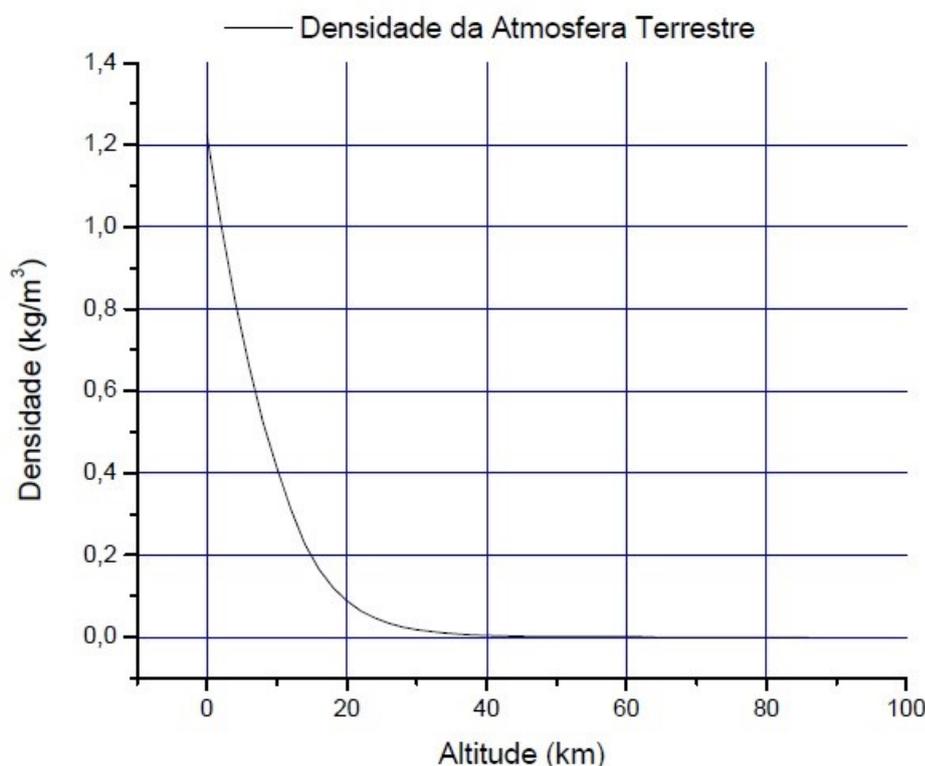
A exposição biológica ao fluxo de partículas radioativas, proveniente dos raios cósmicos, pode variar de acordo com diversos fatores. Dentre as variáveis de características mais significativas, são consideradas a localização tridimensional do indivíduo no planeta, a ocorrência atemporal ou cíclica de fenômenos naturais e a relatividade periódica da exposição. Alguns destes fatores são diretamente alterados pela realização de voos comerciais, como por exemplo a latitude, a longitude e a altitude que o indivíduo se encontra na Terra, além de proporcionar períodos de exposição contínuos e frequentes, principalmente aos profissionais tripulantes de voos comerciais. (GRIEDER, 2001).

3.3.1 A altitude e a atmosfera terrestre

A variação da altitude é o fator de maior representatividade na alteração dos índices de doses radioativas provenientes dos raios cósmicos, e ocorre em decorrência da composição da atmosfera terrestre. Os aviões comerciais, durante a realização de voos rotineiros, proporcionam alterações significantes de altitudes e tornam esta variante um considerável fator nas doses de radiações cósmicas recebidas pelos tripulantes. (FAA, 2011).

A atmosfera terrestre é composta por diversas camadas, sendo estruturada por elementos em estado gasoso, que se encontram retidos ao planeta através da força gravitacional exercida pela Terra. A sua constituição é de aproximadamente 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases, podendo apresentar até 4% de vapor de água na baixa atmosfera. A propriedade dos elementos presentes em sua composição varia em virtude da proximidade com a força gravitacional, que tem o potencial de alterar características físicas como a pressão, a densidade e a temperatura atmosférica. A densidade do ar, que possui um papel importante de filtragem dos raios cósmicos, diminui à medida que a altitude aumenta, conforme ilustra o gráfico 3. (SILVA; TOLENTINO, 2004).

Gráfico 3 – Variação da densidade atmosférica em decorrência da altitude



Fonte: NASA (1976).

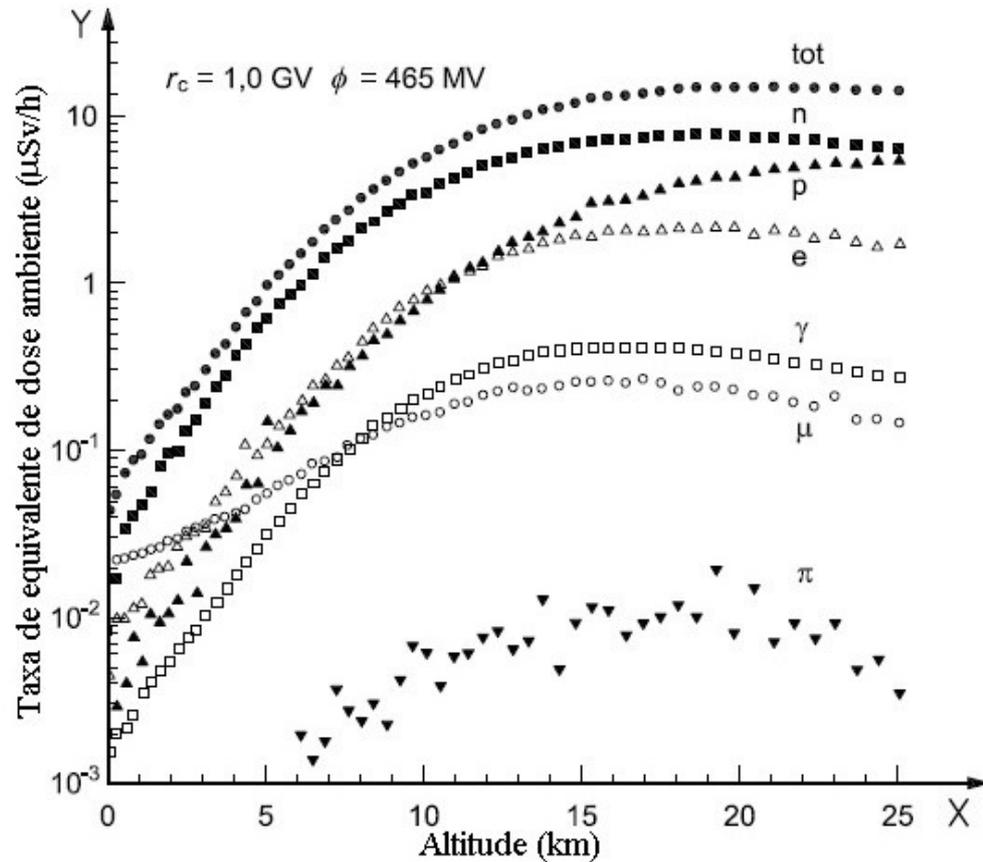
De acordo com Peruzzo (2012), a análise da densidade atmosférica se justifica pela importância da atuação desta propriedade no filtro natural de radiação cósmica, que influencia no número de colisões das partículas. A redução energética da radiação proporciona a proteção da vida na superfície, que passa a representar apenas 8% da dose radioativa total recebida pelos seres humanos. Além de ser um fator direto para o desenvolvimento das radiações secundárias, conforme ressalta ICRP (2016).

Bagshaw (2014) descreve que o nível de radiação ambiente é maior à medida em que a altitude aumenta, e isso ocorre devido a redução da densidade atmosférica, que ocasiona a diminuição do filtro natural de raios cósmicos. Além da densidade, a proximidade com as partículas primárias, de maior intensidade energética, também contribui para uma maior dose radioativa ambiente.

O nível radioativo aumenta a uma razão aproximada de 15% para cada 600m de elevação de altitude (2.000 pés), atingindo a sua máxima no chamado *Pfotzer maximum*, nível em que ocorre a maior dose acumulativa entre as partículas primárias e secundárias, localizado a cerca de 20km de altitude (65.000 pés), com variações dependentes em latitudes. Apesar de ser uma altitude elevada, e estar localizada acima do nível de voo dos aviões comerciais atuais,

diversas partículas de raios primários e secundários são encontradas em níveis inferiores, conforme evidenciado no gráfico 4. (BAGSHAW, 2014).

Gráfico 4 – Taxa de dose ambiente equivalente em função da altitude ISA



Fonte: ISO (2006).

A dose de radiação efetiva total a 30.000 pés de altitude, composta por partículas primárias e secundárias, é 90 vezes maior do que a dose radioativa encontrada ao nível de superfície. Esta razão de variação ainda sofre alteração de 2 vezes, entre os níveis de 30.000 pés e 40.000 pés, altitudes em que são realizados a maioria dos voos comerciais, e de mais 2 vezes entre 40.000 pés e 65.000 pés. A presença de nêutrons é dominante na representatividade radioativa até 80.000 pés, e por ser a partícula mais penetrante dos raios cósmicos, contribui entre 40% e 65% para a dose total equivalente até esta altitude. (BAGSHAW, 2014).

3.3.2 A latitude e o campo magnético terrestre

Outro fator protagonista nas modificações dos índices de doses radioativas é a variação da latitude, que corre por consequência da interação dos raios cósmicos com o campo

magnético terrestre. As aeronaves de voos comerciais, por serem um meio de transporte aéreo e de alta velocidade, podem rapidamente alterar o posicionamento geográfico do ser humano em relação à latitude, portanto, tornam esta variante outro fator de importância direta nas doses de radiações cósmicas experienciadas pelos tripulantes. A *North Atlantic Air Route*, uma das rotas mais movimentadas do espaço aéreo mundial, de extrema importância social e comercial, está localizada em regiões de altas latitudes, sendo estruturada por diversas aerovias⁹, ligando a região nordeste da América do Norte ao oeste da Europa, através do Oceano Atlântico. Rotas de menores fluxos comerciais, como as *Polar Routes*, apresentam as maiores variações de latitudes, e conseqüentemente, os maiores índices radioativos, porém, suas aerovias fornecem vantagens econômicas consideráveis às companhias aéreas, através de voos que cruzam próximos ao Polo Norte, nas ligações entre a América do Norte e a Ásia. (FAA, 2011).

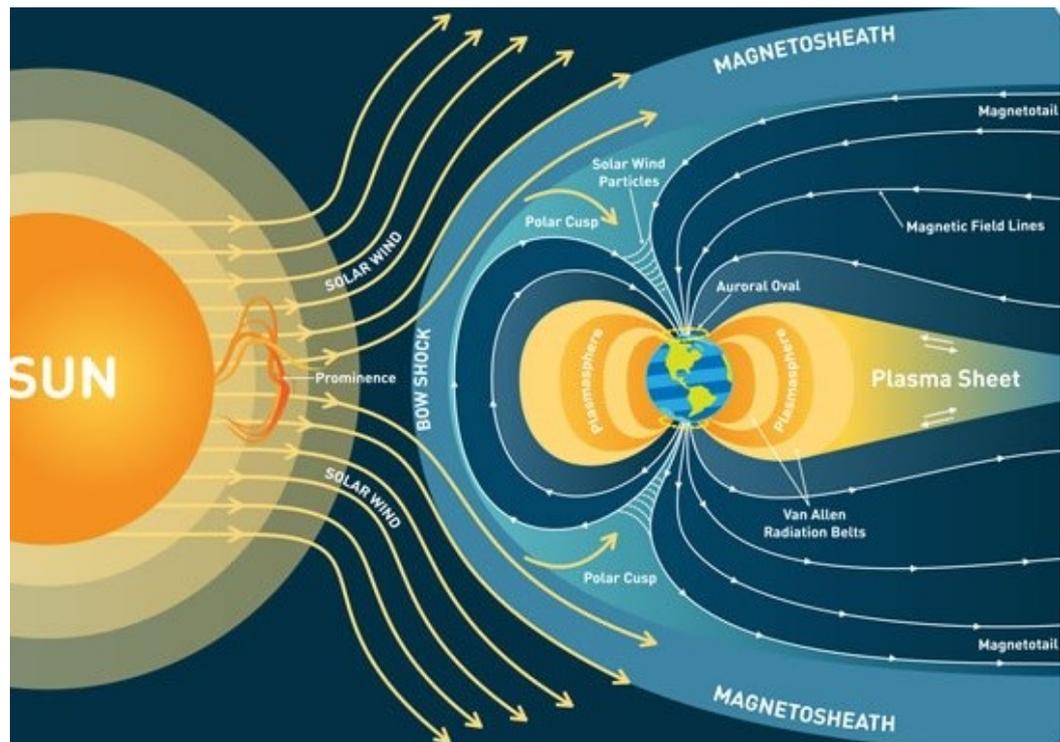
O campo magnético terrestre é formado por forças magnéticas de atração e repulsão, que se movimentam ao redor do planeta na denominada magnetosfera, do polo norte magnético (localizado próximo ao polo sul geográfico) em direção ao polo sul magnético (localizado próximo ao polo norte geográfico), originadas pela rotação de metais no núcleo externo terrestre. A sua representação é usualmente demonstrada em forma de linhas, que expressam a intensidade e a direção das forças magnéticas. Essas forças percorrem trajetórias variadas em seu caminho para o norte, tendo em vista a constante mudança das coordenadas dos polos magnéticos (por consequência da movimentação do magma), a sua formação disforme, e a influência de plasmas de origem solar. Em média, nas regiões próximas ao equador, as linhas de forças magnéticas são praticamente paralelas à superfície terrestre, e nas regiões polares, são praticamente verticais, conforme ilustrado na figura 7. Esse formato do campo geomagnético terrestre, além das suas propriedades físicas elétricas, proporciona a proteção de algumas regiões do planeta, evitando que partículas energizadas de GCR (*galactic cosmic radiation*) e SCR (*solar cosmic radiation*) penetrem a atmosfera com tanta facilidade. (FAA, 2011).

De acordo com Wilson (1976), a proteção dos raios cósmicos pelo campo magnético terrestre ocorre pela deflexão da trajetória das partículas energizadas ao atravessarem as linhas de forças magnéticas. A magnitude da deflexão depende de fatores como a energia e a velocidade das partículas cósmicas, a força do campo magnético terrestre, e o ângulo da trajetória de encontro destes dois elementos. Por consequência, os raios cósmicos que penetram o campo magnético de forma paralela às linhas magnéticas (nas regiões polares),

⁹ Rota regular de aviões comerciais, com limites tridimensionais definidos. (MICHAELIS, 2015).

praticamente não sofrem deflexão de trajetória, permitindo que partículas de quaisquer potenciais energéticos interajam com as camadas inferiores da atmosfera. Já as partículas que penetram o campo magnético de forma perpendicular (nas regiões equatoriais), experienciam forças máximas de deflexão, e apenas as mais energéticas tornam-se capazes de adentrar os níveis mais inferiores, como as de energias superiores a 100 MeV.

Figura 7 – Representação gráfica das linhas do campo magnético terrestre



Fonte: Minini (2019).

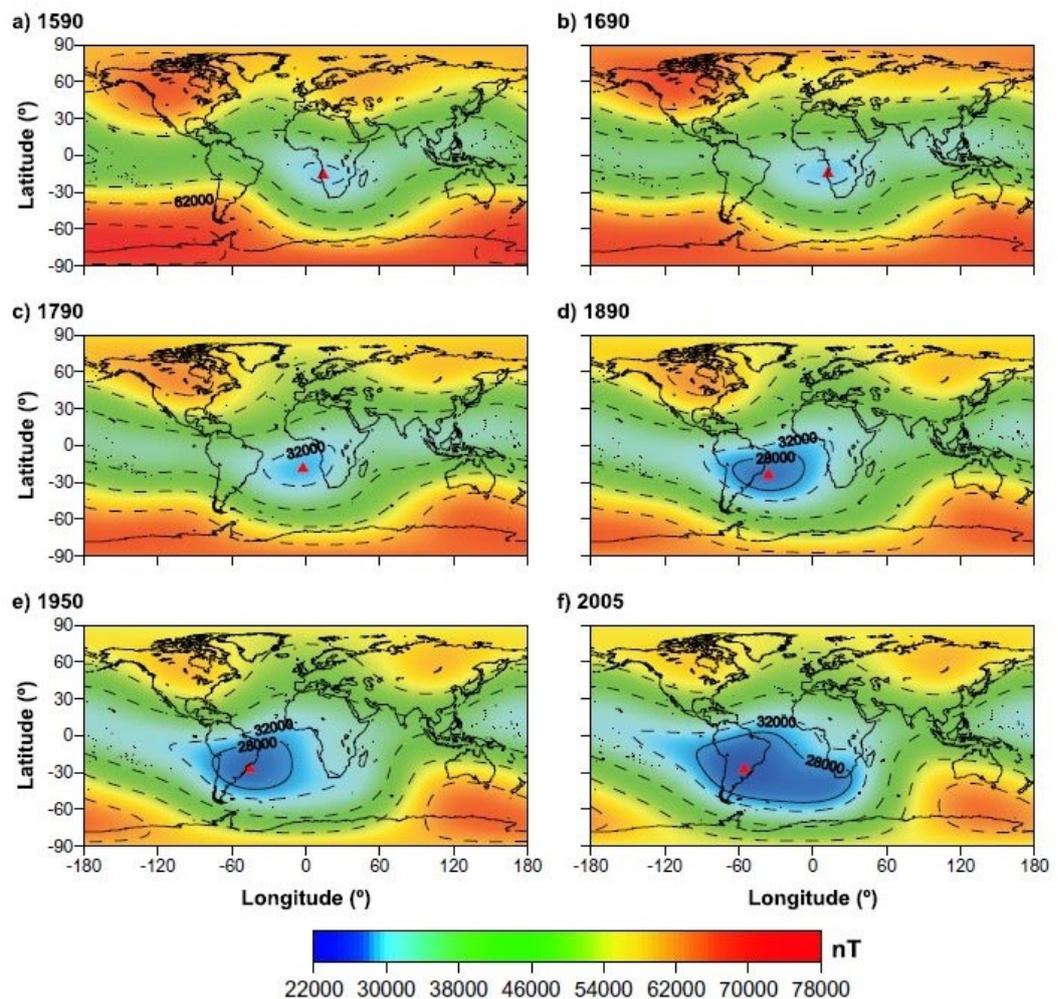
Além de alterar a trajetória dos raios cósmicos, o campo geomagnético também possui a capacidade de aprisionar partículas carregadas e direcioná-las aos polos, contribuindo para o aumento de doses radioativas nas regiões de altas latitudes. Essas partículas são retidas em dois cinturões sobrepostos em formato de toroide, localizados entre as latitudes de 65° norte e 65° sul, denominados de cinturões de Van Allen. Nos cinturões, são predominantemente encontrados elementos subatômicos como os prótons e os elétrons, de potencial energético entre 10 e 100 MeV. (ENCYCLOPEDIA AMERICANA, 1989).

No cinturão interno de radiação, devido à inclinação e o deslocamento natural do eixo de rotação do campo magnético terrestre, ocorre uma aproximação das linhas de forças magnéticas à superfície do planeta, que se estende de 0° a 60° oeste de longitude, e de 20° a 50° de latitude sul (FAA, 2011). Esta região é denominada de *South Atlantic Magnetic Anomaly* (SAMA), ou Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), e permite que partículas de raios

cósmicos carregadas penetrem na atmosfera terrestre mais profundamente, devido à proximidade do campo magnético com a superfície. (HARTMANN, 2005).

Para o Brasil, a influência da SAMA passou a representar significância por volta do século XIX, quando a sua área de abrangência aproximou da América do Sul. A variação da dimensão e posicionamento geográfico da anomalia ocorre de forma contínua, e historicamente demonstra tendências predominantes de aumento e movimentação à oeste, conforme evolução de 415 anos, ilustrada na figura 8. (HARTMANN; PACCA, 2009).

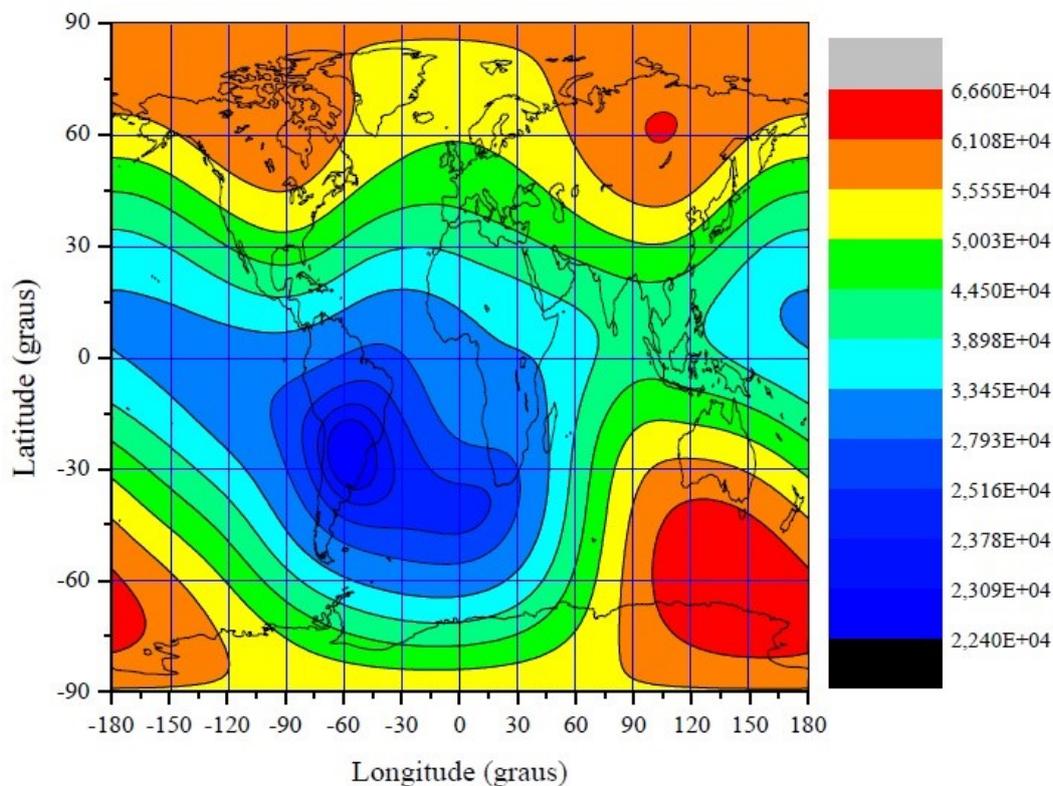
Figura 8 – Evolução da Anomalia Magnética do Atlântico Sul entre 1590 e 2005



Fonte: Hartmann; Pacca (2009).

Na figura 9, é possível observar que atualmente uma grande extensão do território brasileiro sofre influência da AMAS, e conforme Hartmann (2005), o fenômeno modifica o desenvolvimento das radiações secundárias, de modo a provocar aumento das doses radioativas em diversos níveis desta região, variando com a longitude.

Figura 9 – Representação gráfica de intensidades do campo magnético terrestre



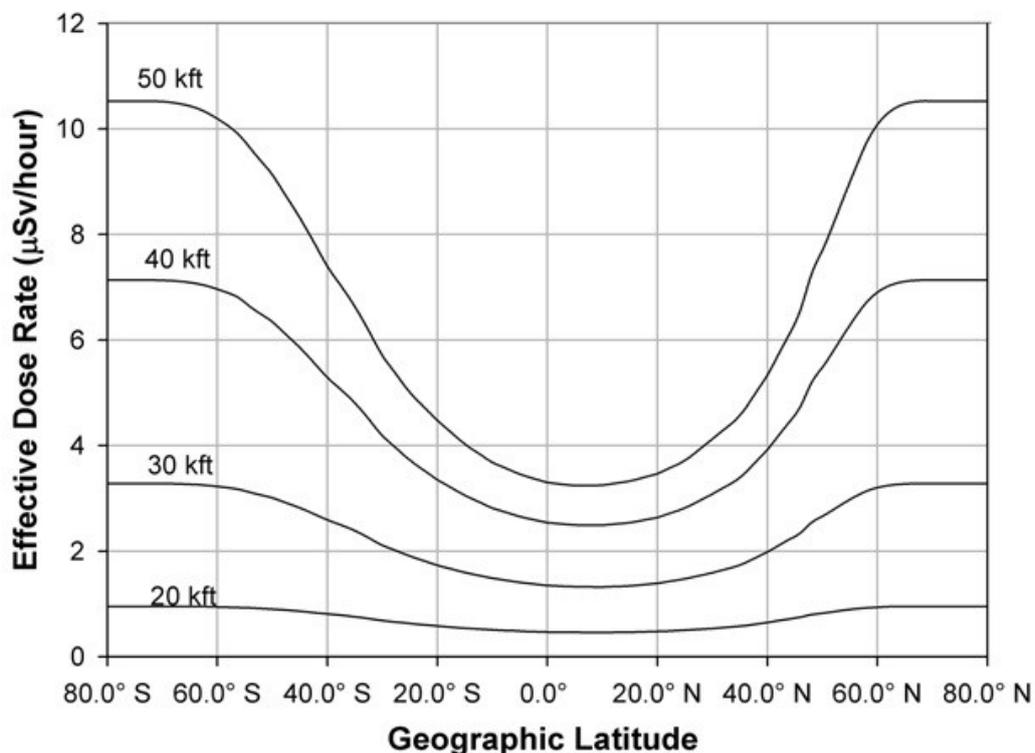
Fonte: IGRF (2010).

A descrição da FAA (2011, p. 6, tradução do autor), demonstra a variabilidade prática do fator latitude, sob a ótica dos voos comerciais:

Se alguém fosse pilotar uma aeronave em uma altitude constante, do equador geomagnético em direção aos polos sul ou norte magnéticos, a taxa de dose radioativa aumentaria com o distanciamento do equador. Em altas latitudes, a proteção do campo geomagnético é mínima. A proteção primária de radiação das aeronaves seria a atmosfera, com alguma proteção dos campos magnéticos carregados pelo vento solar (o campo magnético interplanetário), mesmo quando o Sol está quieto.

Portanto, a dose de radiação cósmica ambiente, eleva-se à medida que a latitude aumenta, ou seja, quando ocorre o afastamento geográfico do equador em direção aos polos magnéticos terrestres. Bagshaw (2014) especifica que em altitudes correspondentes às dos voos comerciais, a radiação cósmica galáctica é de 2,5 a 5 vezes mais intensa nas regiões polares do que no equador, com variações mais expressivas em maiores altitudes, ilustrado no gráfico 5.

Gráfico 5 – Taxa de dose radioativa efetiva equivalente em função da latitude



Fonte: FAA (2011).

Pode-se observar que a partir de latitudes extremas inexistem o aumento da taxa de dose radioativa efetiva com incrementos de latitude, sendo esta região denominada de *polar plateau*, devido à sua característica de estagnação da variante apresentada. Isso ocorre devido a região ao redor dos polos, de aproximadamente 30° de latitude, em que há o alinhamento vertical das linhas do campo geomagnético, permitindo a trajetória de partículas com ausência de deflexão. (FAA, 2011).

De acordo com os dados da ICRP (2016), em altitudes normais dos voos comerciais, a maior representatividade das doses ambientes de radiações cósmicas (CR), em regiões próximas às do equador, ocorre por elétrons (e^-), pósitrons (e^+) e nêutrons (n). E em regiões de altas latitudes, o componente de maior capacidade contributiva é o nêutron.

Tabela 4 – Contribuições dos componentes nas doses de CR em função da latitude

(continua)

Componente	Equador	Altas latitudes
Múons (μ)	5%	3%

(conclusão)

Componente	Equador	Altas latitudes
Elétrons (e^-) / pósitrons (e^+)	38%	14%
Nêutrons (n)	37%	64%
Prótons (p)	12%	14%
Fótons (γ)	8%	5%

Fonte: ICRP (2016).

Na tabela 4, estão descritos os valores individuais de contribuição das partículas dos raios cósmicos, identificadas na altitude de 12.000 metros, em período de influência mínima da atividade solar.

3.3.3 A atividade solar cíclica e atemporal

Outro fator contribuinte para a variação do fluxo de partículas de raios cósmicos é a atividade solar, através da atuação de diversos fenômenos cíclicos ou atemporais de origens no próprio Sol. O vento solar é um destes fenômenos, e possui uma atividade contínua com variação de intensidade cíclica. Sua composição é de aproximadamente 80% prótons, 18% de partículas alfa e traços de partículas pesadas carregadas (SCR), que viajam através do sistema solar, sendo responsáveis pela criação de um campo magnético. (FAA, 2011).

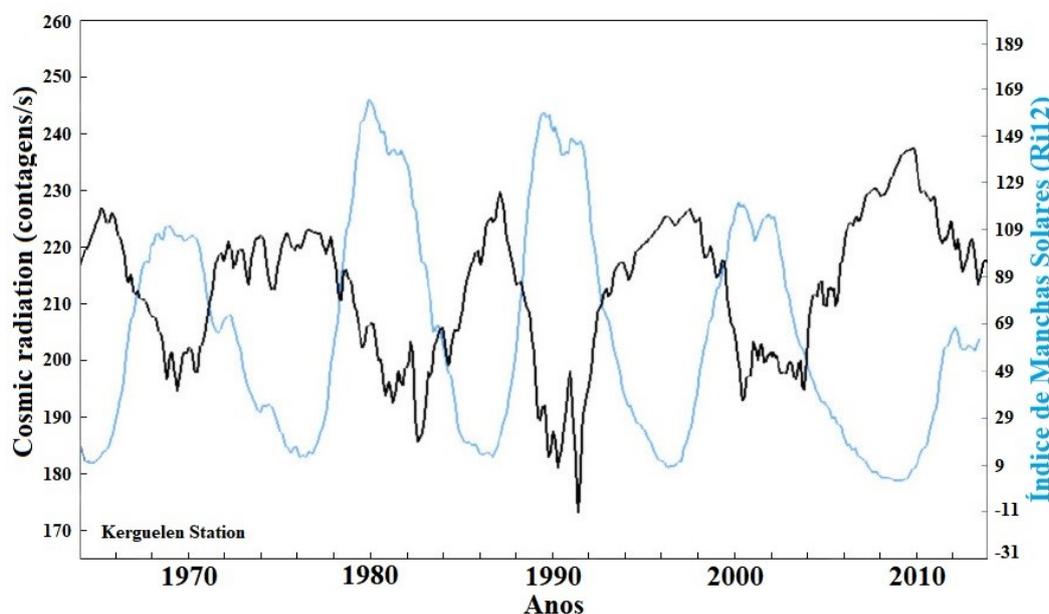
Esse campo magnético tem o potencial de alterar o curso das partículas cósmicas provindas da galáxia (GCR) e, por consequência, modificam o fluxo de raios que penetram no planeta Terra. A alteração de curso das partículas ocorre devido aos componentes constituintes da GCR serem eletricamente carregados, portanto, quando atravessam um determinado campo, de características também elétricas, sofrem alterações físicas subatômicas e redirecionamentos de trajetórias. As deflexões ocorrem nas partículas de baixos potenciais energéticos, e variam diretamente com a intensidade do vento solar, através de modificações no campo magnético, em decorrência do ciclo de atividade do Sol. (ICRP, 2016).

De acordo com Smart e Shea (1997), o ciclo da atividade solar apresenta correlação com o grupo ou número de manchas solares presentes no astro, visto que os distúrbios geomagnéticos da Terra são mais comuns e intensos à medida que maiores quantidades de manchas são identificadas. Em um período de 280 anos de observações, o Sol demonstrou ciclos

de aproximadamente 11 anos, com aumento de atividade durante 4,8 anos (maior índice de manchas solares) e diminuição em 6.2 anos (menor índice de manchas solares). A mancha solar é basicamente uma área de contraste obscurecido visível na fotosfera¹⁰, e apresenta esta característica devido a sua temperatura ser mais baixa que a ambiente ao seu redor. Este fenômeno aparece em regiões onde há a ruptura convectiva de gases quentes, e advém do descolamento magnético na superfície do astro. (ICRP, 2016).

Durante o período de máxima atividade solar, a radiação cósmica galáctica sofre maior deflexão em sua trajetória e, por consequência, são identificadas reduções nos índices de GCR no planeta Terra. Porém, em contrapartida há o aumento da penetração das radiações solares (SCR), devido à intensificação das atividades no Sol. Portanto, os índices de GCR e SCR atuam inversamente, conforme demonstrado no gráfico 6, com dados do observatório de Paris-Meudon. (ICRP, 2016).

Gráfico 6 – Relação inversa entre a atividade solar e a exposição à GCR - (ICRP 2016)



Fonte: Adaptação do Autor (2019).

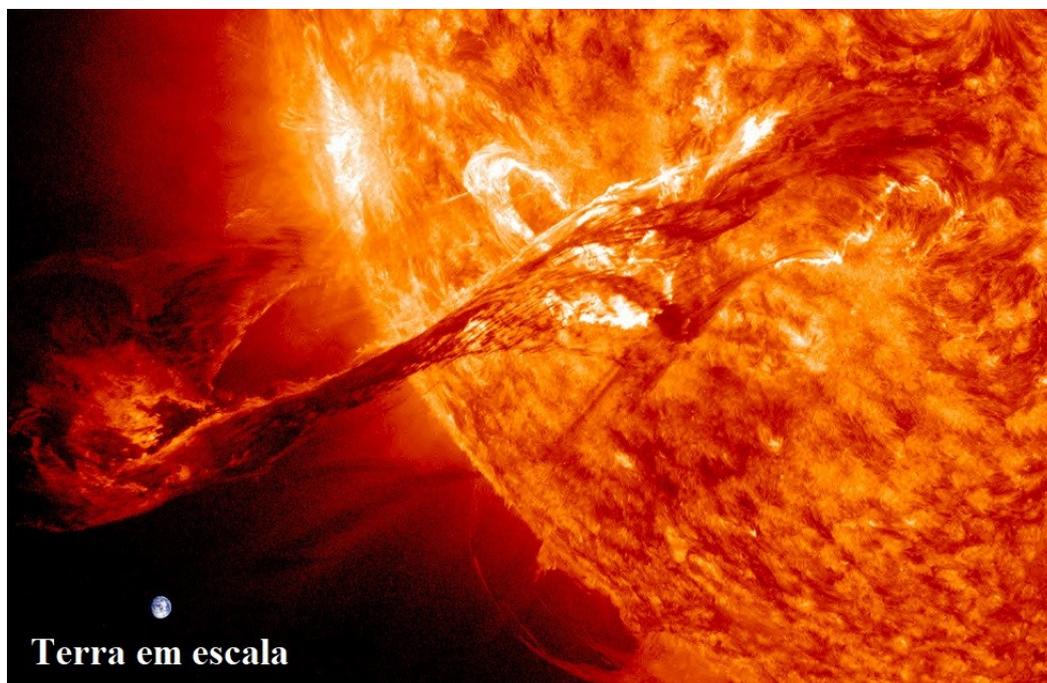
Além disso, ocasionalmente ocorrem distúrbios na atmosfera solar capazes de gerar ondas de partículas radioativas. Estes fenômenos são denominados de *solar particle event* (SPE), pela *Space Weather Prediction Center*, órgão ligado ao NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) nos Estados Unidos. (FAA, 2011). A produção ocorre

¹⁰ “Camada externa e visível do Sol que emite a maioria de suas radiações.” (MICHAELIS, 2015).

repentinamente e de forma esporádica, a partir de erupções solares (*solar flares*) ou ejeções de massa coronal (CME). Em geral, as partículas destes eventos apresentam potenciais energéticos inferiores a 100 MeV, e apenas um pequeno número (cerca de um por ano) possui energia suficiente para ser observado em monitores de radiações na superfície. (ICRP, 2016). A interação de suas partículas com a atmosfera terrestre ocorre da mesma forma que a das radiações cósmicas galácticas, porém, possuem duração curta, de cerca de 5 dias, e são mais frequentes em épocas de máxima atividade solar. (BAGSHAW, 2014).

As erupções solares e as CME estão comumente associadas e se diferenciam pela dimensão da liberação energética de partículas do Sol. Os *solar flares* são explosões na corona solar, de tamanho relativamente menor que as CME, que lançam partículas menos energéticas e demoram cerca de 8 minutos para atingirem a Terra. Já as ejeções de massa coronal são grandes explosões solares e projetam bilhões de toneladas de partículas carregadas no espaço, com velocidades aproximadas de 1,700 quilômetros por segundo, e duram cerca de 15 minutos para atingirem o planeta Terra. Na figura 10 é ilustrado o dimensionamento de uma ejeção de massa coronal em comparativo com a Terra. (SMART; SHEA, 1997).

Figura 10 – Ilustração de explosão solar em contraste com o planeta Terra



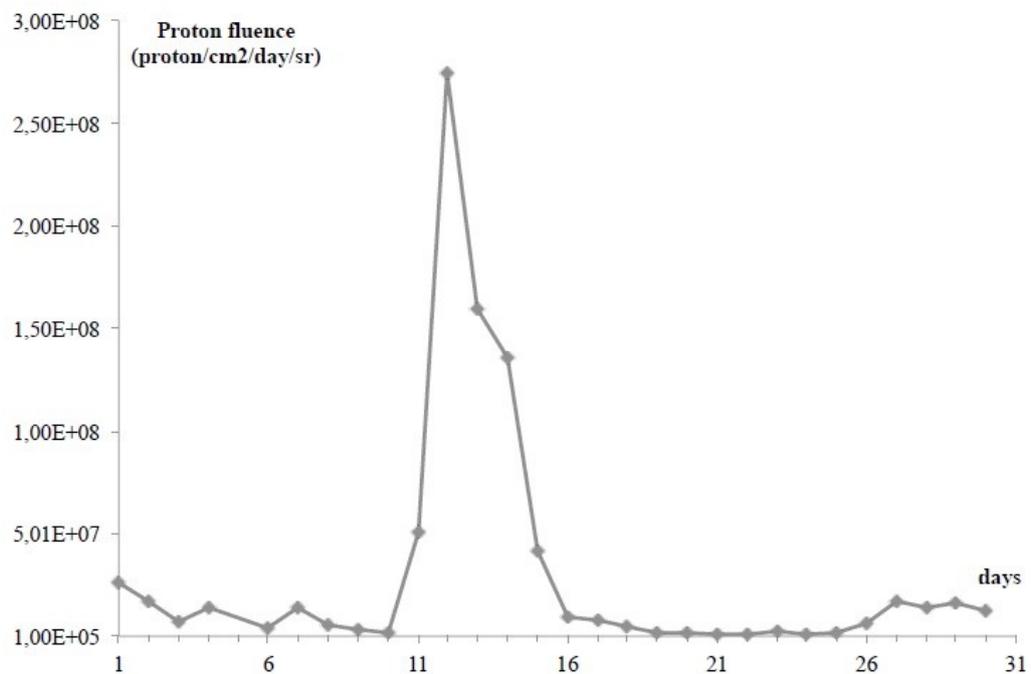
Fonte: NASA (2008).

Os distúrbios no campo geomagnético terrestre podem permitir facilmente a penetração de partículas solares na atmosfera, especialmente as provenientes de eventos de SPE, provocando variações significativas nos níveis de raios cósmicos em altitudes onde são

realizados os voos comerciais. Porém, em determinadas ocasiões, pode haver a redução do índice de radioatividade total (soma da CGR e SCR), tendo em vista a ocorrência da deflexão das partículas galácticas (partículas de maior intensidade) pelo magnetismo do fenômeno solar. Atualmente, a previsão de aumento ou diminuição no nível total de radiação cósmica, durante a ocorrência de uma SPE, não é possível com a tecnologia existente, impossibilitando o gerenciamento preciso da exposição de tripulantes. (BAGSHAW, 2014).

Os eventos de partículas de SCR capazes de modificarem os níveis radioativos na superfície terrestre, através do “chuveiro” de partículas secundárias, são denominados de GLE (*ground level enhancement*). Estas ocorrências têm sido registradas desde 1942, e são enumeradas sequencialmente desde então. Dentre os 64 eventos de GLE, observados até 2003, cerca de 18 apresentaram aumentos significativos de doses radioativas para tripulantes de voos comerciais, com dados primários registrados em uma altitude de 12 mil metros. O registro de um SPE, com alteração do nível radioativo em superfície, ocorrido em abril de 1989, é demonstrado no gráfico 7. (ICRP, 2016).

Gráfico 7 – Fluxo de prótons durante SPE entre 1 e 30 de abril de 1989 (GOES-7)



Fonte: ICRP (2016).

Conforme ICRP (2016), a contribuição destes eventos para a dose de radiação total, na vida de um tripulante de voos comerciais, pode ser desprezada, devido à baixa frequência de ocorrência e a intensidade individual de um SPE ou GLE.

Neste capítulo, foi possível apresentar as propriedades físicas da radiação cósmica e os tipos de energias e partículas que este fenômeno fornece, de modo a demonstrar o seu funcionamento físico e as suas particularidades nas interações com diversos elementos naturais terrestres. Além disso, foram apresentados detalhadamente os principais fatores que influenciam na variabilidade da exposição à radiação cósmica, associando os conceitos a exemplos práticos da aviação para prover a compreensão lógica dos fatores.

No próximo capítulo, são descritos os possíveis efeitos da radiação no organismo humano, as consequências da radiação cósmica nos tripulantes, e os métodos atenuantes dos efeitos ocupacionais dos raios cósmicos.

4 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO

Este capítulo tem como objetivos descrever os efeitos da radioatividade no organismo humano, identificar as prováveis consequências da radiação cósmica nos tripulantes de voos comerciais, comparar e analisar a significância desta exposição com outras profissões e apresentar métodos atenuantes contra os efeitos ocupacionais dos raios cósmicos, através da composição de quatro seções. Inicialmente, são apresentadas informações de características gerais que influenciam nas consequências biológicas da radioatividade em seres humanos, sendo complementado de forma detalhada nas seções 4.1 “Efeitos Biológicos Determinísticos (a Curto Prazo)” e 4.2 “Efeitos Biológicos Estocásticos (a Longo Prazo)”, que descrevem os efeitos biológicos específicos de determinadas doses e períodos de exposições. Na seção 4.3 “Efeitos da Radiação Cósmica em Tripulantes”, são identificadas as prováveis consequências da exposição ocupacional dos tripulantes de voos comerciais à radiação cósmica. Além da realização de uma análise comparativa de significância, entre a radiação experienciada por aeronautas e profissionais de diversas outras áreas. Por fim, a seção 4.4 “Métodos Atenuantes Contra os Efeitos da Radiação Cósmica” apresenta algumas legislações protetivas de controle e gerenciamento das doses de raios cósmicos recebidas por tripulantes, e descreve métodos e recomendações para reduzir os efeitos ocupacionais deste fenômeno no organismo humano.

As consequências da interação da radiação com o organismo humano podem ser descritas em diversos segmentos da ciência, como a física, a química e a biologia. Sob a perspectiva da biologia, são identificados os efeitos dessa interação com o corpo humano, sendo o principal foco desta seção. O estudo torna-se importante, visto que, de acordo com as características da exposição à radiação, pode-se sofrer desde lesões celulares e transformações moleculares isoladas, até o comprometimento generalizado de tecidos e órgãos vitais. (XAVIER *et al.*, 2014)

Oliveira *et al.* (2016) descrevem que, para a ocorrência de lesões celulares, são necessárias três fases distintas, denominadas de fases física, química e biológica, com base nas suas ciências de estudo referencial. A fase física ocorre em um período de 10 a 13 segundos após o primeiro contato radioativo, e está compreendida entre o momento que a energia da radiação se transfere à matéria, até a geração de novos produtos oriundos desta interação. A fase química representa a reação dos subprodutos da primeira fase com as moléculas vizinhas, e ocorre em um período de 6 a 10 segundos. E a fase biológica, que possui origem nas demais, classifica-se como o período que os resultados dos danos são proliferados, podendo durar de segundos até diversos anos.

Os efeitos da fase biológica podem ser diversos, e estão relacionados às características gerais da exposição radiativa e do organismo, conforme descrevem Xavier *et al.* (2014, p. 34):

- **Especificidade:** os efeitos biológicos das radiações podem ser provocados por outros agentes físicos, químicos ou biológicos.
- **Reversibilidade:** a célula possui mecanismos de reparo, podendo, em caso de danos parciais, re-sintetizar ou restaurar uma estrutura danificada.
- **Transmissividade:** a maior parte das alterações causadas pelas radiações ionizantes que afetam células e organismos não se transmitem a outras células ou outros organismos, exceção feita à irradiação das gônadas, que pode resultar em alterações transmissíveis aos descendentes.
- **Radiossensibilidade:** nem todas as células, tecidos órgãos ou organismos respondem igualmente à mesma dose de radiação. A radiosensibilidade das células é diretamente proporcional a sua capacidade de reprodução e inversamente proporcional ao seu grau de especialização.
- **Fatores de Influência:** pessoas expostas à mesma dose de radiação não apresentam, necessariamente os mesmos danos e o mesmo tempo de resposta. Por exemplo, o indivíduo é mais vulnerável à radiação quando criança (processo de multiplicação celular mais significativo) ou quando idoso (processo de reparo celular pouco eficiente).
- **Tempo de Latência:** Há um período de tempo que decorre entre o momento da irradiação e o surgimento do dano visível ou detectável.
- **Limiar:** Certos efeitos exigem, para se manifestar, que a dose de radiação seja superior a uma dose mínima.

Oliveira *et al.* (2016) acrescentam que o poder dos efeitos biológicos também está atrelado à “qualidade” das radiações, que basicamente é a capacidade dos elementos do organismo humano em absorver as energias, e variam com o potencial energético das partículas e a sua velocidade de penetração. Partículas radioativas mais carregadas proporcionam ionizações de maior intensidade nas células, aumentando os danos isolados ou proliferados, como no caso dos raios alfa (α), que são mais energéticos do que os raios beta (β). Como complemento, as partículas de menor velocidade representam maior impacto danoso, visto que quanto mais lenta a penetração, maior é o tempo em contato com a matéria, possibilitando mais ionizações. Portanto, partículas caracterizadas como de alta velocidade, são consideradas menos nocivas ao organismo biológico, porém, à medida que colidem com a matéria, perdem velocidade e aumentam os seus efeitos.

A relação entre a dose absorvida e a taxa de absorção também apresenta um papel determinante nos efeitos da radioatividade no organismo. Quando comparadas duas dosagens iguais, porém, com absorções em períodos diferentes, ocorre a alteração do tipo de impacto biológico. Por exemplo, quanto mais fracionada e em maior tempo uma mesma dose for recebida, menores serão os seus efeitos, devido à capacidade de recuperação celular humana.

Do contrário, se a dose radioativa for absorvida de forma contínua e em um curto período de tempo, os danos serão intensificados, pois não há tempo suficiente entre os recebimentos das dosagens para proporcionar a recuperação celular natural. (XAVIER *et al.*, 2014).

Desta forma, com base nas características apresentadas, os efeitos biológicos podem ser classificados em determinísticos (efeitos a curto prazo ou agudo) ou estocásticos (efeitos a longo prazo ou tardios), sendo os estocásticos subdivididos em genéticos (origem indireta e hereditária) ou somáticos (acumulo direto de dosagens radioativas). (XAVIER *et al.*, 2014).

4.1 EFEITOS BIOLÓGICOS DETERMINÍSTICOS (A CURTO PRAZO)

Os efeitos classificados como determinísticos ocorrem por consequência direta da exposição do organismo humano, em um curto período temporal, a altas doses de energias radioativas. Esses efeitos são definidos por exposições com limiares, ou seja, necessitam de dosagens mínimas para que haja o colapso e desenvolvimento das patologias. Por definição, todos os efeitos manifestados em até 60 dias, a partir da data da exposição inicial, são considerados de caráter determinístico. O tempo para a ocorrência dos sintomas pode ser alterado, e depende de fatores como a resistência do organismo, o tipo de tecido do órgão afetado, a quantidade da dose absorvida pelo local e período em que ocorreu a exposição total. (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Conforme Xavier *et al.* (2014, p. 35), “estes efeitos incluem inflamação e ulceração da pele, náusea, vômito, anorexia, diarreia, queda de cabelos, anemia, hemorragia, infecções, etc.”, e ocorrem principalmente pela morte localizada ou generalizada de células do corpo, à velocidades e quantidades superiores a capacidade de reposição celular natural do organismo humano. Os tecidos mais sensíveis a estas mortes são os que necessitam de reprodução celular contínua e permanente para o seu funcionamento normal, como por exemplo a medula óssea, a pele, o revestimento gastrointestinal e o tecido germinativo (embrionário).

Alguns dos efeitos somáticos determinísticos, assim como suas respectivas doses limiares, estão representados na tabela 5. Os sintomas apresentados ocorrem apenas a partir da absorção de suas respectivas dosagens pelo organismo, em período curto de tempo, não ocorrendo qualquer manifestação de patologias com doses inferiores as de seus limiares.

Tabela 5 – Efeitos e limiares da radio-exposição de corpo inteiro em adultos

Forma	Dose Absorvida	Sintomatologia
Infra clínica	< 1 Gy ¹¹	Ausência de sintomas na maioria dos adultos.
Reações Gerais Leves	1 – 2 Gy	Astenia, náuseas, vômitos.
Hematopoiética Leve	2 – 4 Gy	Função medular atingida: linfopenia, leucopenia, trombopenia, anemia. Recuperação em 6 meses.
Hematopoiética Grave	4 – 6 Gy	Função medular gravemente atingida.
Gastrintestinal	6 – 7 Gy	Diarreia, vômitos. Morte em 5-6 dias.
Pulmonar	8 – 9 Gy	Insuficiência respiratória, coma. Morte entre 14-36 horas.
Cerebral	> 10 Gy	Colapso do sistema nervoso central. Morte em poucas horas.

Fonte: Xavier *et al.* (2014).

Oliveira *et al.* (2016) complementam que na eventualidade do recebimento de doses de 1000 Gy ou superiores, há a total falência do sistema biológico, através do processo de desnaturação (perda da forma tridimensional) de todas as proteínas e enzimas, findando em óbito dentro de alguns minutos ou horas.

4.2 EFEITOS BIOLÓGICOS ESTOCÁSTICOS (A LONGO PRAZO)

Os efeitos classificados como estocásticos ocorrem por consequência direta ou indireta da exposição do organismo humano a baixas e médias doses de energias radioativas, em um longo período temporal. As consequências diretas são denominadas de somáticas, e resultam da exposição do próprio organismo afetado à radiação. Já as consequências indiretas, denominadas de genéticas, ocorrem devido a transferência de DNA, através da herança genética de tecido germinativo danificado, fornecida por outros organismos expostos. Efeitos a longo prazo normalmente ocorrem em indivíduos ocupacionalmente expostos, e não possuem limiar de exposição definidos, ou seja, não necessitam de dosagens mínimas para que haja o colapso

¹¹ Gray: quantidade de energia radioativa ionizante absorvida pela matéria (joule/quilograma). (MICHAELIS, 2015).

e desenvolvimento das patologias, portanto, qualquer indivíduo que tenha sofrido irradiação está sujeito a desenvolver e manifestar os efeitos somáticos no decorrer de anos. (XAVIER *et al.*, 2014).

O estudo dos efeitos estocásticos é extremamente dificultoso para a ciência, devido à ampla variedade de fatores externos que os indivíduos experienciam no decorrer de suas vidas, não podendo afirmar cientificamente, no caso de doses baixas, se a origem da patologia fora em decorrência da radiação recebida. Além disso, o período de latência também dificulta o processo de análise, visto que a identificação da manifestação de determinados sintomas pode levar cerca de dezenas de anos. Porém, apesar da dificuldade enfrentada pela ciência para a definição dos sintomas, alguns dos efeitos estocásticos somáticos são: maior incidência da carcinogênese¹², redução do tempo de vida médio (envelhecimento), anomalias em embriões (matéria sensível e de alta reprodução celular) e indução de catarata. (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

A carcinogênese é apresentada como sendo a manifestação mais indesejada dos efeitos estocásticos, pois pode ocasionar a morte do indivíduo afetado. E, apesar da imprecisão dos estudos científicos com o tema, a radiação é demonstrada como um forte fator para o surgimento de cânceres. O seu limiar radioativo é inexistente, devido a imprecisão das informações, porém, acredita-se que alguns tecidos biológicos (mais resistentes) podem ter limiares superiores ao do seu tempo de vida, portanto, nunca sofreriam da carcinogênese. (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Alguns eventos como os acidentes radioativos de Goiânia, Chernobyl e as bombas de Hiroshima e Nagasaki foram utilizados na tentativa de determinar o limiar mínimo para o aparecimento de câncer na população atingida pelas catástrofes. Nos casos de Hiroshima e Nagasaki, foi constatado um aumento nos casos de leucemias mieloides e linfocíticas, que apareceram cinco anos após a explosão e que mostram os efeitos tardios das irradiações. O pico de aparecimento dessa doença, porém, deu-se 14 anos mais tarde. Constatou-se também o aparecimento de câncer de mama na população feminina jovem (média de 28 anos de idade), com um tempo de latência de 15 anos. O pulmão e a tireoide também são órgãos atingidos pela radiação, ou seja, são muito radiosensíveis. (OLIVEIRA *et al.*, 2016, p. 318).

O envelhecimento como consequência de baixas doses de radiações provém de experimentos laboratoriais realizados com animais, onde fora comprovada a redução de tempo de vida de organismos biológicos expostos. E algumas das hipóteses apresentadas foram: possíveis danos celulares, alterações em DNA, aceleração do processo fisiológico e ativação errônea das defesas naturais do organismo para reparos celulares. (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

¹² Processo de formação do câncer. (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Já a indução da catarata ocorre principalmente por partículas de nêutrons, que causa a morte de células no olho humano a partir de sua radiação. Os sintomas são demonstrados no decorrer de diversos anos, que também dificulta a análise da influência direta do fator radiação. Estima-se que uma dose de 15 Sv¹³ já seja suficiente para a manifestação da patologia, distribuído em um período de 50 anos. (OKUNO *et al.*, 1982).

A anomalia em embriões ocorre devido à fragilidade do processo de multiplicação celular no qual o material biológico se encontra. Sua hipótese surgiu a partir de experimentos laboratoriais com ratos, que demonstraram evidências de anomalias e mortes fetais quando expostos a pequenas doses radioativas de raios X (entre 0,25 e 1 Sv). (OKUNO *et al.*, 1982).

E, por fim, os efeitos genéticos, que basicamente consistem em mutações de DNA presentes nas células reprodutoras (óvulos e espermatozoides) que irão gerar indivíduos futuros. Esses efeitos são ocasionados pela interação direta da radiação com essas células, que altera a informação genética responsável pela codificação da estrutura molecular e das enzimas. Na fecundação, o DNA afetado é reproduzido com erros milhões de vezes, proporcionando mutações nos novos tecidos gerados, causando deformidades no corpo e até mortes fetais, por rejeição biológica natural. O efeito genético é a única consequência, causada pela radiação, que se transmite através das gerações, porém, com uma probabilidade baixa de cerca de 1,3%. (OKUNO *et al.*, 1982).

4.3 EFEITOS DA RADIAÇÃO CÓSMICA EM TRIPULANTES

Os efeitos biológicos da radiação experienciados pelos tripulantes de voos comerciais, através da interação com os raios cósmicos, são classificados como estocásticos somáticos, devido às características das partículas radioativas e da exposição ocupacional que se encontram. Os raios cósmicos (CR) fornecem baixas doses radioativas em um longo período de tempo, portanto os efeitos determinísticos são descartados para membros de tripulações. Os efeitos estocásticos em tripulantes têm sido estudados desde 1990, e diversas pesquisas científicas apontam a exposição radioativa ocupacional destes indivíduos como um possível fator de aumento nos índices de determinados tipos de câncer. (FEDERICO, 2011).

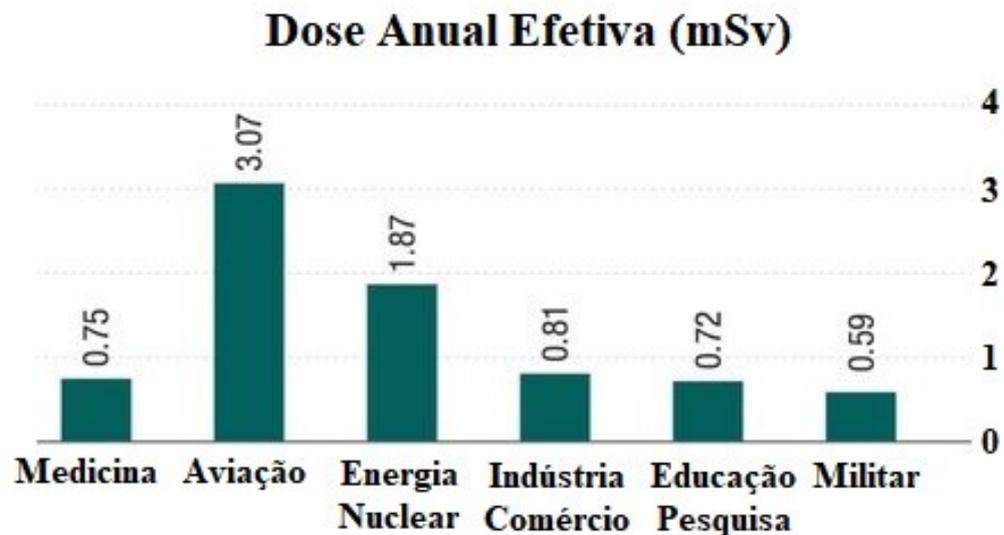
Conforme FAA (2011), o aumento do risco de câncer fatal é o principal fator preocupante nas doses radioativas recebidas por tripulantes e, apesar de haver influências de

¹³ “Unidade de radiação emitida por 1 miligrama de rádio a 1 cm do alvo, por um período de 1 hora.” (MICHAELIS, 2015).

fatores externos, que dificultam os estudos científicos, como a variação do ritmo circadiano, a incidência de raios ultra violeta e a alteração do estresse na profissão, a exposição ocupacional apresenta-se como responsável por um aumento de 0,3%, nas chances diretas de câncer, no decorrer de uma vida inteira na profissão. Aumentos perceptíveis de câncer de mama em tripulantes do sexo feminino, e câncer de próstata em tripulantes do sexo masculino, também são índices relacionados à radiação cósmica, além do associado risco excessivo de tumor cerebral, câncer de pele e catarata, experienciado por indivíduos de ambos os sexos. Porém, devido a ampla variabilidade de fatores não controlados e o tempo para a manifestação de sintomas (latência), a ciência apenas sugere hipóteses, não podendo afirmar com precisão acadêmica, a relação direta da radiação com estas patologias.

Além disso, cuidados específicos devem ser adotados por tripulantes femininas grávidas, visto que a dose anual limite para esta condição, correspondente a 1 mSv¹⁴, pode ser facilmente excedida na realização de voos comerciais frequentes, conforme ilustra o gráfico 8, apresentado em comparativo com profissões de outras áreas. O afastamento do cargo deve ocorrer assim que identificada a gravidez, sob o risco de deformação ou possível morte fetal. (FAA, 2011).

Gráfico 8 – Doses de radiações anuais recebidas por profissionais diversos - (ICRP, 2016)



Fonte: Adaptação do Autor (2019).

¹⁴ Unidade de medida de radiação emitida, equivalente a 0,001 Sv (Sievert). (MICHAELIS, 2015).

Efeitos genéticos da exposição à radiação cósmica ionizante, transferidos para futuras gerações através de DNA defeituoso, também são possíveis consequências associadas à profissão, porém, o risco é considerado baixo. Para uma dose média de radiação cósmica, recebida por tripulantes de voos comerciais em um período de 5 anos, o risco de seus descendentes herdarem defeitos severos induzidos é de até 0,008%, e apenas para as primeiras gerações. (FAA, 2011).

Xavier *et al.* (2014) descrevem que o risco mundialmente aceito de morte por câncer induzido pela radiação é de 0,05/Sv, e quando considerada uma exposição de dose máxima anual, limitada para tripulantes de voos comerciais em 20 mSv, há um aumento do risco de morte em 20 vezes, se comparado ao risco de indivíduos não ocupacionalmente expostos.

Na tabela 6, são demonstrados comparativos entre os riscos de morte por acidentes de trabalho, em ocupações de diversas áreas não consideradas expostas à radiação, e o risco de morte por câncer induzido radioativamente, de profissões definidas como ocupacionalmente expostas, ou seja, os tripulantes de voos comerciais.

Tabela 6 – Riscos de morte por áreas de atuação nos EUA em 1989 – (HALL, 2000)

Trabalhadores nas áreas de atuação	Valor médio do risco de morte
Exposição ao limite anual de radiação	0,1%
Transporte/Utilidades Públicas	0,043%
Governo	0,040%
Comércio	0,032%
Agricultura	0,009%
Mineração	0,009%
Construção	0,006%
Serviços	0,004%
Produção	0,004%

Fonte: Adaptação do Autor (2019).

É possível identificar na tabela 6, que o índice do risco de morte por câncer induzido pela radiação em tripulantes pode superar todos os demais índices nas diversas outras áreas

ocupacionais não expostas. Portanto, merecendo aprofundamento do estudo científico na questão.

4.4 MÉTODOS ATENUANTES CONTRA OS EFEITOS DA RADIAÇÃO CÓSMICA

Métodos atenuantes contra os efeitos da radiação ionizante são aplicados em diversas áreas da sociedade que envolvam procedimentos, contendo materiais radioativos. A proteção dos profissionais tem sido realizada por leis e recomendações de entidades nacionais e internacionais, na intenção principal de evitar acidentes radioativos e reduzir o nível da exposição ocupacional dos indivíduos para dosagens aceitáveis, de baixo risco à saúde humana. Na aviação internacional, o reconhecimento de membros de tripulações como indivíduos ocupacionalmente expostos surgiu em 1991, através de publicações da *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*, atualmente reconhecida como a entidade de maior representatividade e significância no âmbito de proteção radiológica. (BAGSHAW, 2014).

Nas operações aéreas de transporte de passageiros, o risco de acidentes radioativos de alta dosagem é praticamente inexistente, porém, a exposição dos tripulantes a baixas doses radioativas dá-se de forma contínua e relativamente desprotegida. A ausência de proteção radiológica física no setor ocorre devido à inviabilidade econômica da aplicação de blindagens radioativas em aeronaves, tendo em vista o elevado peso dos materiais necessários para o isolamento efetivo das fuselagens¹⁵ contra partículas cósmicas. Portanto, visando atenuar os efeitos da radiação cósmica em tripulantes, foram estabelecidos pela ICRP, e adotados por diversas outras entidades reguladoras, limites de doses radioativas anuais e quinquenais para as exposições, além de recomendações aos operadores e indivíduos ocupacionalmente expostos. (BAGSHAW, 2014).

Na tabela 7, Bagshaw (2014) demonstra um comparativo entre os limites de dosagens radioativas efetivas estabelecidos pela ICRP e mais duas entidades, a *European Union (EU)* e a *Federal Aviation Administration (FAA)*, que adotaram e aprimoraram os dados da ICRP, de acordo com as suas necessidades de estado.

¹⁵ “Corpo principal da aeronave onde se acomodam os tripulantes, os passageiros e a carga.” (MICHAELIS, 2015).

Tabela 7 – Resumo de limites máximos de dose radioativa efetiva por entidades

INDIVÍDUO	ICRP	EU	FAA
Público Geral	1 mSv/ano	1 mSv/ano	1 mSv/ano
Ocupacionalmente Exposto	20 mSv/ano ⁽¹⁾	20 mSv/ano ⁽¹⁾	20 mSv/ano ⁽¹⁾
Feto	1 mSv/ano	1 mSv/ano, com termo de declaração de gravidez e ALARA ¹⁶	1 mSv/ano, e máximo de 0,5 mSv/mês
Nível de Controle	-	6 mSv	-

Fonte: Bagshaw (2014).

⁽¹⁾ Se em 5 anos consecutivos. Sem exceder 50 mSv em um dos anos.

No Brasil, a proteção para indivíduos expostos a radiações ionizantes é semelhante a recomendada pela ICRP, e possui respaldo legal através da Norma Regulamentadora de Segurança e Medicina do Trabalho NR-15, publicada pelo Ministério do Trabalho e Emprego. A NR-15 dispõe sobre as atividades e operações insalubres, abrangendo diversas áreas e profissões no país, e normatiza a proteção da radiação ionizante através de seu anexo quinto:

Nas atividades ou operações onde trabalhadores possam ser expostos a radiações ionizantes, os limites de tolerância, os princípios, as obrigações e controles básicos para a proteção do homem e do seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante, são os constantes da Norma CNEN-NN-3.01: "Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica", de março de 2014, aprovada pela Resolução CNEN n.º 164/2014, ou daquela que venha a substituí-la. (*Atualizado pela Portaria MTb n.º 1.084, de 18 de dezembro de 2018*) (BRASIL, 2018b, p. 5).

A Norma CNEN-NN-3.01 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), também apresenta limites de dosagens anuais e quinquenais, mas para áreas profissionais diversas, sem ser específica à aviação. Porém, pode abranger o setor aeronáutico por interpretação da norma, tendo em vista a não restrição das fontes radioativas na publicação, que podem ser provenientes de origens naturais, como os raios cósmicos. (CNEN, 2014). Na tabela 8, é demonstrada a limitação de dose individual prevista no Brasil.

¹⁶ *As Low As Reasonably Achievable*, ou, tão baixo quanto razoavelmente possível. (BAGSHAW, 2014).

Tabela 8 – Limites anuais máximos de doses radioativas individuais no Brasil

GRANDEZA	ÓRGÃO	INDIVÍDUO OCUPACIONALMENTE EXPOSTO	INDIVÍDUO DO PÚBLICO GERAL
Dose Efetiva	Corpo inteiro	20 mSv ⁽¹⁾	1 mSv ⁽²⁾
	Cristalino	20 mSv ⁽¹⁾	15 mSv
Dose Equivalente	Pele ⁽³⁾	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

Fonte: CNEN (2014).

⁽¹⁾ Média anual em um período quinquenal consecutivo, sem exceder 50 mSv em qualquer ano. ⁽²⁾ Passível de extensão para 5 mSv em um ano, para casos especiais analisados pela CNEN. ⁽³⁾ Quantidade média em área de 1cm² da região mais afetada.

Além dos limites das doses radioativas, que atenuam a exposição de profissionais como os aeronautas, a ICRP descreve recomendações para operadores e tripulantes, em sua publicação de número 132 (específica para a exposição à radiação cósmica), na intenção de amenizar e controlar os efeitos ocupacionais. Para os operadores de linhas aéreas, é recomendado efetuar o controle contínuo e a avaliação da exposição individual dos seus colaboradores, organizar as escalas de voo de modo a evitar exposições individuais excessivas, manter os tripulantes informados do seu nível de exposição anual com riscos associados, e aplicar proteção especial às tripulantes do sexo feminino, que se encontrem em período de gestação. Aos tripulantes, é recomendado fazer o registro das doses de radiações recebidas no trabalho e em ocasiões como a de exames radiológicos (através de programas computacionais, inserindo determinados dados de voos e procedimentos médicos realizados no período), buscar informações relacionadas ao tema Radiação Cósmica de forma autônoma, e quando possível, optar por escalas com voos em regiões e horários de menores exposições radioativas (baixas latitudes e quando não há previsão de ocorrência de eventos solares intensificadores). (ICRP, 2016).

Já a União Europeia vai além das recomendações, impondo diretivas obrigatórias, similares as recomendações da ICRP, para todos os operadores de companhias aéreas da união, através do Art. 42 da 96/29/EURATOM, que dispõe sobre a proteção do pessoal de voo:

Cada Estado-membro tomará as medidas necessárias para que as empresas de aviação tomem em consideração a exposição às radiações cósmicas do pessoal de voo que possa ser sujeito a uma exposição superior a 1 mSv por ano. As empresas devem tomar medidas adequadas, designadamente:

- Para avaliar a exposição do pessoal em questão;
- Para ter em consideração a exposição avaliada na organização dos horários de trabalho, a fim de reduzir as doses das tripulações muito expostas;
- Para informar os trabalhadores em questão sobre os riscos que o seu trabalho comporta para a saúde;
- Para aplicar o artigo 10º à tripulação feminina. (CEU, 1996, p. 15).

Em adição, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) prevê, no documento 8984 (Manual de Medicina de Aviação Civil), o uso obrigatório de medidores radioativos que indiquem o nível atual da exposição, para as aeronaves que pretendam operar voos acima de 49.000 pés. (ICAO, 2012).

Atualmente, no Brasil, não há legislação aeronáutica específica, exigindo a obrigatoriedade do controle e monitoramento da exposição dos tripulantes pelos operadores, porém, a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) está investindo na participação de projetos como o ERISA (Efeitos das Radiações Ionizantes em Sistemas Aeronáuticos), o DRIEAB (Dosimetria da Radiação Ionizante no Espaço Aéreo Brasileiro) e o RCMA (Medidas dos efeitos da Radiação Cósmica em Memórias embarcadas em equipamentos Aviônicos), que poderão integrar a aviação brasileira a proteções radiológicas específicas ao setor, algo já aplicado por diversos outros países internacionalmente. (BRASIL, 2017).

Oliveira *et al.* (2016) complementam, através de hipóteses biofísicas, ser possível atenuar os efeitos lesivos das radiações de baixas dosagens (como as experienciadas por tripulantes) por meios químicos artificiais ou naturais, via ingestão de alimentação equilibrada ou pílulas, que possibilitem níveis hormonais adequados, quantidades ideais de sódio, vitaminas, e compostos sulfurados. O organismo quando provido dos elementos necessários para o seu funcionamento, executa uma menor taxa de reprodução das células, reduzindo a multiplicação cancerígena, além de fornecer protetores biológicos aos radicais livres, resultantes dos processos de ionizações.

Neste capítulo, foram descritos os efeitos da radioatividade no organismo humano, classificando-os em determinísticos (a curto prazo) e estocásticos (a longo prazo), além de identificar as prováveis consequências da exposição ocupacional à radiação cósmica em tripulantes de voos comerciais, e realizar análises de significância radioativa com diversas outras profissões. Foram apresentados métodos atenuantes dos efeitos ocupacionais dos raios cósmicos e recomendações para reduzir essas consequências, assim como as principais legislações nacionais e internacionais de registro, controle e gerenciamento da radiação cósmica em tripulantes. Além da identificação da atual abstenção do Brasil em legislar de forma específica para a proteção radioativa dos aeronautas no país.

No próximo capítulo, é realizada a análise do risco e da exposição à radiação cósmica experienciada pelos tripulantes de voos comerciais, além da reflexão e questionamento sobre a necessidade da criação de legislação específica para a proteção a longo prazo e controle deste fenômeno no Brasil.

5 EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL DOS TRIPULANTES

Este capítulo tem como objetivo analisar a exposição à radiação cósmica e o risco ocupacional dos tripulantes de voos comerciais, no intuito de questionar a necessidade da criação de legislação específica para a proteção e controle deste fenômeno no Brasil. Inicialmente, são apresentadas as características dos programas computacionais internacionalmente utilizados nos procedimentos de registro, controle e gerenciamento da radiação cósmica em tripulantes de voos comerciais. Em seguida, são demonstrados dados oficiais de diversos países, contendo informações das doses radioativas recebidas por tripulantes de várias companhias aéreas. E apresentadas as estimativas das dosagens em tripulantes brasileiros, baseadas em pesquisas científicas, devido à ausência de registros oficiais atualmente no país. Além disso, são realizadas diversas análises comparativas das exposições e dos riscos associados a ocupação dos tripulantes. O capítulo finaliza com a apresentação de justificativas e a reflexão da necessidade da criação de legislação específica para a proteção e controle da radiação cósmica no Brasil.

O registro e a análise contínua de dados da exposição radioativa ocupacional dos tripulantes de voos comerciais têm sido realizados por diversos países da comunidade internacional, desde o reconhecimento dos profissionais da área como ocupacionalmente expostos, em 1991, e as publicações de recomendações protetivas, estabelecidas pela ICRP (*International Commission on Radiological Protection*), e posteriormente adotadas por várias entidades nacionais. O interesse em controlar a já sabida exposição aos raios cósmicos intensificou-se após o significativo avanço tecnológico na aviação, que permitiu às aeronaves *performance* para realizarem voos em ambientes mais expostos, como em maiores altitudes e em rotas polares. (BAGSHAW, 2014).

De acordo com os métodos atuais descritos por Bagshaw (2014), as doses de radiações cósmicas experienciadas pelos tripulantes podem ser mensuradas de duas formas: ativamente ou passivamente. A forma ativa corresponde à medição direta de todas as partículas ionizantes que atravessam a fuselagem da aeronave e interagem com os tripulantes, através do uso de diversos equipamentos específicos, de forma contínua e em todos os voos, sendo considerada a forma mais precisa de medição. Porém, é a forma mais trabalhosa e custosa para as companhias aéreas. A única aeronave comercial da história da aviação a utilizar este método fora o Concorde, que realizava voos em altitudes próximas a 60 mil pés (ambiente de exposição radioativa superior em até 3 vezes as doses experienciadas por aeronaves regulares atualmente). Mas, os elevados custos de instalações, manutenções e calibrações frequentes dos equipamentos

nas frotas das aeronaves, tornaram o método ativo impraticável pela análise do custo-benefício, além da logística de coletar, registrar e atribuir individualmente os dados aos tripulantes para posterior verificação e gerenciamento.

Já a forma passiva corresponde à medição indireta da radiação, através da utilização de *softwares* específicos capazes de calcular a exposição dos tripulantes por meio da programação de códigos e da interpolação linear de dados reais inseridos, que são obtidos tridimensionalmente em diversos pontos do planeta. Periodicamente, é necessário a execução da validação dos programas (“calibragem”), através de medições diretas e posteriores comparações entre a real exposição e a medição calculada via programa computacional. Alguns dos *softwares* mais utilizados por operadores aéreos e entidades protetivas ou reguladoras estão dispostos na tabela 9. (BAGSHAW, 2014).

Tabela 9 – Características dos *softwares*/códigos para estimativas - (BAGSHAW, 2014)

PROGRAMA / CÓDIGO	FATOR DE CONVERSÃO	TIPO DE CÁLCULO	MEIO DISPONÍVEL	DESENVOLVEDOR
AVIDOS	ICRP 60 (ICRP, 1991)	Rota	<i>On-line</i>	<i>Austrian Institute of Technology (AIT)</i>
CARI-6	ICRP 60 (ICRP, 1991)	Rota, coordenada fixa	Pacote de <i>Software</i>	<i>Civil Aerospace Medical Institute (FAA)</i>
EPCARD	ICRP 60 (ICRP, 1991)	Rota, coordenada fixa	<i>On-line</i>	<i>German Research Center for Environmental Health (HMGU)</i>
EXPACS	ICRP 60 ou ICRP 103 (ICRP, 1991; ICRP, 2008)	Coordenada fixa	Pacote de <i>Software</i>	Método Monte Carlo
PCAIRE	ICRP 60 (ICRP, 1991)	Rota	<i>On-line</i>	Códigos FLUKA e LUIN
QARM	ICRP 74 (ICRP, 1997)	Rota, coordenada fixa	<i>On-line</i>	Método Monte Carlo
SIEVERT	ICRP 60 e EPCARD (ICRP, 1991)	Rota	<i>On-line</i>	<i>French General Directorate of Civil Aviation (DGAC)</i>

Fonte: Adaptação do Autor (2019).

Conforme observado, a disponibilidade de alguns programas ocorre através de plataformas *on-line*, possibilitando o acesso por meio da *internet* por quaisquer tripulantes, interessados em verificar e analisar a sua própria exposição anual. Além disso, a utilização do código PCAIRE é gratuita, necessitando apenas de cadastro, diretamente na plataforma, onde os dados inseridos pelo indivíduo serão mantidos em bancos de memórias, para possibilitar o acúmulo de informações das dosagens por períodos.

Segundo Bagshaw (2014), estes programas computacionais para a execução dos cálculos de estimativa das dosagens radioativas, levam em consideração os seguintes dados:

- a) A data e a duração total do voo;
- b) As altitudes de todos os momentos do voo;
- c) A atividade solar no período de realização do voo;
- d) A latitude e longitude de cada ponto da rota sobrevoada;
- e) A qualidade das radiações na rota executada pela aeronave;
- f) As coordenadas geográficas do aeroporto de partida e de destino.

A imprecisão de determinados programas, de acordo com a *European Commission* (2004), pode chegar a cerca de 25% de erro, e ocorre por consequência de fatores como: a imprecisão dos dados inseridos no *software*, sobre a irregularidade do campo geomagnético terrestre e a ausência da atualização das informações de sua modificação contínua; a ocorrência não prevista de *Solar Particle Events* (SPE) ou a aplicação de métodos errôneos nas considerações dos eventos solares; a escolha deficiente dos métodos de conversões das partículas radioativas em doses efetivas recebidas pelo organismo biológico; e valores incertos dos fluxos e distribuições das partículas dos raios cósmicos nas regiões selecionadas. Porém, mesmo havendo uma determinada falta de precisão pela forma indireta de medição das dosagens, os parâmetros encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela ICRP, que requer uma precisão maior ou igual a 42%.

A exposição ocupacional dos tripulantes de voos comerciais à radiação cósmica, em média, apresenta valores de dosagens entre 1 e 5 μSv^{17} por hora, sendo estas dosagens mais intensas nos voos de longas distâncias (entre 4 e 5 $\mu\text{Sv/h}$) do que nos de curtas distâncias (entre 1 e 3 $\mu\text{Sv/h}$), devido ao maior tempo de permanência na fase de cruzeiro (período que a máxima altitude de determinado voo é mantida) e a utilização de níveis mais elevados nos voos longos.

¹⁷ Unidade de medida de radiação, correspondente a 0,001 mSv (Milisievert). (MICHAELIS, 2015).

Como parâmetro comparativo, os dados registrados pela aeronave Concorde demonstravam doses de radiações cósmicas entre 12 e 15 $\mu\text{Sv/h}$ (cerca de 3 vezes maiores), por consequência da altitude que era realizada a sua fase de cruzeiro (superior à dos atuais voos comerciais tradicionais). (ICRP, 2016).

Devido à ausência de legislação brasileira que obrigue os operadores das empresas aéreas a registrarem oficialmente a exposição ocupacional de seus tripulantes à radiação cósmica, são apresentados na tabela 10 dados reais fornecidos por diversos países da União Europeia (onde há a obrigatoriedade do registro da exposição), de modo a demonstrar exemplos oficiais dos níveis das doses radioativas que os profissionais do setor experienciam.

Tabela 10 – Exposição ocupacional dos tripulantes em diversos países - (EAN, 2012)

(continua)

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

(conclusão)

PAÍS	MÉTODO DE AVALIAÇÃO	NÚMERO DE TRIPULANTES	DOSE ANUAL EFETIVA
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: Adaptação do Autor (2019).

⁽¹⁾ Dados de 2009. ⁽²⁾ Dados de 2008. ⁽³⁾ Dados de 2007.

Dados publicados pela FAA (FRIEDBERG; COPELAND, 2003), demonstram na tabela 11 a exposição média dos tripulantes americanos em cinco dos voos domésticos e cinco dos voos internacionais mais expostos as doses de radiações cósmicas (mSv/h).

Tabela 11 – Dose efetiva de GCR recebida por tripulantes americanos

ORIGEM - DESTINO	ALTITUDE MÁXIMA (mil pés)	TEMPO DE OPERAÇÃO (horas)	DOSE TOTAL (mSv)	DOSE EFETIVA (mSv/h)
Athens GR - New York NY	41	9.7	0.0613	0.0063
London UK - Chicago IL	39	8.3	0.0475	0.0057
Chicago IL - London UK	37	7.7	0.0430	0.0056
London UK - Los Angeles CA	39	11.0	0.0616	0.0056
Tokyo JP - New York NY	41	12.5	0.0696	0.0056
New York NY - Seattle WA	39	5.6	0.0280	0.0050
San Francisco CA - Chicago IL	41	4.3	0.0207	0.0048
Seattle WA - Anchorage AK	35	3.7	0.0169	0.0046
Chicago IL - San Francisco CA	39	4.3	0.0194	0.0045
Seattle WA - Washington DC	37	4.4	0.0192	0.0044

Fonte: Friedberg; Copeland (2003).

No Brasil, dados extraoficiais de pesquisas autônomas, com medições diretas e comparações com cálculos efetuados via *software* CARI-6, indicam que as doses dos tripulantes no país são equivalentes as médias das exposições dos profissionais da tabela 10:

Tabela 12 – Doses médias extraoficiais no Brasil - (HEILBRON FILHO *et al.*, 2012)

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 $\mu\text{Sv/h}$

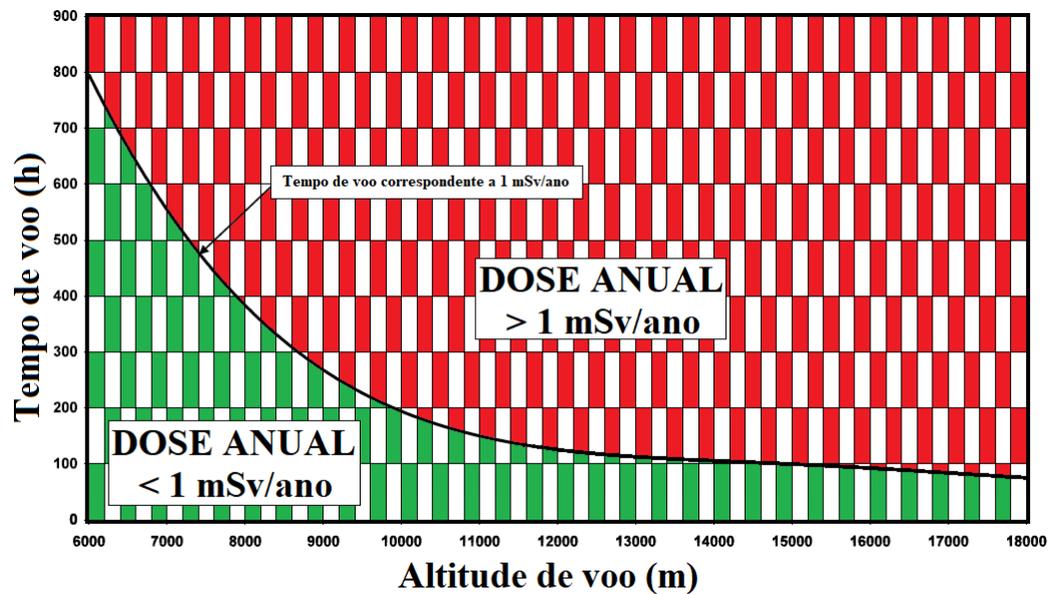
Fonte: Adaptação do Autor (2019).

Ao considerar a dose média mais restritiva demonstrada na tabela 12 (de 2,13 $\mu\text{Sv/h}$), e aplicá-la matematicamente ao limite máximo anual de 850 horas de voo estabelecido no Brasil (resultado de 1,81 mSv/ano), o tripulante brasileiro ultrapassa o limiar de 1 mSv/ano, classificando-o como ocupacionalmente exposto, porém, permanece com a margem de exposição distante do limite anual máximo determinado pela CNEN, de 20 mSv/ano. (HEILBRON FILHO *et al.*, 2012).

Federico (2011) complementa, por meio de estimativas com o programa CARI-6, que a dose média efetiva recebida por tripulantes brasileiros anualmente varia entre 1,45 mSv e 1,67 mSv. E quando consideradas as variações da atividade máxima e mínima solar, ou seja, respectivamente o aumento da SCR (*solar cosmic radiation*) e da GCR (*galactic cosmic radiation*), 99,9% das tripulações não ultrapassariam doses entre 2,31 a 2,73 mSv/ano. A análise conclui demonstrando que os indivíduos se encontram na classificação de “ocupacionalmente expostos” (ultrapassando o limite de 1 mSv/ano), porém, apresentam apenas exposições correspondentes a aproximadamente 15% do limite anual permitido legalmente (20 mSv/ano).

O gráfico 9 ilustra a zona de delimitação da dose anual efetiva de 1 mSv, em função do tempo e da altitude de voo, para demonstrar se o indivíduo classifica-se ou não em “exposto a radiação cósmica”, contendo dados de valores médios fornecidos pela autoridade de aviação civil alemã (*Luftfahrt-Bundesamt*).

Gráfico 9 – Delimitação da zona de dose de radiação efetiva anual de 1 mSv - (EAN, 2012)



Fonte: Adaptação do Autor (2019).

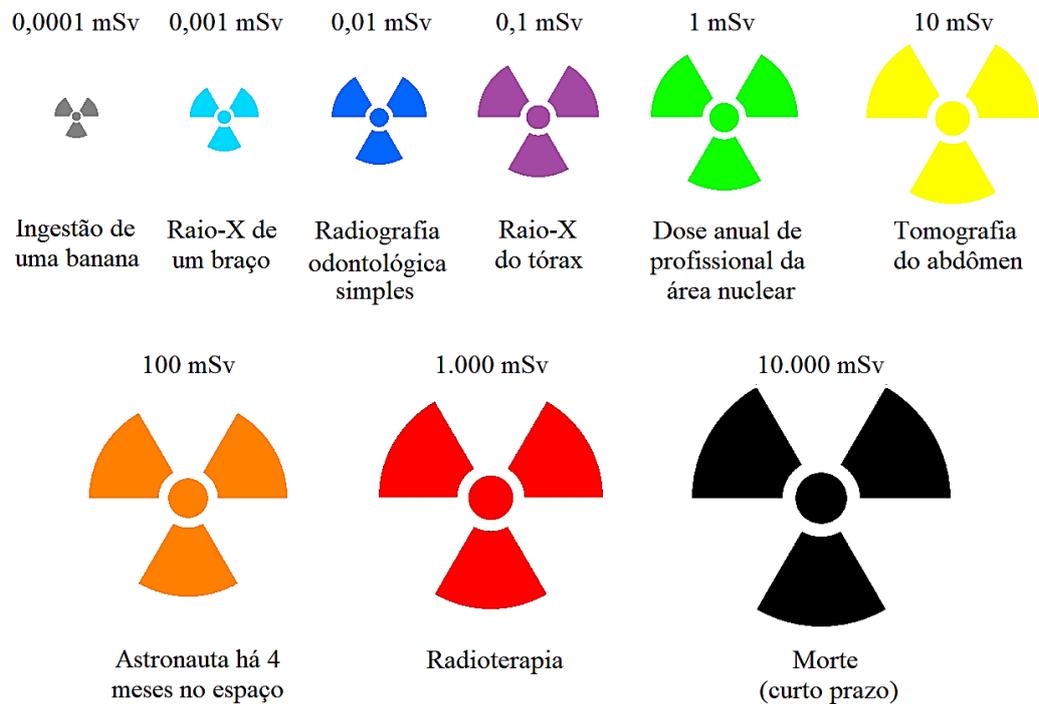
Pode-se observar que para voos realizados em altitudes de até de 6000 m (19000 ft¹⁸), torna-se necessário exceder a quantidade de 770 horas de voo no ano, para ultrapassar a zona de profissional ocupacionalmente exposto (doses superiores a 1 mSv/ano). E para voos operados em altitudes de 14000 m (45000 ft) ou acima, a realização de apenas 100 horas de voo no ano seria o suficiente para classificar o tripulante na zona de exposição ocupacional. (EAN, 2012).

Com a finalidade didática de aprimorar a compreensão das dimensões das doses radioativas apresentadas, a figura 11 demonstra diversas doses efetivas de radiações (referenciadas em mSv), com exemplificações em itens e práticas populares conhecidas, baseando-se em dados científicos aproximados da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e da *United Nations Environment Programme* (UNEP). (UNEP, 2016; CNEN, 2012).

Determinadas dosagens representadas na figura 11, como as de 1.000 mSv e 10.000 mSv, superam demasiadamente os níveis de radiações absorvidos pelos tripulantes em uma vida inteira na profissão, porém, são demonstrados para possibilitar a análise do dimensionamento e da significância das doses descritas neste capítulo.

¹⁸ Pé: unidade de medida de comprimento (comumente utilizado para representar altitudes na aviação), correspondente a 0,3048 metros. (MICHAELIS, 2015).

Figura 11 – Exemplo comparativo entre doses de radiações - (UNEP, 2016; CNEN, 2012)



Fonte: Elaboração do Autor (2019).

Portanto, ainda para fins de exemplificação das dimensões das doses radioativas, são demonstrados três exemplos comparativos (cálculos matematicamente lineares, sem a precisão da validade científica de variáveis):

- O nível da exposição radioativa de um voo entre Athens e New York (descrito na tabela 11 com cerca de 9,7 horas de operação) corresponde aproximadamente a mesma dosagem efetiva de 6 radiografias odontológicas simples;
- Um tripulante de companhias aéreas alemãs (considerando a exposição máxima de 7 mSv/ano registrada oficialmente e demonstrada na tabela 10), experiencia por ano o equivalente a 7 vezes a quantidade anual de radiação absorvida por um profissional da área nuclear;
- E para as tripulantes gestantes, a realização de apenas 15 voos entre as cidades de *Tokyo*, no Japão, e *New York*, nos Estados Unidos (correspondente a doses de cerca de 0.0696 mSv/voo), apresentam acúmulo de dosagens suficientes para exceder o limite anual estabelecido pela proteção legal de radioatividade ao feto (1 mSv/ano). (UNEP, 2016; CNEN, 2012).

Com base nos dados oficiais dos países apresentados e nas estimativas de doses recebidas por tripulantes brasileiros, o nível da exposição radioativa dos profissionais da área apresenta-se abaixo do limite anual legal previsto no Brasil e internacionalmente. Além disso, o risco de exceder o limitante com doses de radiações cósmicas demonstra-se baixo, para a tecnologia de *performance* das aeronaves presentes na aviação comercial regular atualmente. Há a possibilidade elevada de exceder o limite anual apenas nas condições de gravidez, porém, a mitigação deste risco já ocorre no Brasil por meio de Convenção Coletiva de Trabalho, através do afastamento temporário das tripulantes das escalas de voos, a partir do momento que ocorre a identificação da gestação até o fim desta condição, resguardados os direitos de licença-maternidade previstos na CLT (Consolidação das Leis do Trabalho). (SNA, 2019).

No entanto, os limites anuais das doses efetivas de radiações são estabelecidos por estudos científicos com públicos gerais, e sem a especificidade das variáveis agravantes à saúde presentes na profissão do aeronauta. As determinações dos limitantes baseiam-se em bioestatísticas observadas laboratorialmente em animais e em irradiações reais de grandes populações, como na ocasião de Hiroshima e Nagasaki, demonstrando a necessidade de maior precisão científica com o tema, e aprofundamento de pesquisas relacionadas a radiação cósmica na aviação comercial. Além de não existirem informações precisas sobre os efeitos associados em exposições a longo prazo. (ICRP, 2016; OKUNO, 2013).

Conforme demonstra a tabela 13, Friedberg e Copeland (2003) identificam que o risco de morte fatal por câncer proveniente da exposição à radiação cósmica ionizante é baixo, mesmo considerando quantidades de doses experienciadas por tripulantes atuando na profissão em um período inteiro de vida útil¹⁹.

Tabela 13 – Risco de morte fatal por câncer induzido pela radiação ionizante ocupacional.

(continua)

mSv	RISCO	mSv	RISCO	mSv	RISCO
2	1 em 13000 (0.008%)	20	1 em 1300 (0.08%)	120	1 em 210 (0.5%)
3	1 em 8300 (0.01%)	30	1 em 830 (0.1%)	140	1 em 180 (0.6%)
4	1 em 6300 (0.02%)	40	1 em 630 (0.2%)	160	1 em 160 (0.6%)
5	1 em 5000 (0.02%)	50	1 em 500 (0.2%)	180	1 em 140 (0.7%)

¹⁹ Período de faixa etária entre 20 e 64 anos de idade. (FRIEDBERG; COPELAND, 2003).

(conclusão)

mSv	RISCO	mSv	RISCO	mSv	RISCO
6	1 em 4200 (0.02%)	60	1 em 420 (0.2%)	200	1 em 130 (0.8%)
7	1 em 3600 (0.03%)	70	1 em 360 ⁽¹⁾ (0.3%)	225	1 em 110 (0.9%)
8	1 em 3100 (0.03%)	80	1 em 310 (0.3%)	250	1 em 100 (1.0%)
9	1 em 2800 (0.04%)	90	1 em 280 (0.4%)	275	1 em 91 (1.1%)
10	1 em 2500 (0.04%)	100	1 em 250 (0.4%)	300	1 em 83 (1.2%)

Fonte: Friedberg; Copeland (2003).

⁽¹⁾ Estima-se a morte de 1 indivíduo por câncer induzido pela exposição à radiação ionizante a cada 360 pessoas expostas a doses de 70 mSv.

Apesar dos riscos serem identificados como baixos, devem ser consideradas as suas mitigações, pois tratam-se de possíveis mortes de vidas humanas. A Declaração Universal dos Direitos Humanos prevê a proteção da vida sem distinções, através da constituição de leis internas nos países, evitando riscos desnecessários em conformidade com a possibilidade tecnológica existente. (ASSEMBLEIA GERAL DA ONU, 1948).

Além disso, segundo o Art. 24 da Constituição Federal, “Compete à União, aos Estados e ao Distrito Federal legislar concorrentemente sobre: [...] XII - previdência social, proteção e defesa da saúde; [...]”. Portanto, cabe em direito, instigar ao estado o questionamento da abstenção protetiva em tripulantes brasileiros e a necessidade da criação de devida proteção radiológica no setor, buscando no mínimo, a equiparação com as legislações já existentes em outros países, que possuem leis específicas à aviação para a obrigatoriedade do registro, controle e mitigação das doses radioativas individuais em tripulantes pelas companhias aéreas. (BRASIL, 1988, p. 29).

O controle e registro obrigatório das doses radioativas ocupacionais possibilitariam a mitigação do risco presente e futuro na aviação brasileira, que possui previsão de avanços tecnológicos com tendências de realizações de voos mais altos, provocando o aumento das doses de radiações experienciadas por tripulantes em voos comerciais. Além de fornecer diversos dados específicos do setor para possíveis gerações de estatísticas e pesquisas científicas de aprofundamento nos temas aqui apresentados (IATA, 2018).

Neste capítulo, foram analisadas a exposição à radiação cósmica e o risco ocupacional dos tripulantes de voos comerciais, além de apresentar características de programas computacionais internacionalmente utilizados nos procedimentos de registro, controle e

gerenciamento da radiação cósmica em tripulantes de voos comerciais. Foram demonstrados dados oficiais de exposições radioativas de aeronautas de diversos países e estimativas das doses recebidas pelos tripulantes brasileiros. Além de diversas análises comparativas das exposições e dos riscos associados a ocupação dos tripulantes, finalizando com a apresentação de justificativas e da realização da reflexão sobre a necessidade da criação de legislação específica para a proteção e controle da radiação cósmica no Brasil.

No próximo capítulo, são apresentadas as considerações finais deste trabalho, por parte do autor, realizando uma síntese dos principais pontos e ideias concluídas, finalizando a seção com sugestões para trabalhos futuros que possibilitem transcender as limitações da presente pesquisa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi de compreender os impactos da exposição dos tripulantes de voos comerciais à radiação cósmica, possibilitando a análise do risco ocupacional, com a finalidade de refletir sobre a necessidade do governo brasileiro criar legislações específicas, de obrigatoriedade do registro e controle das doses individuais dos tripulantes pelas companhias aéreas, para uma adequada proteção presente e futura da saúde a longo prazo dos aeronautas do país.

Para atingir este objetivo, foi adotada a pesquisa do tipo exploratória com abordagem qualitativa, proporcionando uma maior familiaridade com o objeto de estudo, ainda pouco conhecido. Foram realizadas construções de hipóteses, através do levantamento de informações já existentes, utilizando dos procedimentos de pesquisa bibliográfica e documental, com a apresentação e análise de exemplos que possibilitaram o estímulo da compreensão.

Obteve-se o embasamento teórico em bibliografias como livros, artigos e teses, com conteúdos gerais ou relacionados à temática da monográfica, como em Peruzzo (2012), Okuno (1982, 1988, 2013), Xavier *et al.* (2014) e Oliveira *et al.* (2016), em que foram extraídas diversas das conceituações físicas e biofísicas de construção basal para a compreensão do trabalho. E em Grieder (2001), Federico (2011), Bagshaw (2014) e Friedberg; Copeland (2003), que constituíram grande parte das fontes de conceituações relacionadas diretamente ao tema dos raios cósmicos. Além disso, houve o embasamento em documentos oficiais, de entidades nacionais e internacionais, para a obtenção de dados, tabelas estatísticas, relatórios científicos e legislações de proteções trabalhistas, com envolvimento na aviação civil, e os assuntos relacionados a radiação cósmica, como a Constituição Federal (BRASIL, 1988), e publicações como da *European Commission* (2004), *Federal Aviation Administration* (FAA, 2011), *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2006, 2012), *International Air Transport Association* (IATA, 2018), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2012, 2014) e da *International Commission on Radiological Protection* (ICRP, 2016).

O cumprimento do objetivo geral fora conseguido através do desenvolvimento sequencial e metódico dos objetivos específicos, organizados de modo a proporcionar o conteúdo basal sucinto necessário para a absorção e compreensão do objeto de estudo.

Em relação aos objetivos específicos:

a) Descrever o conceito e as características físicas básicas da radiação, foi possível demonstrar o conceito de funcionamento da radiação e descrever diversas características físicas

básicas deste fenômeno. De modo a proporcionar o conteúdo básico de física necessário para melhor compreender a radiação e o funcionamento dos raios cósmicos.

b) Identificar as propriedades físicas da radiação cósmica, os tipos de energias provenientes e as variáveis que influenciam a exposição a esta forma de radiação, foi possível desenvolver o conhecimento sobre as propriedades físicas da radiação cósmica e os tipos de energias e partículas que o fenômeno fornece, proporcionando a compreensão do que são, e como funcionam fisicamente os raios cósmicos. Além disso, ocorreu o aprofundamento do conhecimento sobre os fatores que causam a variabilidade da exposição, demonstrando que ocorrem variações das doses radioativas a partir da modificação das referências de altitude, latitude e longitude no planeta, assim como as principais explicações causais de suas alterações. Foram associados exemplos dos conceitos na prática da aviação, de modo a integrar a teoria ao aprendizado lógico.

c) Descrever os efeitos da radioatividade no organismo humano, pôde-se apresentar os efeitos biológicos de diversas doses absorvidas pelo organismo humano. Compreendeu-se as classificações das causas das radiações e os eventos necessários para que possivelmente venham a ocorrer determinadas patologias, assim como algumas das características dos seus desenvolvimentos. Determinadas dosagens descritas no capítulo fugiram das proporções previstas nas exposições dos tripulantes, porém, permitiram ampliar a interpretação das dimensões das doses recebidas em voos comerciais.

d) Descrever os possíveis efeitos da radiação cósmica nos tripulantes da aviação comercial, comparando e analisando a significância desta exposição a outras profissões, identificou-se possíveis efeitos em tripulantes, como aumentos isolados ao fator ocupacional nas probabilidades da ocorrência de câncer de mama, próstata, cérebro e pele, e da elevação do risco direto de câncer em até 0,3%, além de deformidades genéticas nas primeiras gerações descendentes de aeronautas com mais de 5 anos de profissão ativa. Foi compreendido que a exposição dos tripulantes de voos comerciais a radiações ionizantes, em média, corresponde a até 6 vezes mais a de determinadas profissões (consideradas ou não ocupacionalmente expostas), e superam os níveis de radiações experienciados por profissionais do ramo de energia nuclear.

e) Apresentar métodos atenuantes dos efeitos e da exposição à radiação cósmica, foram identificados alguns procedimentos a serem aplicados pelos tripulantes ou pelos operadores, para reduzir os possíveis efeitos da radiação cósmica, como: as companhias aéreas devem efetuar o controle contínuo e a avaliação da exposição individual dos colaboradores, organizar as escalas de voo de modo a evitar exposições individuais excessivas, manter os

tripulantes informados do seu nível de exposição anual com riscos associados, e aplicar proteção especial às tripulantes do sexo feminino, que se encontram em período de gestação; Os tripulantes devem fazer o registro das doses de radiações recebidas no trabalho e em ocasiões como a de exames radiológicos, buscar informações relacionadas ao tema Radiação Cósmica de forma autônoma, alimentar-se de forma equilibrada, e optar por escalas com voos em regiões e horários de menores exposições radioativas. Além disso, foram identificadas as legislações nacionais e internacionais que estabelecem os limites das doses radioativas no Brasil, Estados Unidos e União Europeia.

f) Analisar a exposição à radiação cósmica e o risco ocupacional dos tripulantes de voos comerciais, no intuito de questionar a necessidade da criação de legislação específica para a proteção e controle deste fenômeno no Brasil, foram identificados dados oficiais de diversos países e estimativas de pesquisas brasileiras sobre as doses que os tripulantes de voos comerciais estão expostos. Foi possível concluir que a exposição ocupacional dos aeronautas no Brasil é considerada baixa, e inferior a vários países da Europa, assim como o risco ocupacional induzido pela radiação cósmica ionizante. Porém, apesar do risco de vida a longo prazo dos tripulantes ter sido considerado baixo, concluiu-se que o mesmo demonstra significância suficiente para exigir o aprimoramento da legislação protetiva no setor aeronáutico brasileiro. Complementarmente, foram compreendidos os métodos utilizados pelas entidades para medir ou estimar as doses de radiações ionizantes em voos comerciais, e demonstrados os programas computacionais para calcular, de forma autônoma, determinadas dosagens de exposições.

Com o desenvolvimento de todos os objetivos específicos, tornou-se possível a resolução da problemática inicial da pesquisa: “O risco ocupacional dos tripulantes de voos comerciais no Brasil, no que se refere à exposição do organismo humano à radiação cósmica, é significativo ao ponto de exigir legislações específicas para o controle e proteção da saúde dos profissionais da classe?”

De acordo com os dados analisados nesta pesquisa, pode-se afirmar que o risco ocupacional atual dos tripulantes de voos comerciais no Brasil, referindo-se à exposição do organismo humano a radiação cósmica, é considerado baixo e significativo, no ponto de vista da proteção radiológica. A significância do risco experienciado pelos profissionais da classe justifica-se pelo fato de se tratarem de vidas humanas, além da falta de conhecimento científico preciso para determinar os efeitos das radiações a longo prazo, e do possível agravamento previsto nas doses ocupacionais dos próximos anos. Portanto, é necessária e legítima a exigência de legislações específicas para o controle e proteção da saúde dos aeronautas brasileiros.

Por fim, entende-se que a pesquisa atual se limita na interpretação de bibliografias e documentos existentes, que demonstram incertezas científicas para diversas análises sobre radiações, especialmente pela falta de dados e estudos de longo prazo, direcionados ao tema. São realizadas avaliações interpretativas limitadas, baseadas em dados reais ou estimados (para os tripulantes brasileiros), com poucas informações oficiais e sem alta precisão acadêmica.

Com base nos resultados, sugerem-se estudos para o aperfeiçoamento dos métodos mitigatórios e das medições de doses radioativas ocupacionais em tripulações brasileiras. O registro e gerenciamento das doses ocupacionais em tripulantes pelas companhias aéreas, possibilita dados oficiais de infindáveis aplicações à ciência, de benefício direto aos indivíduos afetados e indireto ao sistema de aviação civil. Recomenda-se também, pesquisas para a identificação mais precisa dos possíveis danos causados pela radiação de baixas doses de exposição, e estudos sobre o aumento previsto da exposição ocupacional no setor aeronáutico, devido ao aprimoramento da *performance* das aeronaves, na tentativa de demonstrar a real representatividade deste tema no futuro.

REFERÊNCIAS

ASSEMBLEIA GERAL DA ONU. **Declaração Universal dos Direitos Humanos**. Paris: ONU, 1948. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2018/10/DUDH.pdf>. Acesso em: 23 out. 2019.

BAGSHAW, Michael. **Cosmic Radiation in Commercial Aviation**. London: King's College London, 2014.

BARTLETT, D.T. Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 109, n. 4, p. 349–355, jul. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch311>. Acesso em: 14 ago. 2019.

BARROS, Henrique Lins de. **Santos-Dumont e a invenção do voo**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar ed., 2003.

BERT, Paul. **Barometric pressure: Researches in Experimental Physiology**. Columbus, OH: College Book Company, 1943.

BRASIL. Decreto nº 21.713 de 27 de agosto de 1946. **Promulga a Convenção sobre Aviação Civil Internacional, concluída em Chicago a 7 de dezembro de 1944 e firmado pelo Brasil, em Washington, a 29 de maio de 1945**. Rio de Janeiro: Presidência da República, 1946. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/D21713.htm. Acesso em: 07 ago. 2019.

BRASIL. Lei nº 3.807 de 26 de agosto de 1960. **Dispõe sobre a Lei Orgânica da Previdência Social**. Brasília: Presidência da República, 1960. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L3807.htm. Acesso em: 07 ago. 2019.

BRASIL. Lei nº 7.183, de 5 de abril de 1984. **Regula o exercício da profissão de aeronauta e dá outras providências**. Brasília: Presidência da República, 1984. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L7183.htm. Acesso em: 07 ago. 2019.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 13.475 de 28 de agosto de 2017. **Dispõe sobre o exercício da profissão de tripulante de aeronave, denominado aeronauta; e revoga a Lei nº 7.183, de 5 de abril de 1984**. Brasília: Presidência da República, 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13475.htm#art81i. Acesso em: 07 ago. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Projeto estuda radiação e seus efeitos na aviação**. 2017. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/noticias/2014/projeto-estuda-radiacao-e-seus-efeitos-na-aviacao>. Acesso em: 20 out. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Idealização e Evolução do SCSO**. 2018a. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/gerenciamento-da-seguranca-operacional/idealizacao-e-evolucao-do-sgso>. Acesso em: 25 ago. 2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Normas Regulamentadoras de Segurança e Medicina do Trabalho**. NR 15 - Atividades e Operações Insalubres. 2018b. Disponível em: https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-15.pdf. Acesso em: 16 ago. 2019.

BRAUER, Roger L. **Safety and Health for Engineers**. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

BREISKY, Bill. Space & Cosmos: On Its Centenary, Celebrating a Ride That Advanced Physics. **The New York Times**. New York, p. D4, ago. 2012. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2012/08/07/science/space/when-victor-hess-discovered-cosmic-rays-in-a-hydrogen-balloon.html>. Acesso em: 05 set. 2019.

CASAGRANDE, Vinicius. **Aviões: Histórias e Curiosidades Das Aeronaves Comerciais**. Brasil: Europa, 2010.

CHANG, Raymond. **Química Geral: Conceitos essenciais**. 4. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda., 2010.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **CNEN-NN-3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Brasília: CNEN, 2014.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Quadro de Doses de Radiação**. 2012 Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/quadro-radiacao.pdf>. Acesso em: 21 out. 2019.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION (CEU). **Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996: laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation**. EU: Official Journal of the European Communities, 1996. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A31996L0029>. Acesso em: 20 out. 2019.

CROUCH, Tom D. **Asas**. Tradução de Antônio Braga e Alexandre Martins. Rio de Janeiro: Record, 2008.

DE SÁ, Lidia Vasconcellos. Princípios Básicos das Radiações Ionizantes. In: Simpósio sobre Exposição Ocupacional a Radiações Ionizantes no Brasil. 1., 2019. São Paulo, **Anais...** São Paulo: Fundacentro, 2019.

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

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>. Acesso em: 19 out. 2019.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Radiation Protection 140: Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew.** Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004.

ENCYCLOPEDIA AMERICANA. **Atmosphere:** international edition, v. 2. Danbury: Grolier, 1989.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth - Final Report.** Oklahoma City: Civil Aerospace Medical Institute, 2011.

FEDERICO, Claudio Antonio. **Dosimetria da radiação cósmica no interior de aeronaves no espaço aéreo brasileiro.** 2011. 172 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica.** Fortaleza: UEC, 2002.

FRAUENFELDER, Hans; HENLEY, Ernest M. **Subatomic Physics.** New Jersey: Prentice-Hall, 1974.

FRIEDBERG, W. et al. Radiation exposure of aircrews. **Occupational Medicine: state of the art reviews.** v. 17, n. 2, p. 292-309, 2002.

FRIEDBERG, W.; COPELAND, K. **What aircrews should know about their occupational exposure to ionizing radiation.** Oklahoma City: Civil Aerospace Medical Institute, 2003.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GRIEDER, Peter K. F. **Cosmic rays at Earth: researcher's reference manual and data book.** 1st. ed. Amsterdam: Elsevier, 2001.

HALL, Eric J. **"Radiobiology for the Radiologist".** 5th. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2000.

HARTMANN, G. A. **A Anomalia Magnética do Atlântico Sul: Causas e Efeitos.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HARTMANN, Gelvam A.; PACCA, Igor G. Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly. In: **Anais da Academia Brasileira de Ciências.** São Paulo: Ed. USP, 2009. p. 243-255. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652009000200010&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 20 set. 2019.

HEILBRON FILHO, Paulo F. L. et al. **A Simple Model to Estimate Radiation Doses to Aircrew During Air Flights in Brazil and Abroad.** Rio de Janeiro: PUC, 2012.

HEWITT, Paul G. **Física Conceitual.** 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. Disponível em: <https://www.fisica.net/ebooks/fisicageral/Fisica-Conceitual-Nona-Conceitual-Paul-Hewitt.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2019.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **IATA Forecast Predicts 8.2 billion Air Travelers in 2037**. 2018. Disponível em: <https://www.iata.org/pressroom/pr/Documents/2018-10-24-02-pt.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2019.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEOMAGNETISM AND AERONOMY (IGRF). **International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation**. v. 183, n. 3, p. 1216-1230. *Geophys. J. Int.*, 2010.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Safety Management Manual (SMM): Doc 9859**. Montreal: ICAO, 2006.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Manual of Civil Aviation Medicine**. 3rd ed. Montreal: ICAO, 2012. Disponível em: https://www.icao.int/publications/Documents/8984_cons_en.pdf. Acesso em: 15 out. 2019.

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

INSTITUTO DE FÍSICA UFRGS. **Radiação**. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aularad.htm>. Acesso em: 27 ago. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircrafts - Part 1: conceptual basis for measurements**. Geneva: ISO, 2006.

MICHAELIS. **Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos, 2015. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues>. Acesso em: 20 set. 2019.

MININI, Andrea. **Il campo magnetico terrestre**. Disponível em: <http://www.andreaminini.org/scienza/campo-magnetico-terrestre>. Acesso em: 17 set. 2019.

NASA. U. S. **Standard Atmosphere**. Washington: U. S. Government Printing Office, 1976.

NASA. **NASA'S SDO Mission to Improve Predictions of Violent Space Weather**. 2008. Disponível em: https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2008/sdo_overview.html. Acesso em: 17 set. 2019.

OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê Luiz; CHOW, Cecil. **Física para ciências biológicas biomédicas**. São Paulo: Harper & How do Brasil, 1982.

OKUNO, Emico. **Radiação: efeitos, riscos e benefícios**. São Paulo: Harbra, 1988.

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

OKUNO, Emico. **Efeitos biológicos das radiações ionizantes:** acidente radiológico de Goiânia. *Estud. av.*, São Paulo, v. 27, n. 77, p. 185-200, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142013000100014&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 27 ago. 2019.

OLIVEIRA, Jarbas Rodrigues. et al. **Biofísica:** para ciências biomédicas. 4. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2016. 299p.

PERUZZO, Jucimar. **Armas Nucleares:** origem, estrutura, funcionamento, evolução e controle. Irani: 2012. 224 p.

PERUZZO, Jucimar. **Física Quântica:** Conceitos e aplicações. Irani: 2014. 382 p.

SILVA, Roberto R.; TOLENTINO, Mario. **A atmosfera Terrestre.** 2. ed. São Paulo: Moderna, 2004.

SINDICATO NACIONAL DOS AERONAUTAS (SNA). **Convenção Coletiva de Trabalho da Aviação Regular – 2018/2019.** 2019. Disponível em: <https://www.aeronautas.org.br/62-leis-e-documentos/8151-conven%C3%A7%C3%A3o-coletiva-de-trabalho-da-avia%C3%A7%C3%A3o-regular-%E2%80%93-2018-2019.html>. Acesso em: 22 out. 2019.

SMART, D. F.; SHEA, M. A. **Solar radiation.** In: *Encyclopedia of applied physics*, v. 18. p. 393-429. New York: VCH Publishers, 1997.

THURSTON, David B. **The World's Most Significant and Magnificent Aircraft:** Evolution of the Modern Airplane. SAE International, 2000.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Radiação:** Efeitos e Fontes. UNEP, 2016. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/Radiation_Effects_and_sources-2016Radiation_-_Effects_and_Sources_PT.pdg.pdf?sequence=13&isAllowed=y. Acesso em: 21 out. 2019.

USNRC. Technical Training Center. **Nuclear Power for Electrical Generation:** Reactor concepts manual. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2012. Disponível em: <https://www.tayloredge.com/periodic/trivia/ReactorConcepts.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2019.

WILSON, John Graham. **Cosmic rays.** London: Wykeham, 1976.

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