

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

JOSELINO DOS SANTOS SOUSA

DOSIMETRIA DE RADIAÇÕES IONIZANTES EM VOOS NACIONAIS E
INTERNACIONAIS DE LONGA DURAÇÃO

UBERLÂNDIA
2025

JOSELINO DOS SANTOS SOUSA

**DOSIMETRIA DE RADIAÇÕES IONIZANTES EM VOOS NACIONAIS E
INTERNACIONAIS DE LONGA DURAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Tecnologias em Radiações, Imagens Médicas e Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. William de Souza Santos

UBERLÂNDIA

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S725 2025	Sousa, Joselino dos Santos, 1991- Dosimetria de radiações ionizantes em voos nacionais e internacionais de longa duração [recurso eletrônico] / Joselino dos Santos Sousa. - 2025. Orientador: William de Souza Santos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Biomédica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.162 Inclui bibliografia. 1. Engenharia biomédica. I. Santos, William de Souza, 1979-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Biomédica. III. Título. CDU: 62:61
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Biomédica

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N, Sala 115 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG,
CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4761 - www.ppgeb.feelt.ufu.br - ppegb@feelt.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Biomédica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 118, PPGEB				
Data:	quatro de março de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	17:00	Hora de encerramento:	18:30
Matrícula do Discente:	12312EB1004				
Nome do Discente:	Joselino dos Santos Sousa				
Título do Trabalho:	Dosimetria de radiações ionizantes em voos nacionais e internacionais de longa duração				
Área de concentração:	Engenharia Biomédica				
Linha de pesquisa:	Tecnologias em Radiações, Imagens Médicas e Biológicas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Cálculo de dose fetal e pediátrica em radioterapia com fóton e próton: uso do método Monte Carlo				

Reuniu-se via plataforma Google Meet, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, assim composta: Doutores: Matheus Carvalho Alves - UFS; Lucas Wilian Gonçalves de Souza - IFTM; William de Souza Santos - PPGEB/UFU e DFI/UFS, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. William de Souza Santos, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Matheus Carvalho Alves, Usuário Externo**, em 06/03/2025, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Willian Gonçalves de Souza, Usuário Externo**, em 06/03/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **William de Souza Santos, Membro de Colegiado**, em 06/03/2025, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6138517** e o código CRC **352C0794**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, por ser a minha fonte de força e inspiração em todos os momentos.

À minha família, pelo amor incondicional e pelo apoio constante em cada etapa da minha jornada, bem como meus amigos que considero parte dela.

Dedico também a todos os professores, colegas que estiveram ao meu lado, compartilhando desafios, aprendizados e conquistas. Que este trabalho seja uma expressão de gratidão e perseverança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder forças, resistência e sabedoria para superar mais uma etapa nos meus estudos.

À minha família, pelo apoio incondicional ao longo do curso, com destaque para minha avó Alucinda, cuja força e dedicação sempre me inspiraram a persistir e vencer os desafios.

Aos grandes companheiros Leidiane e José Willia, pela amizade, carinho, companheirismo e por estarem ao meu lado, oferecendo apoio e momentos de alegria.

Aos amigos mais próximos e colegas. Agradeço ao professor orientador William por sua orientação dedicada, paciência e incentivo ao longo de todo o processo. Sua expertise e disponibilidade foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo não apenas para o crescimento acadêmico, mas também para o meu amadurecimento pessoal.

Aos professores da Universidade Federal de Uberlândia– UFU, em especial à tutora Mariana Freitas, que se dedicou incansavelmente para ajudar na realização deste sonho.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta pesquisa, registro aqui minha profunda gratidão.

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, por meio da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 309675/2021-9, William de Souza Santos) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde (INCT/INAIS), vinculado ao projeto CNPq (Processo 406303/2022-3). Esse suporte foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa, permitindo avanços significativos na área e contribuindo para a inovação científica e tecnológica.

***“Às vezes, as pessoas que ninguém imagina que podem fazer algo são as que fazem coisas
que ninguém imagina.” Alan Turing***

RESUMO

No mundo contemporâneo, a crescente globalização tem intensificado o aumento de tripulantes na aviação. Nesse contexto, a exposição da tripulação aérea à radiação cósmica tornou-se uma preocupação relevante. O estudo das doses de radiação recebidas por esses profissionais é essencial para garantir sua segurança e embasar regulamentações adequadas. A pesquisa comparou as doses de radiação cósmica recebidas por tripulações aéreas usando os softwares EXPACS e IRSN. Os resultados mostraram semelhança entre os programas, com algumas discrepâncias em rotas específicas. Entre as rotas nacionais, Florianópolis – Rio Branco e Natal – Rio Branco apresentaram as maiores doses (até 0,012 mSv). Já nas internacionais, os voos Teresina – Nova Hong Kong (0,089 mSv) e Guarulhos – Tóquio (0,052 mSv) tiveram os maiores valores, influenciados pelo tempo de voo e altitude. Nenhuma rota excedeu o limite de 20 mSv em cinco anos, mas algumas atingiram até 10,25 mSv nesse período. A dose Hp(10) foi superior à dose efetiva (E), como esperado. A pesquisa reforça a necessidade de proteção radiológica para tripulações aéreas e a importância da legislação para limitar a exposição.

Palavras-chave: Radiação Cósmica. Dosimetria. Tripulação.

ABSTRACT

In the contemporary world, increasing globalization has intensified the growth of aviation crew members. In this context, the exposure of aircrew to cosmic radiation has become a relevant concern. The study of radiation doses received by these professionals is essential to ensure their safety and support appropriate regulations. The research compared the cosmic radiation doses received by aircrew using the EXPACS and IRSN software. The results showed similarity between the programs, with some discrepancies on specific routes. Among domestic routes, Florianópolis – Rio Branco and Natal – Rio Branco had the highest doses (up to 0.012 mSv). Among international routes, the flights Teresina – Hong Kong (0.089 mSv) and Guarulhos – Tokyo (0.052 mSv) showed the highest values, influenced by flight time and altitude. No route exceeded the limit of 20 mSv in five years, but some reached up to 10.25 mSv within this period. The Hp(10) dose was higher than the effective dose (E), as expected. The research reinforces the need for radiological protection for aircrew and the importance of legislation to limit exposure.

Keywords: Cosmic Radiation. Dosimetry. Crew.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Amas e níveis de radiação pela Mir.....	15
Figura 2	Comparação entre a função descontínua e a função contínua.....	29
Figura 3	Traçamento de rotas no Google My Maps.....	33
Figura 4	Programa EXPACs.....	36
Figura 5	Programa SIEVERT PN.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Limites de dose anuais para diferentes órgãos.....	17
Tabela 2	Comparativo de efeitos determinísticos e efeito estocástico.....	23
Tabela 3	Síndrome Aguda da Radiação e Sintomas por dose absorvida.....	25
Tabela 4	Associações entre o carcinoma e tipo da radiação.....	26
Tabela 5	Os fatores de ponderação das radiações, ICRP 103.....	29
Tabela 6	Os fatores de ponderação dos tecidos, w_T	31
Tabela 7	Simulações dos voos e companhias aéreas.....	35
Tabela 8	Comparação entre o EXPACS e o IRSN.....	40
Tabela 9	Dose efetiva e corporal anual e quinquenal.....	42
Tabela 10	Dose efetiva e corporal anual e quinquenal em viagens interestaduais.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMAS - Anomalia Magnética do Atlântico Sul

ANAC - Agência Nacional da Aviação Civil

ANSN - Agência Nacional de Segurança Nuclear

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

D_T - Dose absorvida no órgão T

E - Dose efetiva

EXPACS - *Excel based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum*

Gy - Gray

H - Dose equivalente

$H_p(10)$ - Equivalente de dose pessoal

H_T - Dose equivalente no órgão T

IARC - *International Agency for Research on Cancer*

ICRP - Comissão Internacional em Proteção Radiológica

ICRU - *International Commission on Radiation Units and Measurements*

IEN - Instituto de Engenharia Nuclear

INCA - Instituto Nacional do Câncer

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

IRSN - *Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire*

IXRPC - Comitê Internacional de Proteção de Raios X e Rádio

KERMA - *Kinetic Energy Released per unit of Mass*

RCG - Radiação Cósmica Galáctica

RCS - Radiação Cósmica Solar

SISERI - *Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants*,

SNC - Sistema Nervoso Central

W_R = Fator de ponderação da radiação

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	13
INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contexto histórico e descoberta da radiação.....	13
1.2 A exposição pela radiação cósmica.....	14
1.3 Exposição à radiação na aviação civil.....	16
1.4 O problema.....	19
1.5 Organização da dissertação.....	19
1.6 Objetivos.....	21
<i>1.6.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>21</i>
<i>1.6.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>21</i>
CAPÍTULO 2.....	22
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 Radiações.....	22
<i>2.1.1 Radiações ionizantes e os efeitos biológicos.....</i>	<i>22</i>
<i>2.1.2 Fisiopatologias da exposição e contaminação por radiação.....</i>	<i>24</i>
2.2 Grandezas, unidades e dosimetria das radiações.....	26
<i>2.2.1 Kerma no ar.....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2 Dose absorvida.....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.3 Dose equivalente.....</i>	<i>28</i>
<i>2.2.4 Dose efetiva.....</i>	<i>30</i>
<i>2.2.5 Equivalente de dose pessoal.....</i>	<i>31</i>
CAPÍTULO 3.....	33
MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 Coleta de coordenadas e ajustes de tempo.....	34
3.2 Perfis de Voo Considerados.....	34
3.3 Metodologia de avaliação da exposição à radiação cósmica.....	36
3.4 Estimativa da dose anual.....	37
3.5 Comparação com dados internacionais.....	38
CAPÍTULO 4.....	40
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 Comparação geral entre EXPACS e IRSN.....	41
4.2 Comparações de Dose Efetiva (E) e Hp(10).....	43
CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS.....	46
ANEXOS.....	50

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto histórico e descoberta da radiação

A radiação é objeto de estudo em diversas áreas das ciências. Sua aplicação é amplamente utilizada em todo o mundo e abrange várias dimensões da vida humana, como na medicina, através do diagnóstico por imagem e no tratamento de doenças e radioterapia (REED, 2011); na agricultura, com o controle de pragas (BAUR et al., 2024), a esterilização de alimentos e o monitoramento da poluição (ALEXANDRE, FARIA E CARDOSO, 2008), além de ser essencial em pesquisas científicas, como na datação por carbono-14 (RIBEIRO, 2015).

O termo radiação é muito geral. O dicionário da Língua Portuguesa (1994) descreve a radiação como energia que propaga de um ponto a outro, no espaço na forma de onda ou partícula. Estamos continuamente expostos à radiação, como raios ultravioleta e radiofrequência (CHRISTOVAM, 2013).

A descoberta da radiação remonta ao século XIX, com contribuições de vários cientistas ao longo do tempo. Um dos marcos importantes foi o trabalho do físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923), que levou à descoberta dos raios X. Enquanto realizava experimentos com raios catódicos em um tubo de Crookes, em 1895, Röntgen percebeu que uma tela coberta com platinocianeto de bário brilhava misteriosamente. Em um momento inesperado, ao aproximar acidentalmente sua mão do tubo, ele notou que os ossos de sua mão eram projetados como uma sombra sobre a tela fluorescente. Sem entender completamente o fenômeno, ele o chamou de "raios X" (XAVIER et al., 2007).

Após a constatação dos raios X, em 1895 Röntgen compartilhou sua descoberta com a comunidade científica francesa da época, que até 1896 já haviam produzido mais de mil artigos sobre os raios X. Diversos pesquisadores como Nordon, Moreau, Benoist, Hurmuzescu e Charles Henry realizaram experimentos para entender melhor essas radiações. Poincaré deduziu que os raios X estavam ligados aos materiais fosforescentes ao serem excitados por luz, mesmo sem o uso de raios catódicos ou tubo de Crookes. Henry testou a hipótese de Poincaré, demonstrando que o sulfeto de zinco, quando excitado por luz, aumentava a intensidade dos raios X e que era possível obter radiografias sem o uso de tubos. Gaston Niewenglowski confirmou os resultados, utilizando sulfeto de cálcio (MARTINS, 2004).

O ano de 1896 foi marcado pela descoberta de uma fonte natural de radiação por Antoine-Henri Becquerel, enquanto ele investigava a fosforescência. Becquerel pertencia a uma família de

quatro gerações de renomados físicos. Após a divulgação da descoberta de Röntgen, surgiu o interesse em pesquisar se substâncias fosforescentes ou fluorescentes emitiam raios X. Com experimentos utilizando urânio, Becquerel concluiu que a radiação penetrante era originária do próprio elemento e não tinha relação com a fluorescência (XAVIER et al., 2007).

Marie Curie e Pierre Currie se interessaram pelo trabalho de Becquerel, desde então passaram a pesquisar sobre a origem das radiações no minério de Urânio, concluindo que “sua intensidade era proporcional à quantidade de urânio presente na substância, não dependendo da combinação química, da fase de agregação, nem das condições exteriores” (XAVIER et al., 2007, p.84). Para além disso, descobriram que o urânio não era o único elemento que apresentava essa propriedade, dando origem aos estudos do fenômeno da radioatividade (XAVIER et al., 2007).

Através de um eletrômetro desenvolvido pelo alemão Theodore Wulf foi possível estudar as radiações ionizantes do solo e em experiências em altitudes elevadas. Victor Hess pesquisador do Instituto de Rádio em Viena, aprimorou o estudo Wulf, entre 1911 e 1913 o pesquisador subiu em balões e descobriu que a radiação inicialmente diminuía com a altitude, mas depois aumentava rapidamente. Ele concluiu que uma radiação de alta penetração vinha do espaço, mais tarde passara a ser chamada de radiação cósmica (COPELAND, 2014).

1.2 A exposição pela radiação cósmica

O planeta Terra é continuamente exposto a partículas de alta energia oriundas do Sol, das galáxias e de outras estrelas. Esses tipos de radiações são denominados de radiação cósmica, um tipo de radiação ionizante composta de partículas de alta energia, principalmente núcleos atômicos provenientes do espaço e do Sol. Essas partículas interagem com a atmosfera e outras matérias que podem gerar um conjunto de partículas secundárias (RUAS, 2017).

As partículas também são afetadas pelo campo magnético do vento solar, um plasma de elétrons e prótons e pelo campo magnético da Terra. As partículas que compõem a Radiação Cósmica Galáctica (RCG) é originada fora do sistema solar, e, a Radiação Cósmica Solar (RCS) oriunda do sol. A RCG e a RCS interagem com os constituintes atômicos da atmosfera da Terra, produzindo uma cascata de interações e produtos de reações secundárias, que contribuem para a exposição à radiação (FEDERICO, 2011).

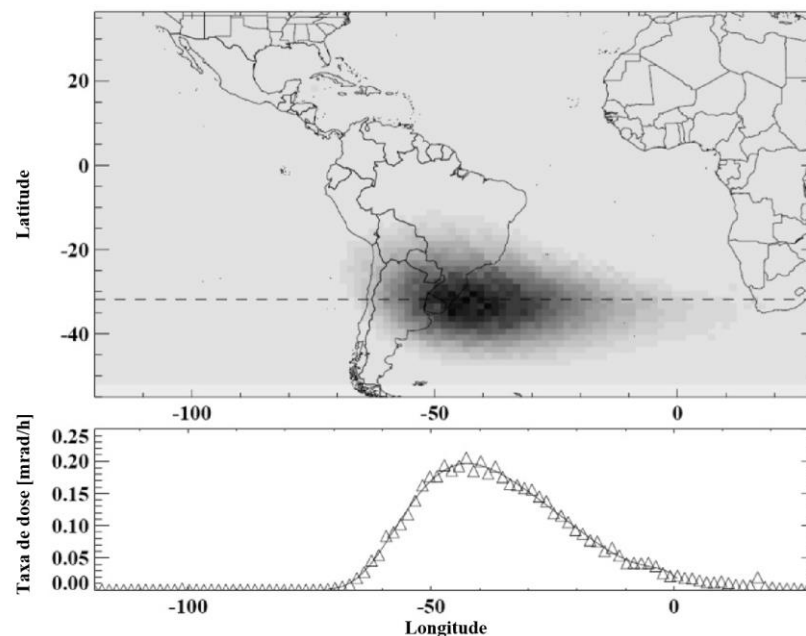
O vento solar varia durante um ciclo solar de 11 anos e causa variações no campo magnético perto da órbita da Terra. A RCG é máxima quando a atividade solar é mínima e é mínima quando a atividade do Sol é maior, que geralmente é representado por quantidade maior de manchas solares, explosões e ejeção de massa coronal (OLIVEIRA et al., 2014).

Além do campo magnético do vento solar, o percurso das partículas de radiação cósmica é afetado quando as partículas cruzam o campo magnético da Terra, que atua como um escudo parcial contra partículas carregadas. Perto do equador, onde o campo geomagnético é quase paralelo ao solo, a quantidade de partículas que atingem altitudes menores é menor, pois o efeito da blindagem magnética é maior (SERPOLLA, 2023).

Devido às diferenças entre os eixos magnético e de rotação da Terra, existe uma região centrada no Atlântico Sul que possui baixas intensidades de campo magnético terrestre, cujas linhas de campo magnético se aproximam da crosta terrestre fazendo com que a radiação cósmica penetre altitude mais baixa, chegando no nível de voos das aeronaves, podendo aumentar a exposição dos passageiros e da tripulação (FEDERICO, 2010).

Esse fenômeno geofísico é denominado de Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), que segundo Federico atinge grande parte do território brasileiro, sendo mais atuante na costa sudeste que está localizada na proximidade central da AMAS. Além disso, a AMAS abrange grande parte da América do Sul e, ao longo tempo, deve aumentar em mais da metade do hemisfério Sul, aumentando as regiões próximas da crosta terrestre atingidas pela radiação cósmica (FEDERICO, 2010). A **Figura 1** apresentada a seguir, ilustra a área de menor intensidade do campo magnético:

Figura 1 – AMAS e níveis de radiação pela Mir



Fonte: Adaptada de Tylka et al., 1997, apud White, 2009, p. 9.

Conforme observado na **Figura 1** os níveis elevados de radiação de prótons medidos pela estação espacial russa Mir em 1996, a aproximadamente 325 km de altitude. A figura destaca a localização e a intensidade da AMAS (região mais escura), cujo pico da taxa de dose foi de

aproximadamente 0,20 mrad/h (ou 0,002 mSv/h). A anomalia é observada em torno de -43° de longitude e -32° de latitude, deslocando-se para oeste a uma taxa de $0,27^\circ$ por ano (TYLKA et al., 1997, apud WHITE, 2009, p. 9).

1.3 Exposição à radiação na aviação civil

A exposição à radiação cósmica em voos de aviação civil tem despertado uma atenção crescente devido aos potenciais impactos na saúde dos tripulantes e passageiros que frequentemente cruzam altitudes elevadas. Esses tipos de radiações ionizantes são compostos de partículas de alta energia, principalmente núcleos atômicos provenientes do espaço e do Sol. Essas partículas interagem com a atmosfera e outras matérias que podem gerar um conjunto de partículas secundárias (RUAS, 2017).

A radiação cósmica é composta por diversos tipos de partículas carregadas, como prótons, elétrons e até mesmo íons pesados, que atravessam a atmosfera terrestre em altitudes de cruzeiro, limite no qual os aviões comerciais se estabelecem na maior parte dos voos. A intensidade dessa radiação varia significativamente com a altitude, latitude geográfica, ciclo solar e até mesmo a rota específica do voo, o que torna essencial entender os padrões de exposição e seus potenciais efeitos à saúde (PAZIANOTTO, 2015).

O campo de radiação cósmica nas aeronaves é modulado pela altitude, latitude geomagnética, longitude e pelo ciclo solar. Em altitudes de voo da aviação civil, na região do equador, os elétrons, pósitrons e nêutrons, seguidos pelos prótons, são as partículas que mais contribuem para o aumento na dose de radiação. No entanto, em latitudes maiores, a contribuição de nêutrons na dose é maior, enquanto para altitudes maiores, os núcleos mais pesados que prótons (por exemplo, Fe) começam a contribuir. Esse cenário de exposição existente é vivenciado por milhões de passageiros que viajam ocasionalmente ou com mais frequência por motivos pessoais ou profissionais e pela tripulação de aeronaves, que representa uma categoria ocupacional altamente exposta (PAZIANOTTO, 2015).

Durante o processo de embarcação aérea os passageiros e a tripulação devem passar pelo controle de segurança do aeroporto. Nesse processo, a radiação pode desempenhar um papel importante, sendo usada para rastrear a bagagem de mão e, em alguns casos, usa-se radiação X para encontrar objetos escondidos por baixo das vestimentas e nas partes internas do corpo dos indivíduos. Além da radiação X, após a decolagem, quando a aeronave sobe para altitude de cruzeiro, os passageiros e a tripulação ficam expostos à radiação cósmica, que aumenta à medida que a aeronave sobe. Na altitude típica de cruzeiro (> 10.000 m), a taxa de dose pode atingir mais de 150 vezes a exposição à radiação cósmica ao nível do mar. No uso futuro de novos jatos que

voam em altitudes maiores e por períodos mais longos, estima-se que aumente a dose entre 30 e 50% em comparação com as atuais práticas de voo (UNSCEAR, 2008).

Segundo Pazianotto (2015) para a população em geral recomendável não ultrapassar 1 mSv. No entanto esse limite é facilmente alcançado pelas tripulações de aeronaves que voam em grandes altitudes por mais de 600 horas ao ano.

A Comissão Internacional em Proteção Radiológica (ICRP) faz recomendações sobre o controle da exposição à radiação cósmica na aviação. Nessa publicação (ICRP Publication 132), além da tripulação das aeronaves, chama-se atenção para ampliação das discussões a exposição de grupo de passageiros, que por razões pessoais ou profissionais fazem voos frequentes. Outro fator que a ICRP destaca é a elevada proporção de tripulantes de mulheres na cabine de aeronaves e, nesse sentido, chama a atenção o tema da exposição de mulheres grávidas. A ICRP recomenda uma abordagem consistente para todas as situações de exposição à radiação, de modo a otimizar as exposições à radiação e mantê-las tão baixas quanto razoavelmente possível. Em voos de alta altitude, especialmente em rotas de voo polares, onde a rigidez geomagnética é menor, a tripulação é submetida a níveis consideráveis de radiação cósmica (ICRP, 2016).

No Brasil, os limites de dose para trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação são estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) na Norma CNEN NN 3.01 (CNEN, 2014), cujos valores estão apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Limites de dose anuais para diferentes órgãos.

Limites de Dose Anuais ^[a]			
Grandeza	órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv ^[b]	1 mSv ^[c]
	Cristalino	20 mSv ^[b]	15 mSv
Dose equivalente	Pele ^[d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

Fonte: CNEN, 2014.

[a] Para fins de controle administrativo efetuado pela CNEN, o termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano. [b] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano. [c] Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano. [d] Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada. Os valores de dose efetiva se aplicam à soma das doses efetivas, causadas por exposições externas, com as doses efetivas comprometidas (integradas em 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para crianças), causadas por incorporações ocorridas no mesmo ano (CNEN, 2014).

Conforme a **Tabela 1** os limites de dose para exposição à radiação ionizante, definidos pela CNEN, variam conforme a categoria de exposição. Para trabalhadores ocupacionalmente expostos, a dose efetiva anual é limitada a 20 mSv, considerando a média em 5 anos, com um máximo de 50 mSv em um único ano. A dose equivalente para cristalino, pele e extremidades apresenta valores mais altos para trabalhadores, refletindo diferentes níveis de risco e proteção. “No Brasil, o limite anual de dose equivalente no cristalino foi reduzido de 150 mSv para 20 mSv em 24 de agosto de 2011, atendendo ao Comunicado ‘*Statement on Tissue Reaction*’” da ICRP (FISCHER; MOREIRA; BACELAR, 2018, p.2). Para o público, os limites são mais restritivos, assegurando proteção ampliada em exposições incidentais.

Atualmente, a Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC) não tem regulamentações referentes à exposição à radiação cósmica da tripulação. No Brasil, apenas fontes de radiação construídas pelo homem estão sujeitas a regulamentações nacionais sobre a dose anual de radiação. No entanto “legislação trabalhista brasileira estipula compensações financeiras bem como aposentadoria especial e férias diferenciadas para trabalhadores que são expostos à radiação ionizante frequentemente (FEDERICO, et al, 2015)

Apesar de haver estudos epidemiológicos de tripulação que relatam uma redução da mortalidade de trabalhadores de aviação em detrimento do câncer, ela é atribuída ao bom estado de saúde da tripulação. Contudo, foram encontrados certos tipos de câncer com alta frequência, incluindo melanoma e câncer no cérebro. Além desse estudo, em várias publicações da ICRP é recomendado o monitoramento de indivíduos que regularmente são expostos em aeronaves. Como as doses individuais podem ser estimadas retrospectivamente, a ICRP continua recomendando o uso de códigos de computador validados para calcular as doses de radiação na aviação. Neste sentido, na internet há várias ferramentas dedicadas que permitem cálculos de taxas de doses efetivas para uma grande variedade de rotas de voos (ICRP, 2013).

Para a grande maioria das pessoas, o uso de transporte aéreo é um evento ocasional, e a exposição à radiação cósmica é muito baixa e não justifica a introdução de medidas de proteção, mas é recomendado disponibilizar informações gerais a todos os passageiros sobre os possíveis riscos das radiações cósmicas. A exposição torna-se maior para uma minoria de passageiros que utilizam aeronaves com frequência, seja particular ou decorrente de seu trabalho. Panorama diferente é o da tripulação, que é exposta frequentemente, e que pode receber doses de radiação mais altas e atingir valores próximos ao nível de referência adotado por órgãos nacionais e internacionais especializados em matéria de proteção radiológica.

1.4 O problema

No mundo contemporâneo as dinâmicas sociais têm se transformado. A globalização tornou-se vigente através das interconexões entre países e culturas, transcendendo fronteiras geográficas diariamente. Economicamente, a globalização abre mercados e proporciona novas oportunidades. Nesse sentido, o fluxo migratório laboral, sazonal e transfronteiriça em aeroportos se intensificaram a cada dia em todo o mundo.

A importância de abordar este tema não se limita apenas à saúde individual, mas também à segurança operacional das companhias aéreas e à formulação de políticas regulatórias adequadas, sobretudo no Brasil. Com o aumento da demanda por voos de longa duração e o desenvolvimento de novas tecnologias, a exposição à radiação cósmica pode se tornar uma preocupação ainda mais presente. Compreender os efeitos desta exposição prolongada é fundamental para mitigar riscos à saúde dos tripulantes e passageiros, bem como para estabelecer diretrizes que garantam voos seguros e protegidos contra os efeitos adversos da radiação ionizante. Essa abordagem holística não apenas protege a saúde daqueles que viajam pelo ar com frequência, mas também promove avanços na segurança global da aviação e na saúde pública.

1.5 Organização da dissertação

Os tópicos abordados até aqui atendem à necessidade fundamental de compreender o contexto e a relevância deste estudo. O resgate histórico das descobertas sobre a radiação, mencionado na seção 1.1, “Contexto Histórico e Descoberta da Radiação”, orienta sobre os estudos iniciados por cientistas como Wilhelm Röntgen, Henri Becquerel e Marie Curie. Esse capítulo não apenas ilustra o percurso do conhecimento científico, mas também evidencia as bases técnicas que sustentam as aplicações modernas da radiação em diversos campos. A perspectiva histórica é crucial para entender os avanços e os desafios enfrentados no manejo da radiação, tanto em ambientes ocupacionais quanto naturais.

A seção 1.2, “A Exposição à Radiação Cósmica”, discute a radiação cósmica e sua interação com a atmosfera terrestre, introduzindo elementos essenciais para o entendimento das fontes de radiação natural. Esse tema conecta a ciência atmosférica com questões geofísicas, como a Anomalia Magnética do Atlântico Sul, e enfatiza os impactos dessas interações em diferentes regiões do planeta. Esse panorama é especialmente relevante ao tratar de exposições ocupacionais, como no caso da aviação civil.

A conscientização dos riscos, enfatizada na seção 1.3, “Exposição à Radiação na Aviação Civil”, propõe uma reflexão sobre os riscos enfrentados por tripulações aéreas e passageiros frequentes, destacando um aspecto crítico da exposição à radiação em altitudes de viagens civis. A ciência dos efeitos biológicos durante as viagens, somada à necessidade de regulamentações para proteger a saúde desses grupos, instiga a discussão do tema abordado nesta pesquisa.

Esses fatores justificam plenamente a inclusão desses temas, que preparam o leitor para o entendimento do “1.4 Problema” a justificativa da pesquisa, e os “Objetivos na seção 1.6” que se aprofundam nos conceitos técnicos e nas metodologias apresentadas a partir do capítulo 2.

As discussões apresentadas posteriormente são:

2.1 Radiações: apresenta os tipos de radiações, diferenciando ionizantes e não ionizantes, destacando os efeitos biológicos das radiações ionizantes devido à sua capacidade de criar íons.

2.1.1 Radiações ionizantes e os efeitos biológicos: explora os danos causados pelas radiações ionizantes no corpo humano, abordando efeitos determinísticos (com limiar de dose) e estocásticos (probabilísticos), como câncer e alterações genéticas.

2.1.2 Fisiopatologias da exposição e contaminação por radiação: descreve os danos biológicos e síndromes agudas causadas por diferentes tipos de radiação, com base na dose absorvida e nas características da radiação.

2.2 Grandezas, unidades e dosimetria das radiações: discute conceitos fundamentais para medir e monitorar a exposição à radiação.

2.2.1 Kerma no ar: Define o Kerma como a energia cinética transferida pela radiação à matéria, usada para avaliar a interação inicial com o material irradiado.

2.2.2 Dose absorvida: Define a dose absorvida, discutindo a energia efetivamente depositada em uma massa específica pela radiação.

2.2.3 Dose equivalente: Define a dose equivalente, considerando os diferentes tipos de radiação e seu potencial de causar efeitos biológicos, ajustando a dose absorvida por um fator de ponderação específico.

2.2.4 Dose efetiva: Define a dose efetiva e avalia os riscos gerais à saúde, ponderando as doses equivalentes pelos fatores de sensibilidade de cada órgão e tecido, fornecendo uma medida abrangente de exposição.

3. Materiais e Métodos: Detalha a metodologia utilizada para calcular a exposição à radiação cósmica durante voos comerciais, com base em simulações de rotas nacionais e internacionais. Apresenta o programa EXPACS, as coordenadas geográficas e a altitude dos voos, além de demonstrar a comparação com o Programa SIEVERT PN da IRSN.

4. Resultados e Discussões: Apresenta os resultados da comparação entre os dados de radiação cósmica obtidos pelos programas EXPACS e IRSN para rotas nacionais e internacionais.

Conclusões: Aborda de maneira geral a análise dos dados sobre a exposição à radiação cósmica em voos comerciais, a consistência dos resultados obtidos e finaliza a discussão proposta pelo trabalho.

Anexos: Os anexos demonstram em detalhes as doses retiradas em cada intervalo da rota, sendo 500 km para voos nacionais e 1000 km para voos internacionais. Apresenta também o comprimento da rota em km, a velocidade média (km/h), o intervalo de tempo, a taxa de dose inicial e a taxa de dose final (efetiva e corporal).

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo Geral

Investigar a exposição à radiação cósmica em voos comerciais, tanto em rotas nacionais quanto internacionais, avaliando seus impactos na saúde dos trabalhadores da aviação utilizando métodos de simulação e análise comparativa através de programas reconhecidos internacionalmente, como o EXPACS e o SIEVERT PN da IRSN.

1.6.2 Objetivos Específicos

Desenvolver simulações de rotas aéreas nacionais e internacionais para calcular a exposição à radiação cósmica durante viagens de longa duração;

Utilizar os programas EXPACS e SIEVERT PN para mensurar as doses de radiação nas simulações de voos e avaliar a exposição à radiação cósmica;

Comparar os resultados obtidos com programa EXPACS com aqueles gerados pelo programa SIEVERT PN;

Comparar as taxas de doses efetivas (E) e $H_p(10)$ e seus possíveis desdobramentos;

Discutir as implicações dos resultados obtidos para a saúde ocupacional dos trabalhadores da aviação e para as regulamentações de proteção radiológica;

Contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre os riscos da exposição à radiação cósmica em voos comerciais, visando aumentar a conscientização sobre seus impactos na saúde de trabalhadores ocupacionalmente expostos, além de fortalecer a base de dados científicos sobre o tema.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Radiações

A radiação pode ser classificada como uma espécie de energia em trânsito, que é emitida de um ponto a outro (OKUNO, 2013). De acordo o dicionário Aurélio da língua portuguesa (1994), ela pode ser propagada no espaço ou no meio em forma de onda ou partícula. (CHISTOVAM, 2013). A radiação é um termo muito amplo, e pode ser utilizado em diferentes fatos cotidianos.

As radiações podem ser divididas como radiações corpusculares e radiações ondulatórias. As radiações corpusculares constituem de partículas atômicas ou subatômicas como: partículas alfas, elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons, que são emitidos de núcleos instáveis. As radiações eletromagnéticas, também conhecidas como radiações ondulatórias, são caracterizadas pelo comprimento de onda ou pela frequência (OKUNO, YOSHIMURA, 2010). As diferentes faixas dessas radiações compõem o espectro eletromagnético, que vai desde ondas de rádio e TV, micro-ondas, radiação infravermelha, luz visível e radiação ultravioleta, até raios X e raios gama, se propagando no vácuo na velocidade da luz, 3×10^8 m/s (OKUNO, 2013).

A radiação por sua vez, ainda pode ser ionizante ou não ionizante. De acordo Okuno (2013, p.185) “Qualquer tipo de radiação interage com corpos, inclusive o humano, depositando neles energia. A forma de interação depende do tipo e da energia da radiação e do meio absorvedor”. No entanto a que provoca danos relevantes a saúde, mesmo em baixas doses é a radiação ionizante que tem energia suficiente para remover elétrons dos átomos, criando então os íons (INCA, 2021).

2.1.1 Radiações ionizantes e os efeitos biológicos

A radiação ionizante possui energia suficiente para remover elétrons dos átomos, criando um par de íons: o elétron ejetado (íon negativo, conhecido como ânion) e o átomo que perdeu o elétron (íon positivo, conhecido como cátion). Esse processo desencadeia reações químicas que podem levar a danos biológicos, como alterações no DNA e em outras estruturas celulares. A força que liga os elétrons ao átomo depende da proximidade ao núcleo; os mais próximos são mais fortemente ligados. Apenas raios X e gama, no espectro eletromagnético, possuem energia suficiente para ionizar átomos em uma única interação. Em contraste, a radiação ultravioleta é considerada não ionizante, pois não tem energia para ejetar elétrons de átomos essenciais ao corpo

humano, no entanto, altas intensidades de radiação não ionizante, podem causar efeitos biológicos, como queimaduras e danos à pele. (OKUNO, 2013; BALOGH, 2011).

As fontes naturais de radiação ionizante incluem raios cósmicos e radionuclídeos da crosta terrestre, presentes no solo, rochas, água e corpo humano. O radônio, gás natural sem cheiro ou cor, destaca-se por acumular-se em ambientes fechados e, quando inalado, está ligado ao câncer de pulmão, sendo a segunda principal causa após o tabagismo. A ventilação dos ambientes reduz o risco de exposição ao radônio. Fontes artificiais de radiação ionizante, como raios-x, tomografias e usinas nucleares, também existem, e o risco de câncer relacionado a elas depende da dose, tempo de exposição, idade e sensibilidade dos tecidos (INCA, 2022).

Há diversos fatores determinantes que classificam a intensidade dos efeitos biológicos das radiações. Quanto maior a dose, maior será o efeito. No entanto, se fracionada ao longo da vida, é pouco provável que cause danos significativos. Certas doses podem ter efeitos completamente diferentes, dependendo de sua origem, seja de partículas ou de fótons. Partículas têm pouco poder de penetração ao contrário da exposição a fótons. A condição biológica pode favorecer ou limitar o dano causado pelas radiações. Os primeiros estágios de desenvolvimento embrionário são mais sensíveis à radiação. Já em adultos, existem diferentes sensibilidades no corpo como as células epiteliais, que possuem divisão muito mais rápida, são mais vulneráveis do que células musculares (DAFRE E MARIS, 2013).

Os efeitos biológicos da radiação podem ser classificados em dois tipos: reação tecidular e estocásticos (NAVARRO et. al 2008). Os efeitos de reação tecidular ocorrem quando a irradiação provoca um nível de dano que ultrapassa a capacidade de reparo do organismo. Isso significa que há mais morte celular do que o organismo consegue compensar. Essa relação pode ser observada na **Tabela 2**:

Tabela 2 - Comparativo de efeitos determinísticos e efeito estocástico

Características	Efeitos de reação tecidular	Efeitos Estocásticos
Limiar de dose	Possui limiar definido	Não há limiar
Relação dose-efeito	Gravidade aumenta com a dose	Probabilidade aumenta com a dose
Tempo	Imediato ou curto	Tardio (anos ou décadas)
Possíveis impactos	Queimaduras, catarata, esterilidade	Câncer, mutações hereditárias

Fonte: Adaptado de Navarro et. al (2008).

Acima de um ponto conhecido como limiar de dose, a gravidade do efeito aumenta com a dose recebida, tornando esses efeitos mais previsíveis. Já os efeitos estocásticos não possuem um limiar de dose estabelecido. Nesse caso, a radiação recebida causa menor morte celular, que pode

ser compensada pelo organismo. Por isso, esses efeitos têm caráter probabilístico. Desse modo, a probabilidade de ocorrência aumenta com a dose, porém a gravidade do dano não é diretamente proporcional à quantidade de radiação recebida (NAVARRO et. al, 2008); (OKUNO, 2013); (COPELAND, 2014).

2.1.2 Fisiopatologias da exposição e contaminação por radiação

Quando a radiação interage com o corpo humano, pode desencadear uma série de problemas de saúde, manifestados por sintomas característicos. A gravidade dos danos depende do tipo de radiação e do tempo de exposição. As partículas alfa surgem da emissão de partículas pesadas composta de nêutrons e prótons. Já a radiação beta surge da emissão de partículas leves como elétrons e pósitrons, que se movem em velocidades próximas à da luz, resultando em uma velocidade média de aproximadamente 270.000 km/s (FIOCRUZ, 2024). Por outro lado, radiações como raios X e raios gama, que fazem parte das ondas eletromagnéticas de alta energia, interagem com a matéria por meio de fótons (OKUNO E YOSHIMURA, 2010; OKUNO, 2013; BUSHBERG, 2022). Essas radiações possuem alto poder de penetração, podendo atravessar tecidos com maior intensidade e causar danos mais profundos, “grandes doses de radiação podem causar morte celular, e doses mais baixas podem interferir nos sistemas de reparo molecular endógeno, na homeostase e na proliferação celular” (BUSHBERG, 2022, p.8). Ainda conforme descrito pelo autor:

Devido a essas características, as partículas alfa e beta causam maior dano quando os elementos radioativos que as emitem estão dentro (contaminação interna) ou, no caso de emissores beta, diretamente no corpo; somente tecidos em contato próximo ao elemento são afetados. Raios X e raios gama podem causar danos a grandes distâncias de sua fonte e são tipicamente responsáveis por síndromes radioativas agudas. As síndromes de radiação agudas podem ser causadas por uma dose suficiente de alguns radionuclídeos depositados internamente amplamente distribuídos nos tecidos e órgãos e têm alta atividade específica. Por exemplo, o polônio-210 (Po-210) tem atividade específica de 166 terabecquerels por g (TBq/g) e 1 mcg (aproximadamente do tamanho de um grão de sal) de Po-210 libera uma dose no corpo inteiro de 50 Sv (~ 20 vezes a dose letal mediana). (BUSHBERG, 2022, p.1).

A exposição à radiação pode ocorrer de duas formas: contaminação e irradiação. A contaminação geralmente acontece na forma líquida ou de partículas em suspensão, como poeira. Ela pode ser interna, quando ocorre por ingestão, inalação ou por meio de lesões na pele, ou externa, quando afeta a pele ou roupas. Por outro lado, na irradiação, a exposição acontece sem contato direto com a fonte de radiação, sendo causada pela emissão de radiação que atinge o corpo à distância (BUSHBERG, 2022; INCA, 2023).

Partículas alfa e beta causam maior dano quando emitidas dentro do corpo, afetando tecidos próximos, enquanto raios X e gama podem atingir maiores distâncias, causando sintomas sistêmicos, síndromes radioativas ou danos locais. Para calcular os efeitos da radiação sobre o nosso corpo, utiliza-se uma medida chamada Sievert (Sv) (BUSHBERG, 2022), “que corresponde à dose absorvida medida em gray, multiplicada por um fator que leva em conta o tipo de radiação” (OKUNO, p. 193)

A ICRP (2012), definiu o limiar para catarata e doenças circulatórias de 0,5 Gy. O gray (Gy) mede a energia de radiação absorvida; exemplos incluem 2 Gy em radioterapia, 4 Gy como dose letal para humanos, e 10-20 kGy para esterilizar alimentos. A síndrome aguda da radiação – SAR é uma doença que ocorre após exposição intensa à radiação em curto período, com sintomas que variam conforme a dose. A **Tabela 3** demonstra a relação entre a dose absorvida e sintomas apresentados:

Tabela 3 - Síndrome Aguda da Radiação e Sintomas por dose absorvida

Dose Absorvida (Gy)	Sintomas
0,25 - 1 Gy	Náusea, diarreia, depressão do sistema sanguíneo.
	Náusea, diarreia, depressão do sistema sanguíneo, infecções oportunistas.
1 - 3 Gy	
3 - 5 Gy	Hemorragia, perda de pelos, esterilidade (temporária ou permanente).
~10 Gy	Inflamação pulmonar.
>10 Gy	Danos no sistema nervoso e cardiovascular, morte em poucos dias.

Fonte: Adaptado de Okuno (2013, p.192)

A sensibilidade ainda pode ser potencializada por predisposição genética (ex.: gene da ataxia-telangiectasia), condições médicas (distúrbios do tecido conjuntivo, diabetes) e uso de medicamentos, como quimioterápicos e estatinas, mesmo após semanas ou anos.

A radiação ainda pode causar danos genéticos em células somáticas ou em células germinativas, levantando a possibilidade de defeitos hereditários, é um efeito crônico associado as comorbidades relacionadas a sua exposição (BUSHBERG, 2022). Já foram observadas algumas associações entre o carcinoma e tipo da radiação conforme a **Tabela 4** abaixo, INCA (2022):

Tabela 4 - Associações entre o carcinoma e tipo da radiação

Tipo de radiação	Câncer em humanos
Raio X e Raios Gama	Glândula salivar, esôfago, estômago, cólon, pulmão, ossos, mama, bexiga, rim, pele, cérebro e sistema nervoso central (SNC), tireoide e leucemia.
Partículas alfa	Pulmão e leucemia.
Partículas Beta	Tireoide, leucemia, glândula salivar, osso e sarcoma.

Fonte: Adaptado do INCA (2022).

Pode-se refletir que seja em curto ou longo prazo, a exposição à radiação apresenta riscos significativos à saúde humana, podendo causar desde efeitos agudos, como náuseas e hemorragias, até efeitos crônicos, como o desenvolvimento de diferentes tipos de câncer. Esses riscos são amplificados por fatores genéticos, condições médicas preexistentes e interações com medicamentos. Assim, a compreensão dos tipos de radiação e seus potenciais danos é essencial para estabelecer medidas de proteção eficazes e minimizar os impactos à saúde, especialmente em populações mais vulneráveis, como crianças e pacientes submetidos a tratamentos médicos envolvendo radiação.

2.2 Grandezas, unidades e dosimetria das radiações

As grandezas dosimétricas são fundamentais para quantificar a interação da radiação ionizante com a matéria, especialmente no contexto da proteção radiológica e da dosimetria médica. O kerma no ar representa a energia transferida por unidade de massa do ar devido à radiação ionizante, sendo amplamente utilizado na calibração de detectores. A dose absorvida quantifica a energia depositada por unidade de massa de um material, expressa em grays (Gy), sendo essencial para avaliar os efeitos biológicos da radiação. A dose equivalente considera o tipo e a qualidade da radiação por meio do fator de ponderação, expressando o impacto biológico em sieverts (Sv). A dose efetiva pondera a dose equivalente de acordo com a radiosensibilidade dos diferentes órgãos e tecidos, permitindo estimar o risco global para a saúde. Por fim, o equivalente de dose pessoal refere-se à dose em um ponto específico do corpo humano, geralmente medido na superfície da pele, sendo crucial para a monitoração ocupacional de trabalhadores expostos à radiação.

Essas grandezas serão abordadas em detalhes nas seções seguintes.

2.2.1 Kerma no ar

A palavra Kerma é um acrônimo para “*Kinetic Energy Released per unit of Mass*” o que na língua portuguesa significa “energia cinética liberada por unidade de massa”. Ela consiste em uma grandeza física utilizada para descrever a quantidade de energia cinética transferida pela radiação para a matéria. Quando um feixe de radiação incide sobre um material, ocorre uma interação entre a radiação e os átomos desse material, resultando na transferência de energia. Essa energia transferida é absorvida por partículas carregadas, como elétrons, que se movem através do material. Esse movimento pode levar à ionização e excitação dos átomos, gerando mudanças em suas propriedades e contribuindo para os efeitos biológicos e físicos da radiação no meio atingido (GONZALES, 2014); (TAUHATA, 2014). Ela pode ser expressa por meio da Equação 1,

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (Eq. 1)$$

em que:

K = Kerma (em gray, Gy);

dE_{tr} = energia cinética transferida para partículas carregadas (em joules);

dm = massa do material irradiado (em quilogramas).

O material geralmente utilizado para representar o Kerma na radiologia é o ar, e a grandeza é o Kerma no ar k_{ar} . Esse dado é importante porque pode ser usado para calibrar dispositivos, dosímetros, estimar quantidade de radiação do ambiente e aquela que atingirá o corpo humano.

2.2.2 Dose absorvida

A dose absorvida refere-se a grandeza que mede a quantidade de energia depositada pela radiação ionizante em uma unidade de massa. Anteriormente era utilizada a unidade a unidade rad para expressar a dose. Atualmente usa-se o Gy, a conversão é simples, uma vez que 1Gy equivale a 100 rad, (CHRISTOVAM, 2013); (TAUHATA, 2014); (GONZALES, 2014). A fórmula utilizada pode ser definida por meio da Equação 2,

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (Eq. 2)$$

em que:

D = Dose absorvida;

$d\bar{\epsilon}$ = Energia média depositada;

dm = Massa infinitesimal do material.

Apesar de estarem relacionadas, Kerma e Dose Absorvida têm diferenças importantes. O Kerma refere-se à energia transferida inicialmente ao material, enquanto a Dose Absorvida corresponde à energia que permanece depositada no final do processo. Parte da energia do Kerma pode ser dissipada, como na forma de radiação de freamento, enquanto a Dose Absorvida representa apenas a energia efetivamente retida no material.

2.2.3 Dose equivalente

A dose equivalente estabelecida pelas normas CNEN-NE-3.01(1988), “possibilita comparar os efeitos biológicos causados por diferentes tipos de radiações ionizantes (eletromagnéticas e corpusculares)” (CHRISTOVAM, 2013, p.146), além de que “algumas radiações são mais efetivas do que outras em causar efeitos estocásticos”, (CNEN, 2018, p.2). Ela é sempre representada pela letra H.

A dose equivalente é obtida multiplicando a dose pelo fator de ponderação da radiação, (TAUHATA, 2014). Sua fórmula pode ser representada pela Equação 3. Esta fórmula é mais indicada quando há apenas uma fonte de radiação. Caso haja outros tipos de radiações contribuindo para a dose absorvida podemos somá-las:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (Eq. 3)$$

em que:

H_T = Dose equivalente em um tecido ou órgão específico;

$D_{T,R}$ = É a dose absorvida no tecido ou órgão T, causada por uma radiação R;

w_R = É o fator de ponderação da radiação;

$\sum_R$ = O somatório representa a contribuição de todos os tipos de radiações consideradas.

Em 2007, por meio da publicação da ICRP 103 foram apresentados novos valores de fatores de ponderação da radiação, atualizando parâmetros para a avaliação de riscos e proteção radiológica. A **Tabela 5**, sintetiza esses novos valores de ponderação:

Tabela 5 - Os fatores de ponderação das radiações ICRP 103

Tipo e faixa de energia	w_R
Fótons	1
Elétrons e múons	1
Prótons e píons pesados	2
Partículas alfa, fragmentos de fissão, íons pesados	20
*Nêutrons, $E_n < 1\text{MeV}$	$2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
*Nêutrons, $1\text{ MeV} \leq E_n \leq 50\text{ MeV}$	$5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$
*Nêutrons, $E_n > 50\text{ MeV}$	$2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}$

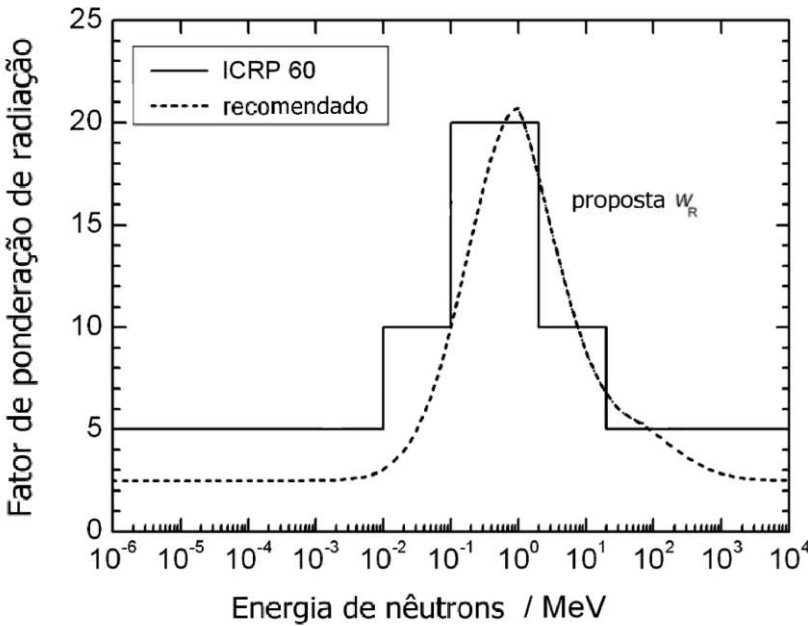
*Função contínua da energia dos nêutrons

Fonte: Adaptada de ICRP 103 (2007, p.64)

O uso de uma função contínua é baseado na ideia de que a maioria das exposições a nêutrons abrange uma faixa de energias.

A **Figura 2** ilustra a comparação entre a função descontínua antiga (representada pela linha) e a função contínua proposta (representada pela linha tracejada) para o fator de ponderação de radiação w_R , que varia com a energia dos nêutrons E_n .

Figura 2 - Comparação entre a função descontínua e a função contínua



Fonte: Adaptada de ICRP 103 (2007, p.281)

A linha tracejada demonstra a nova metodologia utilizando uma função contínua. Essa função se ajusta de maneira suave, acomodando-se de forma mais precisa às variações reais na energia dos nêutrons. É uma abordagem mais prática, uma vez que exposições à radiação tipicamente incluem uma gama de energias, ao invés de valores fixos.

2.2.4 Dose efetiva

A dose efetiva (Eq. 4) considera os riscos associados à exposição à radiação, levando em conta a suscetibilidade dos diferentes órgãos e tecidos do corpo humano. Esse parâmetro é calculado como a soma ponderada das doses equivalentes em todos os órgãos e tecidos, ajustada por fatores que refletem a sensibilidade específica de cada tecido e o tipo de radiação envolvida. Essa abordagem permite quantificar de forma mais precisa os potenciais efeitos biológicos da radiação, Castro (2005),

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (\text{Eq. 4})$$

em que:

E = Dose efetiva, medida em Sv

w_T = É o fator de peso do tecido T ;

H_T = É a dose equivalente recebida por órgão específico T em Sv

Σ_T = Representa a soma para todos os tecidos e órgãos relevantes do corpo

De acordo com as recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP 103, 2007), diferentes órgãos e tecidos do corpo humano apresentam sensibilidades variadas à radiação ionizante. Para refletir essa variação, são atribuídos fatores de ponderação (w_T) (**Tabela 6**) específicos a cada órgão ou tecido, os quais são utilizados no cálculo da dose efetiva. Esses valores permitem considerar o risco biológico associado à exposição à radiação de maneira mais precisa, levando em conta a maior ou menor suscetibilidade de cada parte do corpo, (CASTRO, 2005); (CNEN, 2018).

Tabela 6 - Os fatores de ponderação dos tecidos, w_T

Tecido ou Órgão	w_T
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Cólon	0,12
Medula óssea	0,12
Mamas	0,12
Gônadas	0,08
Tireoide	0,04
Esôfago	0,04
Bexiga	0,04
Fígado	0,04
Superfície óssea	0,01
Pele	0,01
Cérebro	0,01
Glândulas salivares	0,01
Demais tecidos	0,12

1. O w_T para as gônadas é aplicado à média das doses nos testículos e ovários.

2. A dose no cólon é considerada como a média ponderada em massa das doses da parte superior e inferior do intestino, conforme a formulação da Publicação 60. Os tecidos restantes especificados (14 no total, 13 em cada sexo) são: adrenais, tecido extratorácico, vesícula biliar, coração, rins, linfonodos, músculo, mucosa oral, pâncreas, próstata, intestino delgado, baço, timo, útero/cérvix.

Fonte: Adaptada de ICRP 103 (2007, p.261).

2.2.5 Equivalente de dose pessoal

O equivalente de dose pessoal, $H_p(10)$, é uma grandeza operacional utilizada para a monitoração individual de trabalhadores expostos à radiação ionizante. Ele representa a dose equivalente em tecidos moles a uma profundidade de 10 mm sob um ponto específico do corpo humano, geralmente na região do tórax, e é medido por dosímetros posicionados sobre a pele ou sob o avental plumbífero, quando aplicável (ICRP 103, 2007).

O $H_p(10)$ é expresso em sieverts (Sv) e serve como uma estimativa da dose efetiva para exposições em campos de radiação predominantemente penetrantes, como raios X de alta energia, fótons e nêutrons. Sua determinação é essencial para avaliar o cumprimento dos limites de dose ocupacional e garantir a proteção radiológica dos profissionais.

Para a monitoração ocupacional, o dosímetro pessoal é calibrado para fornecer diretamente o valor de $H_p(10)$, sendo posicionado na região do tórax ou próximo à área mais exposta do corpo. Em campos de radiação penetrante, como fótons e nêutrons, $H_p(10)$ é utilizado como uma estimativa operacional da dose efetiva, permitindo o controle da exposição de trabalhadores ocupacionalmente expostos.

CAPÍTULO 3

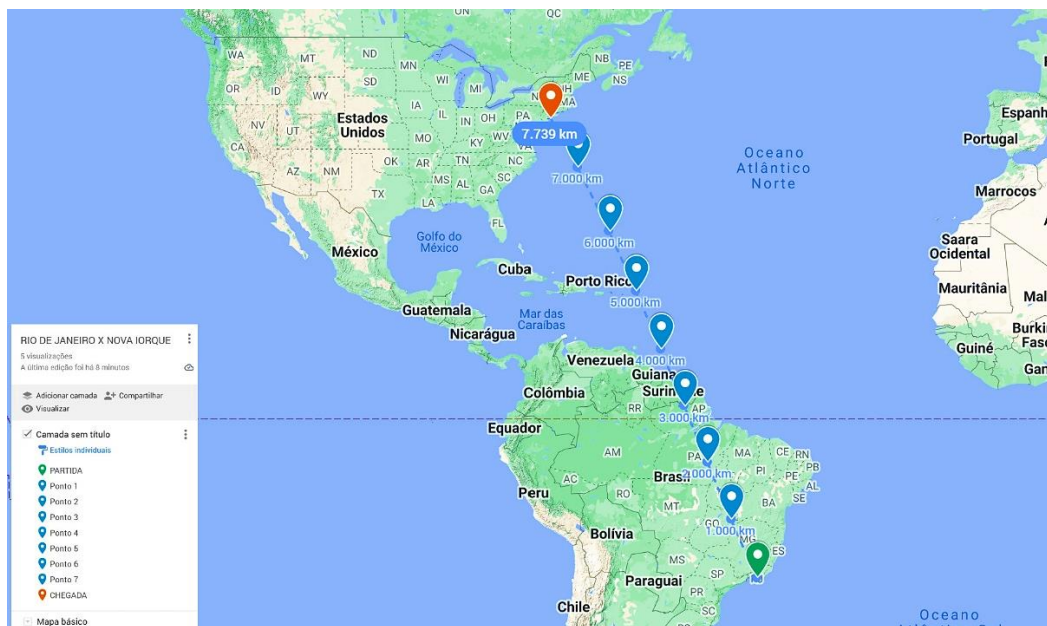
MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizados diferentes métodos de coleta de dados. Inicialmente, foram simuladas diversas rotas de voos nacionais e internacionais por meio de sites de venda de passagens aéreas, tanto das próprias companhias quanto de agências populares, como **Decolar.com** e **123Milhas**. A prioridade foi dada a voos diretos para minimizar variações nos cálculos e possíveis erros. Entretanto, em alguns casos, foi necessário considerar voos com escalas, levando em conta o tempo de decolagem e pouso em cada parada.

Após a definição das viagens, foi necessário identificar as aerovias ativas utilizadas pelas aeronaves e as fontes que disponibilizam esses dados. Para isso, foram consultadas plataformas como os portais das companhias aéreas, o site Flight Connections (<https://www.flightconnections.com/>), o portal da Força Aérea Brasileira (FAB) (<https://www.fab.mil.br/index.php>) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (<https://www.gov.br/anac/pt-br>).

A ferramenta Google My Maps foi utilizada para traçar as rotas e calcular as distâncias percorridas. A Figura 3 ilustra um exemplo do traçado de rota para um voo entre Rio de Janeiro e Nova Iorque, seguindo as aerovias identificadas nos portais de aviação.

Figura 3 – Traçamento de rotas no Google My Maps



Fonte: Autoria própria (2024).

3.1 Coleta de coordenadas e ajustes de tempo

Para voos internacionais, as coordenadas geográficas das rotas foram registradas a cada 1.000 km e para voos nacionais a cada 500 km. O tempo de voo foi ajustado para tornar os cálculos de taxas de dose mais precisos, considerando a aceleração média das aeronaves durante decolagem e pouso.

3.2 Perfis de Voo Considerados

Os cálculos consideraram os seguintes parâmetros operacionais típicos de aeronaves comerciais (ABEAR, 2018):

- Decolagem: Velocidade inicial entre 200 km/h e 280 km/h, com um ângulo de subida de aproximadamente 15 graus, ajustado conforme a altitude.
- Voo de cruzeiro: Velocidade aproximada de 850 km/h, em altitudes entre 9.100 e 12.400 metros, onde a menor densidade do ar reduz o consumo de combustível.
- Pouso: Início da aproximação a 380 km/h, com redução progressiva da velocidade até 240 km/h no momento do toque no solo.

Embora os métodos e fontes de dados empregados apresentem ampla aplicabilidade, a pesquisa foi desenvolvida especificamente para a tripulação de voo, considerando as condições e o ambiente de trabalho dessa categoria profissional.

A **Tabela 7**, organiza as rotas de voos analisadas, dividindo-as em rotas nacionais e rotas internacionais. Ambas contêm informações detalhadas sobre as simulações, incluindo origem, destino, escalas, tempo de viagem e companhia aérea. Todos os estados brasileiros foram contemplados, priorizando as principais rotas e evitando repetições. No caso das rotas internacionais, buscou-se otimizar os trajetos, sempre reduzindo ao máximo o número de escalas.

Tabela 7 – Simulações dos voos e companhias aéreas

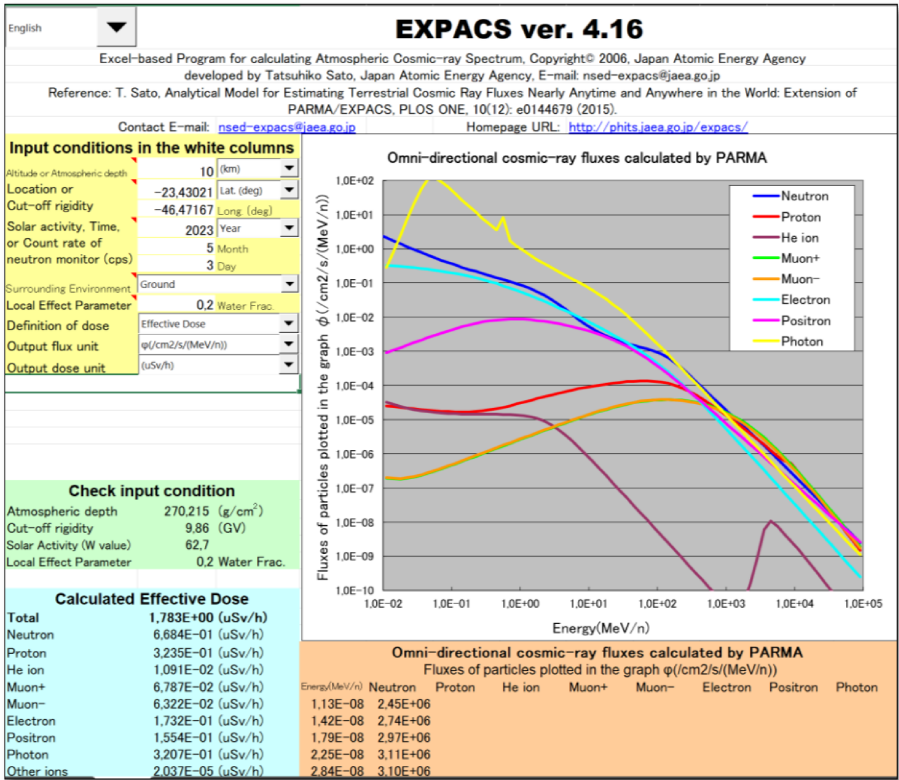
Nº	ORIGEM			DESTINO			Tempo de viagem
	Município	Estado		Município	Estado	Parada	
1.	Curitiba	Paraná	x	Natal	Rio Grande do Norte	0	03h 35m
2.	Belo Horizonte	Minas Gerais	x	Manaus	Amazonas	0	03h 25m
3.	Florianópolis	Santa Catarina	x	Rio de Branco	Acre	1	05h 45m
4.	Guarulhos	São Paulo	x	Fernando de Noronha	Pernambuco	1	04h 25m
5.	Natal	Rio Grande do Norte	x	Rio Branco	Acre	1	06h 15m
6.	Campo Grande	Mato Grosso do Sul	x	Recife	Pernambuco	0	04h 00m
7.	Belém	Pará	x	Guarulhos	São Paulo	0	03h 20m
8.	João Pessoa	Paraíba	x	Campinas	São Paulo	0	03h 10m
9.	Teresina	Piauí	x	Guarulhos	São Paulo	0	03h 15m
10.	Porto Velho	Rondônia	x	Recife	Pernambuco	0	04h 40m
11.	Aracaju	Sergipe	x	Guarulhos	São Paulo	0	02h 45m
12.	Macapá	Amapá	x	Guarulhos	São Paulo	0	03h 55m
13.	Maceió	Alagoas	x	Curitiba	Paraná	0	03h 20m
14.	Salvador	Bahia	x	Porto Alegre	Rio Grande do Sul	0	03h 50m
15.	Fortaleza	Ceará	x	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	0	03h 20m
16.	Vitória	Espírito Santo	x	Fortaleza	Ceará	0	02h 35m
17.	Brasília	Distrito Federal	x	Boa Vista	Roraima	0	03h 35m
18.	São Luís	Maranhão	x	Guarulhos	São Paulo	0	03h 30m
19.	Cuiabá	Mato Grosso	x	Maceió	Alagoas	0	03h 20m
20.	Palmas	Tocantins	x	Goiânia	Goiás	0	01h 20m
ORIGEM			DESTINO			Parada	Tempo de viagem
	Município	País		Município	País		
1.	Rio de Janeiro	Brasil	x	Nova Iorque	Estados Unidos	0	10h 30m
2.	São Paulo	Brasil	x	Lisboa	Portugal	0	09h 45m
3.	São Paulo	Brasil	x	Tóquio	Japão	1	24h 20m
4.	São Paulo	Brasil	x	Emirados Árabes Unidos	Dubai	0	14h 55m
5.	Rio de Janeiro	Brasil	x	Londres	Inglaterra	0	11h 15m
6.	Belém	Brasil	x	San Carlos de Bariloche	Argentina	1	08h 50m
7.	Brasília	Brasil	x	Cancún	México	0	08h 50m
8.	Salvador	Brasil	x	Paris	França	1	10h 25m
9.	Belo Horizonte	Brasil	x	Cidade do Panamá	Panamá	0	06h 45m
10.	Recife	Brasil	x	Santiago	Chile	0	06h 30m
11.	Porto Alegre	Brasil	x	Lima	Peru	0	04h 55m
12.	Florianópolis	Brasil	x	Montreal	Canadá	0	11h 50m
13.	Natal	Brasil	x	Sydney	Austrália	2	31h 05m
14.	Teresina	Brasil	x	Hong Kong	China	2	27h 00m
15.	Macapá	Brasil	x	Joanesburgo	África do Sul	1	12h 25m

Fonte: Autoria própria, 2024.

As coordenadas foram utilizadas no programa EXPACS ver.4.16 (<https://phits.jaea.go.jp/expacs>), esse sistema pode calcular instantaneamente os fluxos de radiação cósmica terrestre de nêutrons, prótons, íons com carga até 28 (Ni), múons, elétrons, pósitrons e fótons em quase qualquer momento e local na atmosfera da Terra, sendo capaz de realizar cálculos do espectro de partículas e a taxa de equivalente de dose ambiente em altitudes de até 20 km.

A altitude padrão utilizada foi de 10 km, essa escolha foi baseada na altitude de cruzeiro. A **Figura 4** apresenta uma das interface do programa EXPACs utilizado para calcular das taxas de dose. É possível observar as condições de entrada, como altitude, localização, atividade solar e parâmetros locais, além das doses efetivas calculadas para diferentes partículas. Esse dados podem ser alterados conforme a necessidade do usuário e a fonte da pesquisa. Também inclui um gráfico e uma tabela com fluxos de raios cósmicos, evidenciando a importância da análise detalhada dos fluxos de partículas e suas doses.

Figura 4 – Programa EXPACs



Fonte: EXPACs, 2024.

3.3 Metodologia de avaliação da exposição à radiação cósmica

A exposição à radiação neste estudo foi avaliada com base na dose efetiva (E) e de corpo inteiro Hp(10). A metodologia utilizada considera a taxa de dose absorvida ao longo da trajetória de voo, a qual depende das coordenadas geográficas de longitude (x), latitude (y) e altitude (z). Dessa forma, a taxa de dose pode ser representada como uma função dessas variáveis espaciais, $\dot{D} = f(x,y,z)$.

Como a trajetória é percorrida por uma aeronave em movimento, essas coordenadas variam ao longo do tempo. Para calcular a dose efetiva (E) e de corpo inteiro $H_p(10)$ ao longo do voo, a taxa de dose é integrada no tempo, conforme a Equação 5:

$$D = \int_{t_0}^{t_f} \dot{D} dt \quad \text{para } D = E, H_p(10) \quad (\text{Eq. 5})$$

Uma abordagem prática para essa integração é segmentar a trajetória em trechos de comprimento uniforme, assumindo uma taxa de dose média constante dentro de cada segmento. Assim, a dose total pode ser calculada pela soma das contribuições de cada trecho, conforme a Equação 6:

$$D = \sum_{i=1}^n \dot{D} \Delta t_i \quad \text{para } D = E, H_p(10) \quad (\text{Eq. 6})$$

onde:

- n é o número total de segmentos em que a rota foi dividida;
- $\dot{D}$ é a taxa de dose média no i -ésimo segmento;
- Δt_i é o tempo gasto pela aeronave nesse trecho.

A taxa de dose média em cada segmento foi calculada considerando a média das taxas de dose nos pontos inicial e final do trecho. O tempo de permanência em cada segmento foi obtido dividindo o comprimento do trecho pela velocidade média da aeronave ($\Delta t_i = \Delta l_i / V_{m_i}$). Para os trechos de decolagem e pouso, a velocidade média foi ajustada de modo a refletir o perfil real de um voo comercial. Essa aproximação é válida desde que a variação da taxa de dose entre os segmentos seja pequena, permitindo a substituição da integral por uma somatória. O mesmo procedimento foi aplicado para o cálculo da dose efetiva.

3.4 Estimativa da dose anual

A legislação brasileira (LEI nº 13.475) estabelece um limite máximo de 960 horas anuais de voo para a tripulação. Assim, a dose anual correspondente pode ser estimada pela Equação 7:

$$E_{ano} = 960 \cdot \frac{E}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde $\frac{E}{\Delta t}$ representa a média da taxa de dose de uma viagem.

Esse cálculo foi utilizado para projetar a dose acumulada ao longo de períodos de um e cinco anos, permitindo uma análise mais abrangente da exposição à radiação cósmica.

3.5 Comparação com dados internacionais

Para validar os resultados obtidos, os dados foram comparados com estimativas fornecidas pelo sistema do *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire* (IRSN), disponível em (<https://www.sievert-system.org/?locale=en#Calcul>). Além disso, foi analisado o banco de dados do SISERI (*Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants*), um sistema francês criado em 2006 para centralizar e monitorar a exposição ocupacional de trabalhadores sujeitos à radiação ionizante, incluindo profissionais da aviação. Esse sistema é complementado pelo SIEVERT PN, uma ferramenta desenvolvida para estimar doses individuais de radiação cósmica em tripulantes de voo.

O SIEVERT PN, testado pela Air France e implementado em 2014, utiliza informações fornecidas diretamente pelas companhias aéreas para calcular automaticamente a dose de exposição ao longo dos voos. Essa ferramenta está em conformidade com as regulamentações francesas estabelecidas pelo decreto de 17 de julho de 2013, que determina protocolos para o monitoramento dosimétrico de trabalhadores expostos à radiação ionizante (IRSN, 2014). A **Figura 5** ilustra a interface do programa SIEVERT PN, onde é possível inserir dados como país e cidade de origem e destino, data e hora do voo, além do modelo da aeronave.

Figura 5 – Programa SIEVERT PN

The screenshot shows the SIEVERT PN web application interface. At the top, there is a header with the logos of the République Française and IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire), and the SIEVERT PN logo. Navigation links for Home, Cosmic radiation, and Calculate the dose received are present. The main heading is "Calculate the dose received". Below this, there are two main sections: "DEPARTURE" and "ARRIVAL".

DEPARTURE:

- Country: BRAZIL
- City: ARACAJU
- Date (local): 03/05/2023
- Time (local): 07:00

ARRIVAL:

- Country: UNITED STATES NEW YORK
- City: NEW YORK
- Date (local): 03/05/2023
- Time (local): 18:00

Below these sections, there is a "Type of aircraft" dropdown menu set to "Jet". A "Calculate" button is located at the bottom right of the form. A disclaimer at the bottom states: "Subject to local regulation modifications, the flight dates and times include time difference and, if necessary, daylight saving time. Check the flight time."

Fonte: IRSN, 2024.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A **Tabela 8** compara as doses efetivas (E) calculadas para diferentes rotas nacionais e internacionais utilizando dois softwares: EXPACS e IRSN.

Tabela 8 – Comparação entre o EXPACS e o IRSN

ROTAS NACIONAIS							
Nº	ORIGEM			DESTINO		DOSE EFETIVA (E)	
	Cidade	Estado		Cidade	Estado	EXPACS (mSv)	IRSN (mSv)
1.	Curitiba	Paraná	x	Natal	Rio Grande do Norte	0,006	0,007
2.	Belo Horizonte	Minas Gerais	x	Manaus	Amazonas	0,005	0,006
3.	Florianópolis	Santa Catarina	x	Rio Branco	Acre	0,009	0,012*
4.	Guarulhos	São Paulo	x	Fernando de Noronha	Pernambuco	0,007	0,008*
5.	Natal	Rio Grande do Norte	x	Rio Branco	Acre	0,010	0,012*
6.	Campo Grande	Mato Grosso do Sul	x	Recife	Pernambuco	0,006	0,008
7.	Belém	Pará	x	Guarulhos	São Paulo	0,005	0,006
8.	João Pessoa	Paraíba	x	Campinas	São Paulo	0,005	0,005*
9.	Teresina	Piauí	x	Guarulhos	São Paulo	0,005	0,005
10.	Porto Velho	Rondônia	x	Recife	Pernambuco	0,007	0,009*
11.	Aracaju	Sergipe	x	Guarulhos	São Paulo	0,005	0,004
12.	Macapá	Amapá	x	Guarulhos	São Paulo	0,006	0,007*
13.	Maceió	Alagoas	x	Curitiba	Paraná	0,005	0,007
14.	Salvador	Bahia	x	Porto Alegre	Rio Grande do Sul	0,007	0,008
15.	Fortaleza	Ceará	x	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	0,005	0,005
16.	Vitória	Espírito Santo	x	Fortaleza	Ceará	0,004	0,004
17.	Brasília	Distrito Federal	x	Boa Vista	Roraima	0,005	0,005*
18.	São Luís	Maranhão	x	Guarulhos	São Paulo	0,006	0,006
19.	Cuiabá	Mato Grosso	x	Maceió	Alagoas	0,005	0,006
20.	Palmas	Tocantis	x	Goiânia	Goiás	0,004	0,002*

ROTAS INTERNACIONAIS							
Nº	ORIGEM			DESTINO		DOSE EFETIVA (E)	
	Cidade	País		Cidade	País	EXPACS (mSv)	IRSN (mSv)
1.	Rio de Janeiro	Brasil	x	Nova Iorque	Estados Unidos	0,019	0,026
2.	Guarulhos	Brasil	x	Lisboa	Portugal	0,018	0,019
3.	Guarulhos	Brasil	x	Tóquio	Japão	0,052	0,059
4.	Guarulhos	Brasil	x	Emirados Árabes Unidos	Dubai	0,021	0,029
5.	Rio de Janeiro	Brasil	x	Londres	Inglaterra	0,020	0,026
6.	Belém	Brasil	x	San Carlos de Bariloche	Argentina	0,014	0,020
7.	Brasília	Brasil	x	Cancún	México	0,015	0,019
8.	Salvador	Brasil	x	Paris	França	0,018	0,023

9.	Belo Horizonte	Brasil	x	Cidade do Panamá	Panamá	0,010	0,013
10.	Recife	Brasil	x	Santiago	Chile	0,011	0,014
11.	Porto Alegre	Brasil	x	Lima	Peru	0,008	0,010
12.	Florianópolis	Brasil	x	Montreal	Canadá	0,026	0,032
13.	Natal	Brasil	x	Sydney	Austrália	0,047	0,061
14.	Teresina	Brasil	x	Hong Kong	China	0,060	0,089
15.	Macapá	Brasil	x	Joanesburgo	África do Sul	0,027	0,036

*Valores com base na cidade mais próxima de um dos destinos disponíveis no IRSN, considerando as distâncias e variáveis de maior relevância para cada trajeto.

Fonte: Autoria própria (2024).

4.1 Comparação geral entre EXPACS e IRSN

As doses efetivas calculadas pelos dois softwares são geralmente semelhantes, mas há pequenas variações entre os valores. Isso sugere que ambos os softwares possuem metodologias coerentes, mas com algumas diferenças na modelagem ou nos dados utilizados. É de suma importância destacar que os valores com (*) da IRSN refere-se a cidades nas quais o programa não abrange, nesse sentido foram considerados os valores com base na cidade mais próxima de um dos destinos disponíveis no SIEVERT PN.

Em algumas rotas, as diferenças entre as doses calculadas pelo EXPACS e IRSN são mais acentuadas, o que pode indicar diferenças específicas nos modelos de cálculo para certos trajetos ou condições de voo. As rotas nacionais com maiores valores de dose efetiva foram, Curitiba – Natal, que a apresenta uma das maiores doses efetivas entre as rotas nacionais, com valores de 0,006 mSv (EXPACS) e 0,007 mSv (IRSN), Florianópolis – Rio Branco 0,009 mSv (EXPACS) e 0,012 mSv (IRSN), Natal – Rio Branco 0,010 mSv (EXPACS) e 0,012 mSv (IRSN). A rota Guarulhos - Fernando de Noronha, outra rota com dose relativamente alta, com 0,00711 mSv (EXPACS) e 0,008 mSv (IRSN). Essas rotas são significativas devido às distâncias envolvidas e ao tempo de voo, que influenciam a exposição à radiação cósmica.

No âmbito das rotas internacionais, com maiores valores de dose efetiva, destacam as rotas Rio de Janeiro - Nova Iorque com 0,019 mSv (EXPACS) e 0,026 mSv (IRSN). Esta rota de longa distância sobre o Atlântico Norte expõe os membros da tripulação a maiores níveis de radiação cósmica. Outras rotas com destaques foram as de Teresina – Hong Kong 0,060 mSv (EXPACS) e 0,089 (IRSN), Guarulhos – Tokio 0,052 mSv (EXPACS) e 0,059 mSv (IRSN), ambas têm doses elevadas. Estas rotas refletem a maior exposição associada a voos de longa duração e altitudes elevadas, especialmente em regiões polares e sobre oceanos.

Para entender os impactos dessas radiações a longo prazo, precisa-se considerar o limite de horas trabalhadas por essa tripulação. No Brasil a LEI nº 13.475, de 28 de agosto de 2017, Seção

V, Art.33 que explana sobre os limites de voos e de pousos: “III - 100 (cem) horas de voo por mês e 960 (novecentas e sessenta) horas por ano, em aviões convencionais.” (BRASIL, 2017).

Desse modo, pode-se traçar um perfil desses profissionais considerando a dose efetiva estimada nessa rota e o limite de horas de voo por mês. As doses foram tabuladas em períodos diferentes para demonstrar de forma mais abrangente os possíveis efeitos dessa exposição à radiação, conforme pode ser observado na **Tabela 9**.

Tabela 9 – Dose efetiva e corporal anual e quinquenal

ROTAS INTERNACIONAIS						EXPACS (mSv)			
Nº	ORIGEM			DESTINO		1 ANO		5 ANOS	
	Cidade	País		Cidade	País	E	Hp(10)	E	Hp(10)
1.	Rio de Janeiro	Brasil	x	Nova Iorque	Estados Unidos	1,71	2,38	8,55	11,90
2.	Guarulhos	Brasil	x	Lisboa	Portugal	1,79	2,22	8,95	11,10
3.	Guarulhos	Brasil	x	Tóquio	Japão	2,05	2,70	10,25	13,50
4.	Guarulhos	Brasil	x	Emirados Árabes Unidos	Dubai	1,38	1,79	6,90	8,95
5.	Rio de Janeiro	Brasil	x	Londres	Inglaterra	1,72	2,20	8,60	11,00
6.	Belém	Brasil	x	San Carlos de Bariloche	Argentina	1,65	2,16	8,25	10,80
7.	Brasília	Brasil	x	Cancún	México	1,63	2,08	8,15	10,40
8.	Salvador	Brasil	x	Paris	França	1,67	2,12	8,35	10,60
9.	Belo Horizonte	Brasil	x	Cidade do Panamá	Panamá	1,47	1,89	7,35	9,45
10.	Recife	Brasil	x	Santiago	Chile	1,61	2,06	8,05	10,30
11.	Porto Alegre	Brasil	x	Lima	Peru	1,60	2,04	8,00	10,20
12.	Florianópolis	Brasil	x	Montreal	Canadá	2,10	2,65	10,50	13,25
13.	Natal	Brasil	x	Sydney	Austrália	1,46	1,86	7,30	9,30
14.	Teresina	Brasil	x	Hong Kong	China	2,14	2,69	10,70	13,45
15.	Macapá	Brasil	x	Joanesburgo	África do Sul	2,06	2,58	10,30	12,90

Fonte: Autoria própria (2024).

A **Tabela 9** apresenta as doses efetivas (E) anuais (960 h de trabalho/ano) e quinquenais (4800 h/ 5 anos) e o equivalente de dose ambiente, Hp(10), recebidas pelos tripulantes em diversas rotas internacionais, calculadas usando o software EXPACS. As doses são expressas em milisieverts (mSv) e incluem tanto a dose efetiva (E) quanto a dose equivalente Hp(10). Como pode ser observado, a rota de Rio de Janeiro - Nova Iorque apresenta uma dose anual de 1,71 mSv e quinquenal de 8,55 mSv (E), enquanto o Hp(10) é 2,38 mSv anual e 11,90 mSv quinquenal. A rota Teresina – Hong Kong tem a maior dose entre as rotas listadas, com 2,14 mSv anual e 10,70 mSv quinquenal (E), e 2,69 mSv anual e 13,45 mSv quinquenal para Hp(10). Curiosamente a rota Guarulhos – Toquio apresenta dose corporal superior a Teresina - Hong Kong. Rotas como Guarulhos - Lisboa e Rio de Janeiro - Londres também apresentam doses significativas, mas menores que as rotas para Nova Iorque e Tóquio.

4.2 Comparações de Dose Efetiva (E) e Hp(10)

A dose Hp(10) é consistentemente maior que a dose efetiva (E) para todas as rotas, o que é esperado, pois Hp(10) representa a dose medida a 10 mm de profundidade no tecido, refletindo a exposição mais próxima da pele. As diferenças entre E e Hp(10) mostram a importância de considerar ambas as medidas para uma avaliação abrangente da exposição à radiação, uma vez que (E) reflete o impacto sobre os órgãos internos enquanto Hp(10) reflete a exposição superficial.

De acordo com a ICRP e CNEN, a dose anual não deve exceder 20 mSv em um período de cinco anos consecutivos. Nenhuma das rotas analisadas ultrapassa este limite, mas algumas chegam a ser relativamente altas, especialmente as rotas para destinos de longa distância como Tóquio e Nova Iorque. A rota Teresina – Hong Kong destaca-se como a que apresenta a maior dose efetiva acumulada ao longo de cinco anos, com 10,70 mSv, enquanto Guarulhos – Toquio apresenta maior Hp(10) com 13,50 mSv.

A exposição acumulada ao longo de anos pode aumentar os riscos de efeitos estocásticos, como o desenvolvimento de câncer. Por isso, o monitoramento contínuo e a implementação de medidas de proteção radiológica são cruciais para a tripulação aérea.

A legislação brasileira, ao estipular limites de horas de voo mensais e anuais, também visa limitar a exposição à radiação, ajudando a manter as doses dentro dos níveis recomendados internacionalmente.

A **Tabela 10** apresenta as doses efetivas e corporais anuais (1 ano) e quinquenais (5 anos) estimadas em viagens nacionais interestaduais realizadas por tripulações de voo também calculadas usando o software EXPACS, considerando diferentes rotas ao longo do território brasileiro. Nota-se que as rotas mais longas, como Guarulhos (São Paulo) para Fernando de Noronha (Pernambuco) ou Brasília (Distrito Federal) para Boa Vista (Roraima), apresentam valores superiores de dose efetiva (E) e de dose equivalente ao corpo inteiro (Hp(10)), tanto em análises anuais quanto quinquenais.

De maneira geral, a exposição em 1 ano apresenta variações entre 1,45 mSv (Porto Velho - Recife) e 1,68 mSv (Salvador - Porto Alegre), refletindo as diferenças na duração das rotas e na altitude de cruzeiro. Já para o período de 5 anos, as doses quinquenais variam entre 7,25 mSv e 10,70 mSv nos mesmos destinos. É importante observar que, nenhuma das rotas apresentadas excedeu os limites anuais de 20 mSv recomendados pela ICRP.

Tabela 10 – Dose efetiva e corporal anual e quinquenal em viagens interestaduais

ROTAS NACIONAIS						EXPACS (mSv)			
Nº	ORIGEM			DESTINO		1 ANO		5 ANOS	
	Município	Estado		Município	Estado	E	H _P (10)	E	H _P (10)
1.	Curitiba	Paraná	x	Natal	Rio Grande do Norte	1,57	1,90	7,85	9,50
2.	Belo Horizonte	Minas Gerais	x	Manaus	Amazonas	1,48	1,89	7,40	9,45
3.	Florianópolis	Santa Catarina	x	Rio Branco	Acre	1,55	1,98	7,75	9,90
4.	Guarulhos	São Paulo	x	Fernando de Noronha	Pernambuco	1,55	1,97	7,75	9,85
5.	Natal	Rio Grande do Norte	x	Rio Branco	Acre	1,48	1,89	7,40	9,45
6.	Campo Grande	Mato Grosso do Sul	x	Recife	Pernambuco	1,53	1,95	7,65	9,75
7.	Belém	Pará	x	Guarulhos	São Paulo	1,51	1,93	7,55	9,65
8.	João Pessoa	Paraíba	x	Campinas	São Paulo	1,56	1,92	7,80	9,60
9.	Teresina	Piauí	x	Guarulhos	São Paulo	1,55	1,97	7,75	9,85
10.	Porto Velho	Rondônia	x	Recife	Pernambuco	1,45	1,85	7,25	9,25
11.	Aracaju	Sergipe	x	Guarulhos	São Paulo	1,60	2,04	8,00	10,20
12.	Macapá	Amapá	x	Guarulhos	São Paulo	1,57	1,88	7,85	9,40
13.	Maceió	Alagoas	x	Curitiba	Paraná	1,55	2,04	7,75	10,20
14.	Salvador	Bahia	x	Porto Alegre	Rio Grande do Sul	1,68	2,14	8,40	10,70
15.	Fortaleza	Ceará	x	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	1,54	1,96	7,70	9,80
16.	Vitória	Espírito Santo	x	Fortaleza	Ceará	1,54	1,97	7,70	9,85
17.	Brasília	Distrito Federal	x	Boa Vista	Roraima	1,44	1,84	7,20	9,20
18.	São Luís	Maranhão	x	Guarulhos	São Paulo	1,53	1,95	7,65	9,75
19.	Cuiabá	Mato Grosso	x	Maceió	Alagoas	1,50	1,91	7,50	9,55
20.	Palmas	Tocantis	x	Goiânia	Goiás	1,50	1,91	7,50	9,55

Fonte: Autoria própria (2024).

Diante os dados obtidos é possível estimar que para essa tripulação ultrapassar os limites de dose recomendados, seria necessário um total mínimo de 8.436 horas de trabalho, o que corresponde a aproximadamente 8 anos e 9 meses de atividade consecutiva. Esse mesmo cenário pode ser observado em viagens de longa duração realizadas em voos nacionais interestaduais.

Nessa perspectiva, em voos interestaduais as doses efetiva e corporal, tanto anuais quanto quinquenais são ainda menores que as internacionais, ou seja, também não causam impactos substantivos à saúde dessa tripulação, além de permanecerem dentro do limite de dose recomendados pelos órgãos competentes.

CONCLUSÕES

As simulações de voos e os dados obtidos por meio de ferramentas como o EXPACS e o IRSN fornecem uma análise detalhada das doses de radiação efetiva e corporal recebidas em diferentes altitudes e rotas de voos comerciais. A similaridade entre os valores de dose efetiva calculados por ambos os softwares reforça a consistência e a robustez dos dados, tornando as estimativas mais confiáveis.

As doses efetivas calculadas por essas ferramentas permanecem dentro dos limites recomendados pela ICRP (Comissão Internacional de Proteção Radiológica) e pela CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) para a tripulação de aeronaves comerciais. Destacam-se as rotas internacionais de longa distância, como Teresina – Hong Kong e Guarulhos - Tóquio, que apresentam as maiores doses efetivas, refletindo a exposição elevada à radiação cósmica.

Para o público geral e grupos sensíveis, como mulheres grávidas, a exposição à radiação continua sendo uma preocupação. Em um cenário hipotético, seriam necessárias múltiplas viagens longas para atingir os limites de exposição anuais estabelecidos. Por exemplo, seriam necessários pelo menos 17 voos de Teresina para a Hong Kong ou 104 voos de Natal para Rio Branco para atingir o limite de 1 mSv por ano para mulheres grávidas.

A exposição cumulativa ao longo dos anos requer monitoramento contínuo e a implementação de políticas de proteção radiológica específicas para mitigar os potenciais efeitos adversos à saúde, como o aumento do risco de câncer. É fundamental o desenvolvimento de protocolos de proteção para a tripulação e passageiros, utilizando tecnologias de monitoramento contínuo e estabelecendo limites de exposição específicos para diferentes situações de voo.

Em conclusão, este estudo destaca a importância de uma abordagem proativa e colaborativa para gerenciar os riscos da radiação cósmica na aviação civil. A utilização de ferramentas precisas de monitoramento e simulação, junto com a implementação de medidas preventivas e o aprimoramento contínuo das políticas de proteção, são essenciais para assegurar que a exposição à radiação cósmica seja mantida dentro dos limites seguros, protegendo a saúde dos profissionais da aviação e dos passageiros.

REFERÊNCIAS

ABEAR. Associação Brasileira das Empresas Aéreas. **Quais são as alturas e velocidades alcançadas por um avião durante um voo?**. 2018. Disponível em: <https://www.abear.com.br/imprensa/agencia-abear/noticias/quais-sao-as-alturas-e-velocidades-alcancadas-por-um-aviao-durante-um-voo/>. Acesso em: 23 dez. 2024.

ALEXANDRE, F. A.; FARIA, J. A. F.; CARDOSO, C. F. Título do artigo. **Ciência Agrícola**, São Paulo, v. 45, n. 3, p. 123-130, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500025>. Acesso em: 10 out. 2024.

BALOGH, T. S.; VELASCO, M. V. R.; PEDRIALI, C. A.; KANEKO, T. M.; BABY, A. R. Proteção à radiação ultravioleta: recursos disponíveis na atualidade em fotoproteção. **Anais Brasileiros De Dermatologia**, v. 86, n. 4, p. 732–742, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0365-05962011000400016>. Acesso em: 14 nov. 2024.

BAUR, S., SANDERSON, B. M.; SÉFÉRIAN, R; TERRAY, L. (2024). **Solar radiation modification challenges decarbonization with renewable solar energy**. *Earth System Dynamics*, 15(2), 307-322. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/esd-15-307-2024>. Acesso em: 14 nov. 2024.

BRASIL. **LEI nº 13.475, de 28 de agosto de 2017, Seção V, Art.33**. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13475.htm. Acesso em: 12 jul. 2024.

BUSHBERG, J. T. The national council on radiation protection and measurements. Exposição e contaminação radioativa. Revisado/corrigido: nov. 2022. **Manual MSD Versão para Profissionais de Saúde**. Disponível em: <https://www.msmanuals.com/pt/profissional/les%C3%B5es-intoxica%C3%A7%C3%A3o/exposi%C3%A7%C3%A3o-e-contamina%C3%A7%C3%A3o-radioativa/exposi%C3%A7%C3%A3o-e-contamina%C3%A7%C3%A3o-radioativa>. Acesso em: 26 nov. 2024.

CASTRO, R. C. **Cálculo de Dose Equivalente em Órgãos de Pacientes devido a Fótons e Nêutrons Gerados em Aceleradores Lineares Clínicos**. [Rio de Janeiro], 2005. ix, 77 p. 29,7 cm. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005. Disponível em: http://antigo.nuclear.ufrj.br/MSc%20Dissertacoes/Robson%20Costa/Tese_robson.pdf. Acesso em: 11 dez. 2024.

CHRISTOVAM, A. C. M.; MACHADO, O. **Manual de Física e proteção radiológica**. Rio de Janeiro/RJ: Senac, 2013. 232 p.

CLARKE, R. H.; VALENTIN, J. The History of ICRP and the Evolution of its Policies. **Annals of the ICRP**, ICRP Publication 109. Elsevier. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2009.07.009>. Acesso em: 26 nov. 2024.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Norma CNEN NN 3.01**. Resolução 164/14. março / 2014: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Brasília, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-nrm301.pdf>. Acesso em: 15 set. 2024.

COPELAND, K. A. **Cosmic ray particle fluences in the atmosphere resulting from primary cosmic ray heavy ions and their resulting effects on dose rates to aircraft occupants as calculated with mcnp 2.7.0.** A Thesis Submitted to the Division of Graduate Studies of the Royal Military College of Canada, 2014. Disponível em: https://espace.rmc.ca/jspui/bitstream/11264/182/1/TH600_final_KAC.pdf. Acesso em: 29 ago. 2024.

DAFRE, A. L.; MARIS, A. F. **Efeitos biológicos da radiação.** 1ª ed., 2ª reimpr. Florianópolis: BIOLOGIA/EAD/UFSC, 2013. Disponível em: <https://antigo.uab.ufsc.br/biologia//files/2020/08/Efeitos-Biol%C3%B3gicos-das-Radia%C3%A7%C3%B5es.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2024.

FEDERICO, C. A.; Gonçalves O. L.; SORDI G. M.; CALDAS L. V. E. **Considerações a respeito de proteção radiológica de tripulações de aeronaves no Brasil.** Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/081/42081710.pdf. Acesso em: 27 ago. 2024.

FEDERICO, C. A. **Dosimetria da radiação cósmica no interior de aeronaves no espaço aéreo brasileiro.** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.85.2011.tde-26012012-104504>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FIOCRUZ. **Radiação.** 2024. Disponível em: <https://fiocruz.br/biosseguranca/Bis/virtual%20tour/hipertextos/up1/radiacao.html>. Acesso em: 26 nov. 2024.

FISCHER, A. C. F. S.; MOREIRA, M. N.; BACELAR, A. Avaliação das doses no cristalino de indivíduos ocupacionalmente expostos em um serviço de PET/CT. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 6, n. 2-B, p. 01-13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15392/bjrs.v6i2B.450>. Acesso em: 02 fev. 2025.

GONZALES, A. H. L. **Estudo experimental das relações entre Kerma no ar e equivalente de dose ambiente em barreiras secundárias de salas radiológicas.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Departamento de Física Nuclear, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.43.2014.tde-02022015-133946>. Acesso em: 01 dez. 2024.

ICRP. Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation. **Annals of the ICRP**, ICRP Publication 132, v. 45, n. 1, p. 1-49, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0146645316645449>. Acesso em: 27 nov. 2024.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. **Annals of the ICRP**. Elsevier. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_37_2-4. Acesso em: 23 jan. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER (INCA). **Tratamento do câncer de mama: diretrizes para profissionais de saúde.** Rio de Janeiro: INCA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inca/pt-br>. Acesso em: 27 nov. 2024.

IRSN. Institut De Radioprotection Et De Sûreté Nucléaire. **Compagnies aériennes : fini le calcul des doses**. 01 out. 2014. Disponível em: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/sante/compagnies-aeriennes-fini-calcul-doses>. Acesso em: 07 jan. 2025.

MARTINS, R. A. Hipóteses e interpretação experimental: a conjectura de Poincaré e a descoberta da hiperfosforescência por Becquerel e Thompson. **Ciência & Educação**, v. 10, n. 3, p. 501-516, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-73132004000300013>. Acesso em: 26 out. 2024.

NAVARRO, M. V. T. et al. Controle de riscos à saúde em raiodiagnóstico: uma perspectiva histórica. **História, Ciências, Saúde – Manguinhos**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 4, p. 1039-1047, out.-dez. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-59702008000400009>. Acesso em: 24 nov. 2024.

OKUNO, E. **Efeitos biológicos das radiações ionizantes**. *Estudos Avançados*, v. 27, n. 77, p. 41-58, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142013000100014>. Acesso em: 10 mar. 2025.

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

OLIVEIRA, A. G. et al. Raios cósmicos e a heliosfera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 2, 2316 (2014). Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, Brasil. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000200016>. Acesso em: 22 jan. 2025.

PAZIANOTTO, M. T. **Transporte da radiação cósmica na anomalia magnética do Atlântico Sul e aplicação em aeronáutica**. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2015. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/esol/pazzianoto.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2024.

REPÚBLICA FRANCESA; IRSN. **Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire**. Disponível em: <https://www.sievert-system.org/?locale=en#Calcul>. Acesso em: 10 jul. 2024.

REED, A. B. (2011). **The history of radiation use in medicine**. *Journal of vascular surgery*, PubMed. 53(1), 3S-5S. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2010.07.024>. Acesso em: 10 jul. 2024.

RIBEIRO, D. **Datação por carbono-14**. *Rev. Ciência Elem.*, V3(4):230. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.24927/rce2015.230>. Acesso em: 10 jul. 2024.

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

SERPOLLA, A. **Real-time monitoring of Solar Energetic Particles with Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station**. University of Perugia Department of Physics and Geology. Master in Physics, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/instruments7040038>. Acesso em: 23 jan. 2025.

TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, M. A. R. R. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10ª revisão, abril/2014. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014. 344 p. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf. Acesso em: 01 dez. 2024.

WHITE, R. D. **A high-altitude nuclear environment simulation**. B.S., Kansas State University, 2009. Department of Mechanical and Nuclear Engineering, College of Engineering. Disponível em: <https://krex.k-state.edu/server/api/core/bitstreams/2a9c0d0b-63c6-4c8c-9e3c-61c280a35c2f/content>. Acesso em: 09 jan. 2025.

XAVIER, A. M. et al. **Marcos da história da radioatividade e tendências atuais**. Quim. Nova, v. 30, n. 1, p. 83-91, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000100019>. Acesso em: 22 out. 2024.

ANEXOS

SIMULAÇÕES DAS ROTAS NACIONAIS												
Rota	intervalos	comprimento km	vel. média km/h	intervalo de temp h	tx.dos. inc. (dose efetiva)	tx. dos. Final (dose efetiva)	tx. de dose efetiva (µSv/h)	tx.dos. inc. (Corporal) (µSv)	tx. dos. Final (Corporal)	taxa de dose corporal (µSv/h)	dose efetiva de trecho (µSv)	dose corporal do trecho (µSv)
CURITIBA X NATAL	PARTIDA CR - P1	500	700	0,71	1,81	1,74	1,77	2,30	2,21	2,25	1,27	1,61
	P1 - P2	500	850	0,59	1,74	1,66	1,70	2,21	2,18	2,19	1,00	1,29
	P2 - P3	500	850	0,59	1,66	1,61	1,64	2,18	2,05	2,11	0,96	1,24
	P3 - P4	500	850	0,59	1,61	1,56	1,58	2,05	1,98	2,02	0,93	1,19
	P7 - CHEGADA PT	646	690	0,94	1,56	1,49	1,52	1,98	1,09	1,54	1,43	1,44
	Média /Total	2646		3,42							5,59	6,77
BELO HORIZONTE X MANAUS	PARTIDA CR - P1	500	630	0,79	1,70	1,61	1,65	2,16	2,05	2,10	1,31	1,67
	P1 - P2	500	850	0,59	1,61	1,55	1,58	2,05	1,98	2,01	0,93	1,18
	P2 - P3	500	850	0,59	1,55	1,50	1,53	1,98	1,92	1,95	0,90	1,14
	P3 - P4	500	850	0,59	1,50	1,47	1,49	1,92	1,88	1,90	0,88	1,12
	P7 - CHEGADA PT	545	630	0,87	1,47	1,46	1,47	1,88	1,86	1,87	1,27	1,62
	Média /Total	2545		3,42							5,28	6,73
FLORIANÓPOLIS X RIO BRANCO	PARTIDA CR - P1	500	470	1,06	1,88	1,75	1,82	2,38	2,23	2,31	1,93	2,45
	P1 - P2	500	850	0,59	1,75	1,64	1,70	2,23	2,09	2,16	1,00	1,27
	P2 - CH1	319	455	0,70	1,64	1,59	1,62	2,09	2,03	2,06	1,13	1,44
	CH1 - P3	500	470	1,06	1,59	1,56	1,57	2,03	1,98	2,01	1,68	2,13
	P3 - P4	500	850	0,59	1,56	1,54	1,55	1,98	1,96	1,97	0,91	1,16
	P4 - P5	500	850	0,59	1,54	1,51	1,52	1,96	1,93	1,94	0,90	1,14
	P5 - P6	500	850	0,59	1,51	1,50	1,51	1,93	1,91	1,92	0,89	1,13
	P6 - CHF	267	470	0,57	1,50	1,49	1,50	1,91	1,90	1,91	0,85	1,08
	Média /Total	3586		5,75							9,28	11,82
GUARULHOS X FERNANDO DE NORONHA	PARTIDA CR - P1	500	440	1,14	1,78	1,70	1,74	2,26	2,16	2,21	1,98	2,51
	P1 - P2	500	850	0,59	1,70	1,64	1,67	2,16	2,09	2,13	0,98	1,25
	P2 - P3	500	850	0,59	1,64	1,59	1,62	2,09	2,02	2,06	0,95	1,21
	P3 - P4	500	850	0,59	1,59	1,54	1,56	2,02	1,96	1,99	0,92	1,17
	P4 - P5	93	425	0,22	1,54	1,53	1,53	1,96	1,95	1,95	0,34	0,43
	CH1 - CH2	550	425	1,29	1,53	1,47	1,50	1,95	1,88	1,91	1,94	2,47
	Média /Total	2643		4,41							7,11	9,05
NATAL X RIO BRANCO	PARTIDA - P1	500	400	1,25	1,49	1,53	1,51	1,90	1,95	1,92	1,89	2,40
	P1 - P2	500	850	0,59	1,53	1,55	1,54	1,95	1,98	1,96	0,91	1,15
	P2 - P3	500	850	0,59	1,55	1,58	1,57	1,98	2,01	2,00	0,92	1,17
	P3 - CH1	273	390	0,70	1,58	1,59	1,59	2,01	2,03	2,02	1,11	1,41
	CH1 - P4	500	395	1,27	1,59	1,56	1,58	2,03	1,99	2,01	1,99	2,54

	P4 - P5	500	850	0,59	1,56	1,54	1,55	1,99	1,96	1,97	0,91	1,16
	P5 - P6	500	850	0,59	1,54	1,51	1,52	1,96	1,93	1,94	0,90	1,14
	P6 - CH2	265	390	0,68	1,51	1,50	1,51	1,93	1,91	1,92	1,02	1,31
	Média /Total	3538		6,25							9,65	12,30
CAMPO GRANDE X RECIFE	PARTIDA - P2	500	460	1,09	1,65	1,63	1,64	2,10	2,07	2,09	1,78	2,27
	P2 - P3	500	850	0,59	1,63	1,60	1,62	2,07	2,04	2,06	0,95	1,21
	P3 - P4	500	850	0,59	1,60	1,58	1,59	2,04	2,02	2,03	0,94	1,19
	P5 - P6	500	850	0,59	1,58	1,56	1,57	2,02	1,99	2,00	0,92	1,18
	P7 - P8	530	460	1,15	1,56	1,53	1,55	1,99	1,95	1,97	1,78	2,27
	Média /Total	2530		4,00							6,37	8,12
BELÉM X GUARULHOS	PARTIDA - P2	500	650	0,77	1,44	1,48	1,46	1,85	1,88	1,86	1,12	1,43
	P2 - P3	500	850	0,59	1,48	1,52	1,50	1,88	1,94	1,91	0,88	1,13
	P3 - P4	500	850	0,59	1,52	1,58	1,55	1,94	2,02	1,98	0,91	1,17
	P5 - P6	500	850	0,59	1,58	1,66	1,62	2,02	2,12	2,07	0,96	1,22
	P7 - P8	464	580	0,80	1,66	1,78	1,72	2,12	2,27	2,19	1,38	1,75
	Média /Total	2464		3,33							5,25	6,69
JOÃO PESSOA X CAMPINAS	PARTIDA - P2	500	520	0,96	1,52	1,57	1,54	1,55	1,93	1,74	1,48	1,68
	P2 - P3	500	850	0,59	1,57	1,62	1,59	1,93	2,06	2,00	0,94	1,17
	P3 - P4	500	850	0,59	1,62	1,67	1,64	2,06	2,12	2,09	0,97	1,23
	P5 - P6	500	850	0,59	1,67	1,74	1,70	2,12	2,21	2,17	1,00	1,27
	P7 - P8	196	445	0,44	1,74	1,77	1,76	2,21	2,25	2,23	0,77	0,98
	Média /Total	2196		3,17							5,16	6,34
TERESINA X GUARULHOS	PARTIDA - P2	500	550	0,91	1,48	1,52	1,50	1,89	1,94	1,91	1,36	1,74
	P2 - P3	500	850	0,59	1,52	1,58	1,55	1,94	2,02	1,98	0,91	1,16
	P3 - P4	500	850	0,59	1,58	1,66	1,62	2,02	2,11	2,06	0,95	1,21
	P4 - P5	582	500	1,16	1,66	1,78	1,72	2,11	2,27	2,19	2,00	2,55
	Média /Total	2082		3,25							5,23	6,66
PORTO VELHO X RECIFE	PARTIDA - P2	500	420	1,19	1,49	1,49	1,49	1,90	1,91	1,90	1,77	2,26
	P2 - P3	500	840	0,60	1,49	1,49	1,49	1,91	1,91	1,91	0,89	1,13
	P3 - P4	500	840	0,60	1,49	1,50	1,50	1,91	1,92	1,91	0,89	1,14
	P4 - P5	500	840	0,60	1,50	1,51	1,51	1,92	1,92	1,92	0,90	1,14
	P5 - P6	500	840	0,60	1,51	1,52	1,51	1,92	1,94	1,93	0,90	1,15
	P6 - P7	500	840	0,60	1,52	1,53	1,52	1,94	1,95	1,94	0,91	1,16
	P7 - P8	190	380	0,50	1,53	1,58	1,56	1,95	1,95	1,95	0,78	0,97
	Média /Total	3190		4,67							7,04	8,96
ARACAJU X GUARULHOS	PARTIDA - P2	500	500	1,00	1,57	1,62	1,60	2,01	2,07	2,04	1,60	2,04
	P2 - P3	500	850	0,59	1,62	1,68	1,65	2,07	2,14	2,10	0,97	1,24
	P3 - P4	500	850	0,59	1,68	1,75	1,71	2,14	2,22	2,18	1,01	1,28
	P4 - P5	207	360	0,58	1,75	1,78	1,77	2,22	2,27	2,24	1,02	1,29
	Média /Total	1707		2,75							4,59	5,84
MACAPÁ X GUARULHOS	PARTIDA - P2	500	590	0,85	1,44	1,84	1,64	1,46	1,84	1,65	1,39	1,40
	P2 - P3	500	850	0,59	1,84	1,50	1,67	1,84	1,91	1,88	0,98	1,10

	P3 - P4	500	850	0,59	1,50	1,55	1,53	1,91	1,98	1,95	0,90	1,15
	P4 - P5	500	850	0,59	1,55	1,62	1,59	1,98	2,07	2,02	0,93	1,19
	P5 - P6	661	510	1,30	1,62	1,78	1,70	2,07	2,26	2,16	2,21	2,81
	Média /Total	2661		3,91							6,41	7,64
MACEIÓ X CURITIBA	PARTIDA - P2	500	520	0,96	1,55	1,60	1,57	1,97	2,03	2,00	1,51	1,93
	P2 - P3	500	850	0,59	1,60	1,64	1,62	2,03	2,09	2,06	0,95	1,21
	P3 - P4	500	850	0,59	1,64	1,71	1,68	2,09	2,17	2,13	0,99	1,25
	P4 - P5	500	850	0,59	1,71	1,78	1,74	2,17	2,26	2,22	1,03	1,30
	P5 - P6	276	450	0,61	1,78	1,81	1,79	2,26	2,30	2,28	1,10	1,40
	Média /Total	2276		3,34							5,40	7,09
SALVADOR X PORTO ALEGRE	PARTIDA - P2	500	450	1,11	1,59	1,65	1,62	2,03	2,10	2,06	1,80	2,29
	P2 - P3	500	800	0,63	1,65	1,72	1,69	2,10	2,19	2,14	1,05	1,34
	P3 - P4	500	800	0,63	1,72	1,80	1,76	2,19	2,28	2,24	1,10	1,40
	P4 - P5	500	800	0,63	1,80	1,88	1,84	2,28	2,38	2,33	1,15	1,46
	P5 - P6	316	375	0,84	1,88	1,93	1,90	2,38	2,44	2,41	1,60	2,03
	Média /Total	2316		3,83							6,70	8,52
FORTALEZA X RIO DE JANEIRO	PARTIDA - P2	500	450	1,11	1,47	1,52	1,49	1,87	1,94	1,90	1,66	2,11
	P2 - P3	500	850	0,59	1,52	1,58	1,55	1,94	2,01	1,97	0,91	1,16
	P3 - P4	500	850	0,59	1,58	1,65	1,62	2,01	2,10	2,06	0,95	1,21
	P4 - P5	500	850	0,59	1,65	1,75	1,70	2,10	2,23	2,16	1,00	1,27
	P5 - P6	178	400	0,45	1,75	1,80	1,78	2,23	2,29	2,26	0,79	1,00
	Média /Total	2178		3,32							5,31	6,76
VITÓRIA X FORTALEZA	PARTIDA - P2	500	650	0,77	1,76	1,68	1,72	2,23	2,14	2,18	1,32	1,68
	P2 - P3	500	850	0,59	1,68	1,59	1,64	2,14	2,03	2,08	0,96	1,22
	P3 - P4	500	850	0,59	1,59	1,52	1,56	2,03	1,94	1,98	0,92	1,17
	P4 - P5	345	545	0,63	1,52	1,47	1,49	1,94	1,87	1,90	0,95	1,21
	Média /Total	1845		2,58							4,14	5,28
BRASÍLIA X BOA VISTA	PARTIDA - P2	500	550	0,91	1,60	1,54	1,57	2,03	1,96	2,00	1,42	1,81
	P2 - P3	500	850	0,59	1,54	1,50	1,52	1,96	1,91	1,93	0,89	1,14
	P3 - P4	500	850	0,59	1,50	1,47	1,48	1,91	1,87	1,89	0,87	1,11
	P4 - P5	500	850	0,59	1,47	1,46	1,46	1,87	1,86	1,87	0,86	1,10
	P5 - P6	500	550	0,91	1,46	1,46	1,46	1,86	1,86	1,86	1,33	1,69
	Média /Total	2500		3,58							5,37	6,86
SÃO LUÍZ X GUARULHOS	PARTIDA - P2	500	500	1,00	1,45	1,49	1,47	1,85	1,90	1,87	1,47	1,87
	P2 - P3	500	850	0,59	1,49	1,54	1,52	1,90	1,97	1,93	0,89	1,14
	P3 - P4	500	850	0,59	1,54	1,61	1,58	1,97	2,05	2,01	0,93	1,18
	P4 - P5	500	850	0,59	1,61	1,71	1,66	2,05	2,17	2,11	0,98	1,24
	P5 - P6	333	450	0,74	1,71	1,78	1,75	2,17	2,27	2,22	1,29	1,64
	Média /Total	2333		3,50							5,56	7,08
CUIABÁ X MACEIÓ	PARTIDA - P2	500	550	0,91	1,57	1,56	1,57	2,00	1,99	1,99	1,42	1,81
	P2 - P3	500	850	0,59	1,56	1,56	1,56	1,99	1,99	1,99	0,92	1,17

	P3 - P4	500	850	0,59	1,56	1,55	1,56	1,99	1,98	1,98	0,92	1,17
	P4 - P5	500	850	0,59	1,55	1,56	1,56	1,98	1,98	1,98	0,91	1,17
	P5 - P6	310	470	0,66	1,56	1,55	1,55	1,98	1,98	1,98	1,02	1,31
	Média /Total	2310		3,33							5,20	6,62
PALMAS X GOIÂNIA	PARTIDA - P2	500	310	1,61	1,52	1,58	1,55	1,94	2,01	1,98	2,50	3,19
	P2 - P3	211	300	0,70	1,58	1,61	1,60	2,01	2,05	2,03	1,12	1,43
	Média /Total	711		2,32							3,62	4,61

SIMULAÇÕES DAS ROTAS INTERNACIONAIS												
Rota	intervalos	comprimento km	vel. média km/h	intervalo de tempo h	tx.dos. inc. (dose efetiva)	tx. dos. Final (dose efetiva)	tx. de dose efetiva (µSv/h)	tx.dos. inc. (Corporal) (µSv)	tx. dos. Final (Corporal)	taxa de dose corporal (µSv/h)	dose efetiva de trecho (µSv)	dose corporal do trecho (µSv)
RIO DE JANEIRO X NOVA IORQUE	PARTIDA RJ - P1	1000	700	1,43	1,80	1,58	1,69	2,29	2,01	2,15	2,41	3,07
	P1 - P2	1000	850	1,18	1,58	1,48	1,53	2,01	1,89	1,95	1,80	2,29
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,48	1,44	1,46	1,89	1,84	1,86	1,71	2,19
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,44	1,48	1,46	1,84	1,89	1,86	1,71	2,19
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,48	1,67	1,57	1,89	2,12	2,00	1,85	2,36
	P5 - P6	1000	850	1,18	1,67	2,34	2,00	2,12	2,95	2,53	2,36	2,98
	P6 - P7	1000	850	1,18	2,34	3,16	2,75	2,95	3,94	3,44	3,23	4,05
	P7 -CHEGADA NY	740	700	1,06	3,16	3,69	3,43	3,94	4,55	4,24	3,62	4,49
	Média /Total	7740		9,54							18,70	23,61
SÃO PAULO X LISBOA	PARTIDA SP - P1	1000	700	1,43	1,78	1,62	1,70	2,26	2,06	2,16	2,43	3,09
	P1 - P2	1000	850	1,18	1,62	1,52	1,57	2,06	1,93	2,00	1,84	2,35
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,52	1,43	1,47	1,93	1,82	1,88	1,73	2,21
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,43	1,37	1,40	1,82	1,76	1,79	1,65	2,11
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,37	1,37	1,37	1,76	1,76	1,76	1,61	2,07
	P5 - P6	1000	850	1,18	1,37	1,69	1,53	1,76	2,15	1,95	1,80	2,29
	P6 - P7	1000	850	1,18	1,69	3,14	2,41	2,15	3,71	2,93	2,84	3,44
	P7 -CHEGADA PT	945	700	1,35	3,14	3,29	3,21	3,71	3,91	3,81	4,34	5,14
	Média /Total	7945		9,84							18,24	22,69
SÃO PAULO X TÓQUIO	PARTIDA SP - P1	1000	700	1,43	1,78	1,60	1,69	2,26	2,04	2,15	2,42	3,07
	P1 - P2	1000	850	1,18	1,60	1,93	1,76	2,04	1,51	1,78	2,08	2,09
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,93	1,47	1,70	1,51	1,88	1,70	2,00	2,00
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,47	1,48	1,48	1,88	1,89	1,89	1,74	2,22
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,48	1,55	1,51	1,89	1,97	1,93	1,78	2,27
	P5 - P6	1000	850	1,18	1,55	1,76	1,65	1,97	2,23	2,10	1,94	2,47
	P6 - P7	1000	850	1,18	1,76	2,22	1,99	2,23	2,80	2,51	2,34	2,96
	P7 -P8	1000	850	1,18	2,22	2,25	2,23	2,80	2,85	2,82	2,63	3,32
	P8 - P9	1000	700	1,43	2,25	2,56	2,40	2,85	3,21	3,03	3,43	4,33

	P9 - P10	1000	700	1,43	2,56	2,75	2,65	3,21	3,45	3,33	3,79	4,76
	P10 - P11	1000	850	1,18	2,75	2,95	2,85	3,45	3,69	3,57	3,35	4,20
	P11 - P12	1000	850	1,18	2,95	3,09	3,02	3,69	3,86	3,77	3,55	4,44
	P12 - P13	1000	850	1,18	3,09	3,13	3,11	3,86	3,90	3,88	3,65	4,56
	P13 - P14	1000	850	1,18	3,13	3,04	3,08	3,90	3,80	3,85	3,62	4,53
	P14 - P15	1000	850	1,18	3,04	2,91	2,97	3,80	3,64	3,72	3,50	4,38
	P15 - P16	1000	850	1,18	2,91	2,64	2,78	3,64	3,32	3,48	3,26	4,10
	P16 - P17	1000	850	1,18	2,64	2,20	2,42	3,32	2,78	3,05	2,85	3,59
	P17 - P18	1000	850	1,18	2,20	1,79	2,00	2,78	2,28	2,53	2,35	2,97
	P18 - CHEGADA JP	690	700	0,99	1,79	1,62	1,71	2,28	2,07	2,17	1,68	2,14
	Média /Total	18690		22,92							51,96	64,37
SÃO PAULO X DUBAI	PARTIDA SP - P1	1000	700	1,43	1,78	1,77	1,78	2,26	2,25	2,26	2,54	3,22
	P1 - P2	1000	850	1,18	1,77	1,74	1,76	2,25	2,21	2,23	2,06	2,62
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,74	1,66	1,70	2,21	2,11	2,16	2,00	2,54
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,66	1,56	1,61	2,11	1,98	2,05	1,89	2,41
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,56	1,46	1,51	1,98	1,86	1,92	1,77	2,26
	P5 - P6	1000	850	1,18	1,46	1,36	1,41	1,86	1,75	1,80	1,66	2,12
	P6 - P7	1000	850	1,18	1,36	1,30	1,33	1,75	1,67	1,71	1,57	2,01
	P7 -P8	1000	850	1,18	1,30	1,26	1,28	1,67	1,62	1,64	1,51	1,93
	P8 - P9	1000	850	1,18	1,26	1,25	1,26	1,62	1,61	1,61	1,48	1,90
	P9 - P10	1000	850	1,18	1,25	1,26	1,25	1,61	1,62	1,61	1,47	1,90
	P10 - P11	1000	850	1,18	1,26	1,28	1,27	1,62	1,64	1,63	1,49	1,92
	P11 - P12	1000	850	1,18	1,28	1,31	1,29	1,64	1,68	1,66	1,52	1,95
	P12 - CHEGADA	231	700	0,33	1,31	1,32	1,31	1,68	1,69	1,68	0,43	0,56
	Média /Total	12231		14,70			0,00				21,39	27,34
RIO DE JANEIRO X INGLATERRA	PARTIDA SP - P1	1000	700	1,43	1,80	1,62	1,71	2,29	2,06	2,17	2,44	3,10
	P1 - P2	1000	850	1,18	1,62	1,50	1,56	2,06	1,92	1,99	1,83	2,34
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,50	1,41	1,46	1,92	1,81	1,86	1,71	2,19
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,41	1,37	1,39	1,81	1,75	1,78	1,64	2,09
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,37	1,39	1,38	1,75	1,78	1,76	1,62	2,08
	P5 - P6	1000	850	1,18	1,39	1,52	1,45	1,78	1,94	1,86	1,71	2,18
	P6 - P7	1000	850	1,18	1,52	1,80	1,66	1,94	2,29	2,11	1,95	2,48
	P7 -P8	1000	850	1,18	1,80	2,59	2,19	2,29	3,25	2,77	2,58	3,26
	P8 - P9	1000	850	1,18	2,59	3,29	2,94	3,25	4,09	3,67	3,45	4,32
	P9 - CHEGADA ING	264	700	0,38	3,29	3,46	3,37	4,09	4,29	4,19	1,27	1,58
	Média /Total	9264		11,22							20,22	25,62
BELÉM X BARILOCHE	PARTIDA - P2	500	700	0,71	1,44	1,48	1,46	1,85	1,88	1,86	1,04	1,33
	P2 - P3	500	850	0,59	1,48	1,52	1,50	1,88	1,94	1,91	0,88	1,13
	P3 - P4	500	850	0,59	1,52	1,58	1,55	1,94	2,02	1,98	0,91	1,17
	P4 - P5	500	850	0,59	1,58	1,66	1,62	2,02	2,12	2,07	0,96	1,22
	P5 - P6	464	350	1,33	1,66	1,78	1,72	2,12	2,27	2,19	2,28	2,91
	P6 - P7	1000	700	1,43	1,78	1,88	1,83	2,27	2,39	2,33	2,62	3,32
	P7 - P8	1000	850	1,18	1,88	1,98	1,93	2,39	2,51	2,45	2,27	2,88
	P8 - PF	1032	700	1,47	1,98	2,05	2,02	2,51	2,59	2,55	2,97	3,77
	Média /Total	5496		7,88							13,95	17,72
BRASÍLIA X CANCÚN	PARTIDA - P2	1000	465	2,15	1,60	1,50	1,55	2,03	1,92	1,97	3,33	4,25
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,50	1,47	1,49	1,92	1,87	1,90	1,75	2,23
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,47	1,48	1,47	1,87	1,89	1,88	1,73	2,21

	P4 - P5	1000	850	1,18	1,48	1,57	1,53	1,89	2,00	1,95	1,79	2,29
	P5 - P6	1000	850	1,18	1,57	1,99	1,78	2,00	2,52	2,26	2,09	2,66
	P6 - P7	915	465	1,97	1,99	2,35	2,17	2,52	2,96	2,74	4,26	5,39
	Média /Total	5915		8,82						14,96	19,02	
SALVADOR X PARÍS	PARTIDA - P2	1000	580	1,72	1,60	1,49	1,54	2,03	1,90	1,96	2,66	3,39
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,49	1,40	1,44	1,90	1,80	1,85	1,70	2,17
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,40	1,37	1,38	1,80	1,75	1,77	1,63	2,08
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,37	1,38	1,37	1,75	1,76	1,75	1,61	2,06
	P5 - P6	1000	850	1,18	1,38	1,50	1,44	1,76	1,91	1,84	1,69	2,16
	P6 - P7	1000	850	1,18	1,50	1,76	1,63	1,91	2,24	2,07	1,92	2,44
	P7 - P8	1000	850	1,18	1,76	2,34	2,05	2,24	2,95	2,59	2,41	3,05
	P8 - P9	945	580	1,63	2,34	3,17	2,75	2,95	3,95	3,45	4,49	5,62
	Média /Total	7945		10,41						18,11	22,98	
BELO HORIZONTE X PANAMÁ	PARTIDA - P2	1000	640	1,56	1,70	1,56	1,63	2,17	1,99	2,08	2,55	3,25
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,56	1,49	1,53	1,99	1,90	1,95	1,80	2,29
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,49	1,47	1,48	1,90	1,87	1,89	1,74	2,22
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,47	1,50	1,48	1,87	1,91	1,89	1,74	2,23
	P5 - P6	1040	640	1,63	1,50	1,60	1,55	1,91	2,04	1,97	2,51	3,21
	Média /Total	5040		6,72						10,35	13,19	
RECIFE X SANTIAGO	PARTIDA - P2	1000	550	1,82	1,53	1,60	1,56	1,95	2,04	1,99	2,84	3,62
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,60	1,67	1,64	2,04	2,13	2,08	1,93	2,45
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,67	1,74	1,71	2,13	2,21	2,17	2,01	2,55
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,74	1,80	1,77	2,21	2,28	2,25	2,08	2,64
	P5 - P6	634	550	1,15	1,80	1,82	1,81	2,28	2,31	2,30	2,09	2,65
	Média /Total	4634		6,50						10,95	13,92	
PORTO ALEGRE X LIMA	PARTIDA - P2	1000	525	1,90	1,93	1,71	1,82	2,45	2,18	2,31	3,47	4,40
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,71	1,58	1,65	2,18	2,01	2,09	1,94	2,46
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,58	1,51	1,54	2,01	1,92	1,97	1,82	2,31
	P4 - P5	341	525	0,65	1,51	1,50	1,50	1,92	1,91	1,92	0,98	1,24
	Média /Total	3341		4,91						8,20	10,43	
FLORIANÓPOLIS X MONTREAL	PARTIDA - P2	517	465	1,11	1,88	1,78	1,83	2,39	2,27	2,33	2,04	2,59
	P2 - P3	1000	850	1,18	1,78	1,58	1,68	2,27	2,01	2,14	1,98	2,52
	P3 - P4	1000	850	1,18	1,58	1,48	1,53	2,01	1,89	1,95	1,80	2,29
	P4 - P5	1000	850	1,18	1,48	1,44	1,46	1,89	1,84	1,87	1,72	2,20
	P5 - P6	1000	850	1,18	1,44	1,48	1,46	1,84	1,89	1,87	1,72	2,20
	P6 - P7	1000	850	1,18	1,48	1,70	1,59	1,89	2,16	2,03	1,87	2,39
	P7 - P8	1000	850	1,18	1,70	2,42	2,06	2,16	3,05	2,61	2,43	3,07
	P8 - P9	1000	850	1,18	2,42	3,23	2,83	3,05	4,03	3,54	3,33	4,16
	P9 - P10	1152	465	2,48	3,23	4,01	3,62	4,03	4,94	4,48	8,97	11,11
	Média /Total	8669		11,82						25,85	32,52	
NATAL X SYDNEY	PARTIDA - P2	500	700	0,71	1,45	1,49	1,47	1,85	1,90	1,87	1,05	1,34
	P2 - P3	500	815	0,61	1,49	1,54	1,52	1,90	1,97	1,93	0,93	1,19
	P3 - P4	500	850	0,59	1,54	1,61	1,58	1,97	2,05	2,01	0,93	1,18
	P4 - P5	500	850	0,59	1,61	1,71	1,66	2,05	2,17	2,11	0,98	1,24
	P5 - P6	333	700	0,48	1,71	1,78	1,75	2,17	2,27	2,22	0,83	1,06
	P6 - P7	1000	700	1,43	1,78	1,74	1,76	2,27	2,21	2,24	2,52	3,20
	P7 - P8	1000	850	1,18	1,74	1,66	1,70	2,21	2,11	2,16	2,00	2,54

	P8 - P9	1000	850	1,18	1,66	1,56	1,61	2,11	1,98	2,05	1,89	2,41
	P9 - P10	1000	850	1,18	1,56	1,46	1,51	1,98	1,86	1,92	1,77	2,26
	P10 - P11	1000	850	1,18	1,46	1,36	1,41	1,86	1,75	1,80	1,66	2,12
	P11 - P12	1000	850	1,18	1,36	1,30	1,33	1,75	1,67	1,71	1,57	2,01
	P12 - P13	1000	850	1,18	1,30	1,26	1,28	1,67	1,62	1,64	1,51	1,93
	P13 - P14	1000	850	1,18	1,26	1,25	1,26	1,62	1,61	1,61	1,48	1,90
	P14 - P15	1000	850	1,18	1,25	1,26	1,25	1,61	1,62	1,61	1,47	1,90
	P15 - P16	1000	850	1,18	1,26	1,28	1,27	1,62	1,64	1,63	1,49	1,92
	P16 - P17	805	700	1,15	1,28	1,33	1,30	1,64	1,71	1,67	1,50	1,92
	P17 - P18	1000	700	1,43	1,33	1,24	1,28	1,71	1,59	1,65	1,83	2,35
	P18 - P19	1000	850	1,18	1,24	1,17	1,20	1,59	1,51	1,55	1,41	1,82
	P19 - P20	1000	850	1,18	1,17	1,13	1,15	1,51	1,46	1,48	1,35	1,74
	P20 - P21	1000	850	1,18	1,13	1,12	1,13	1,46	1,45	1,45	1,32	1,71
	P21 - P22	1000	850	1,18	1,12	1,14	1,13	1,45	1,48	1,46	1,33	1,72
	P22 - P23	1000	850	1,18	1,14	1,20	1,17	1,48	1,55	1,51	1,38	1,78
	P23 - P24	1000	850	1,18	1,20	1,29	1,25	1,55	1,66	1,60	1,47	1,89
	P24 - P25	1000	850	1,18	1,29	1,46	1,38	1,66	1,86	1,76	1,62	2,07
	P25 - P26	1000	850	1,18	1,46	1,72	1,59	1,86	2,18	2,02	1,87	2,38
	P26 - P27	1000	850	1,18	1,72	2,21	1,96	2,18	2,79	2,49	2,31	2,93
	P27 - P28	1000	850	1,18	2,21	2,61	2,41	2,79	3,28	3,03	2,83	3,57
	P28 - P29	1000	850	1,18	2,61	2,88	2,74	3,28	3,61	3,44	3,23	4,05
	P29 - P30	393	700	0,56	2,88	2,95	2,92	3,61	3,70	3,65	1,64	2,05
	Média /Total	25531		31,08							47,16	60,16
TERESINA X HONG KONG	PARTIDA - P2	500	750	0,67	1,48	1,52	1,50	1,89	1,94	1,91	1,00	1,28
	P2 - P3	500	850	0,59	1,52	1,58	1,55	1,94	2,02	1,98	0,91	1,16
	P3 - P4	500	850	0,59	1,58	1,66	1,62	2,02	2,11	2,06	0,95	1,21
	P4 - P5	582	750	0,78	1,66	1,78	1,72	2,11	2,27	2,19	1,34	1,70
	P5 - P6	1000	700	1,43	1,78	1,63	1,71	2,27	2,07	2,17	2,44	3,10
	P6 - P7	1000	850	1,18	1,63	1,52	1,58	2,07	1,94	2,01	1,85	2,36
	P7 - P8	1000	850	1,18	1,52	1,43	1,48	1,94	1,83	1,88	1,74	2,22
	P8 - P9	1000	850	1,18	1,43	1,37	1,40	1,83	1,76	1,79	1,65	2,11
	P9 - P10	1000	850	1,18	1,37	1,37	1,37	1,76	1,75	1,75	1,61	2,06
	P10 - P11	1000	850	1,18	1,37	1,45	1,41	1,75	1,85	1,80	1,66	2,12
	P11 - P12	1000	850	1,18	1,45	1,65	1,55	1,85	2,10	1,97	1,82	2,32
	P12 - P13	1000	850	1,18	1,65	2,05	1,85	2,10	2,59	2,34	2,17	2,76
	P13 - P14	1000	850	1,18	2,05	2,81	2,43	2,59	3,52	3,06	2,86	3,60
	P13 - P15	805	750	1,07	2,81	3,31	3,06	3,52	4,11	3,82	3,28	4,10
	P13 - P16	1000	700	1,43	3,31	3,55	3,43	4,11	4,39	4,25	4,90	6,07
	P13 - P17	1000	850	1,18	3,55	3,62	3,59	4,39	4,47	4,43	4,22	5,21
	P13 - P18	1000	850	1,18	3,62	3,66	3,64	4,47	4,51	4,49	4,28	5,28
	P13 - P19	1000	850	1,18	3,66	3,59	3,62	4,51	4,43	4,47	4,26	5,26
	P13 - P20	1000	850	1,18	3,59	3,35	3,47	4,43	4,17	4,30	4,08	5,06
	P13 - P21	1000	850	1,18	3,35	2,90	3,13	4,17	3,63	3,90	3,68	4,59
	P13 - P22	1000	850	1,18	2,90	2,35	2,62	3,63	2,96	3,30	3,09	3,88
	P13 - P23	1000	850	1,18	2,35	1,71	2,03	2,96	2,17	2,57	2,39	3,02
	P13 - P24	1000	850	1,18	1,71	1,37	1,54	2,17	1,75	1,96	1,81	2,31
	P13 - P25	1170	700	1,67	1,37	1,22	1,29	1,75	1,57	1,66	2,16	2,77

