



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DOSIMETRIA DA RADIAÇÃO CÓSMICA NO INTERIOR DE AERONAVES NO
ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO**

CLAUDIO ANTONIO FEDERICO

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientadora:

Prof.^a Dra. Linda Viola Ehlin Caldas

São Paulo

2011

*Dedico este trabalho aos meus pais José (em memória)
e Diomar, com todo o meu amor e carinho.*

Agradecimentos

À minha orientadora, Dra. Linda Viola Ehlin Caldas, pela orientação, pelo apoio irrestrito, pelo exemplo e pelo incentivo nos momentos difíceis, meu mais sincero agradecimento.

Ao pesquisador Dr. Odair Lélis Gonzalez, pelo apoio, discussões e companheirismo ao longo de todas as etapas do trabalho e pelos inúmeros momentos em que me ajudou nos caminhos da ciência, meu mais sincero agradecimento.

Ao pesquisador Dr. Alexandre David Caldeira pelo constante apoio e incentivo ao longo do trabalho e de minha vida profissional.

Aos pesquisadores Dr. Evaldo S. da Fonseca e Dra. Karla C. de Souza Patrão, pelo apoio nas calibrações dos detectores de nêutrons, pela cessão de um equipamento e pela contribuição em várias etapas do trabalho.

Ao pesquisador Dr. Gian Maria A. A. Sordi pelos valiosos ensinamentos e discussões sobre proteção radiológica.

Ao pesquisador Dr. Roberto David Martinez Garcia pelo apoio nos cálculos estatísticos.

Ao pesquisador Dr. Artur Flávio Dias, pelo apoio e pelo fornecimento dos dados amostrais de horas de voo na região CAR/SAM.

Aos amigos e colaboradores Eng. Marlon A. Pereira e Eng. Heloísa H. C. Pereira, cujos apoios foram fundamentais e imprescindíveis em várias atividades do projeto.

À Sra. Donata Celicea de Oliveira Zanin, pelo companheirismo e pelo apoio sempre presente.

Ao Dr. Marco Silari e ao Dr Markus Brugger do laboratório europeu CERN, que viabilizaram as irradiações necessárias à caracterização dos equipamentos utilizados.

Aos Drs. Clive Dyer e Alexander Hands do laboratório QnetiQ que se interessaram pelo projeto e cederam um equipamento de medida em regime de colaboração.

Ao Professor Dr. Marco Caresana, do Instituto Politécnico de Milão, que se interessou pelo projeto e cedeu um equipamento de medida em regime de colaboração.

Ao Ten-Cel. Av. Alan Elvis de Lima, Diretor do Instituto de Pesquisas e Ensaio em Voo (IPEV), e aos demais pilotos e tripulações do IPEV, pelo apoio nos ensaios experimentais em aeronave.

Aos amigos e colaboradores Fís. Maurício T. Pazianotto e futura Engenheira Adriane C. Mendes, pelos apoios nos ensaios experimentais em voo.

Ao Dr. Antonio Carlos da Cunha Migliano pelo apoio dado por meio do Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos do IEAv.

À Dra. Helen J. Khoury e à equipe do UFPE/DEN pelo valioso apoio na correção dos problemas na leitora de dosímetros termoluminescentes.

Ao Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) e aos pesquisadores e funcionários do Observatório Pico dos Dias (OPD), em especial aos Drs. Tânia Dominici e Rodrigo Prates Campos, pelo apoio em parte das missões experimentais.

Ao *Civil Aerospace Medical Institute*, pertencente ao *Federal Aviation Administration* (FAA) dos EUA que, prestativamente, me forneceu os dados de potencial solar, sempre que solicitados.

Aos meus colegas do IEAv, que suportaram parte de minhas obrigações, para que eu pudesse me dedicar parcialmente ao trabalho de doutorado.

À Direção do IEAv, pelo apoio para a realização do trabalho e das diversas missões e ensaios experimentais.

A todos os funcionários do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), que direta ou indiretamente ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

"A coisa mais indispensável a um homem é reconhecer o uso que deve fazer do seu próprio conhecimento".

Platão

DOSIMETRIA DA RADIAÇÃO CÓSMICA NO INTERIOR DE AERONAVES NO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO

Claudio Antonio Federico

Resumo

Neste trabalho, cujo objetivo foi fornecer subsídios que permitam estabelecer um sistema de dosimetria para as tripulações de aeronaves que operam no território nacional, foi desenvolvida uma técnica para realizar medições do equivalente de dose ambiente em aeronaves. Foi testado um detector ativo, para uso embarcado em aeronaves, avaliando-se sua adequação a este tipo específico de medição, assim como sua suscetibilidade às interferências magnética e eletromagnética. O equipamento foi calibrado em campos metrologicamente rastreados e foi verificado em um campo especial do laboratório europeu CERN, que reproduz com grande proximidade o espectro de partículas existentes em altitudes de voo de aeronaves, sendo a seguir testado em diversos ensaios em voo, em uma aeronave da Força Aérea Brasileira. Os resultados foram avaliados e comparados com aqueles obtidos por diversos programas computacionais de estimativa de dose oriunda de radiação cósmica, com respeito à sua adequação para uso na região da América do Sul e foi selecionado o programa CARI-6 para avaliar as doses efetivas médias estimadas a que estão sujeitas as tripulações que operam nesta região. Foi efetuada uma avaliação estatística da distribuição de doses efetivas das tripulações dos voos que operam na região da América do Sul e Caribe e concluiu-se que grande parte destas tripulações estão sujeitas a doses efetivas anuais que ultrapassam o limite estabelecido para membros do público. Adicionalmente, foi proposto um dosímetro passivo preliminar, baseado em detectores termoluminescentes, e foram ainda estabelecidas colaborações internacionais com grupos de pesquisa do Reino Unido e da Itália, para a realização de medições conjuntas do equivalente de dose ambiente em aeronaves.

COSMIC RADIATION DOSIMETRY ONBOARD AIRCRAFTS AT THE BRAZILIAN AIRSPACE

Claudio Antonio Federico

Abstract

The objective of this work is the establishment of a dosimetric system for the aircrew in the domestic territory. A technique to perform measurements of ambient dose equivalent in aircrafts was developed. An active detector was evaluated for onboard aircraft use, testing its adequacy to this specific type of measurement as well as its susceptibility to the magnetic and electromagnetic interferences. The equipment was calibrated in standard radiation beams and in a special field of the European Laboratory CERN, that reproduces with great proximity the real spectrum in aircraft flight altitudes; it was also tested in several flights, in an Brazilian Air Force's aircraft. The results were evaluated and compared with those obtained from several computational programs for cosmic radiation estimatives, with respect to its adequacy for use in the South American region. The program CARI-6 was selected to evaluate the estimated averaged effective doses for the aircrew who operate in this region. A statistical distribution of aircrew effective doses in South America and Caribe was made, and the results show that a great part of this aircrew members are subjected to annual effective doses that exceed the dose limits for the members of the public. Additionally, a preliminary passive dosimeter, based in thermoluminescent detectors, was proposed; international collaborations with United Kingdom and Italy were established for joint measurements of the ambient equivalent doses in aircrafts.

SUMÁRIO

	Página
1	INTRODUÇÃO 21
1.1	Evolução da proteção radiológica de tripulações no mundo 23
1.2	Considerações sobre proteção radiológica em tripulações brasileiras 26
1.3	Motivação e justificativa 27
1.4	Objetivos 28
1.5	Método de abordagem..... 29
1.6	Roteiro desta tese 30
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS 31
2.1	Radiação Cósmica..... 31
2.1.1	Radiação Cósmica Galáctica (RCG)..... 31
2.1.2	Radiação Cósmica Solar (RCS)..... 32
2.2	Campo geomagnético..... 35
2.3	A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) 39
2.4	Índices geomagnéticos K e Kp 41
2.5	Fluxo de prótons e elétrons solares..... 42
2.6	Atmosfera padrão..... 42
2.7	Interação da radiação cósmica e seus subprodutos com a atmosfera..... 44
2.8	Grandeza dosimétrica limitante: dose efetiva..... 48
2.9	Grandeza dosimétrica operacional: equivalente de dose ambiente 52
2.10	Códigos computacionais para estimativa da dose oriunda da radiação cósmica. 54
2.10.1	AVIDOS 55
2.10.2	CARI-6 56
2.10.3	EPCARD 56
2.10.4	EXPACS 57
2.10.5	PCAIRE..... 57
2.10.6	QARM..... 58
2.10.7	SIEVERT..... 58
2.10.8	Códigos selecionados para utilização..... 59
3	MATERIAIS E MÉTODOS 60
3.1	Detecores ativos..... 60
3.1.1	Sistema de detecção THERMO FH 60

3.1.2	Sistema de detecção QDos	62
3.1.3	Espectrômetro de esferas de Bonner	63
3.1.4	Sistema de detecção <i>Long-counter</i>	65
3.2	Detectores passivos	67
3.2.1	Proposta de um dosímetro baseado em pastilhas termoluminescentes	68
3.2.2	Sistema de detecção baseado em CR39	73
3.3	Sistema de análise TL	75
3.4	Fontes de radiação para calibração dos detectores	75
3.5	Demais sistemas auxiliares de medição e acompanhamento	77
4	RESULTADOS	78
4.1	Preparação da dosimetria termoluminescente	78
4.1.1	Determinação dos fatores de correção individuais (S_i)	80
4.1.2	Determinação do fator de calibração (F_c).....	80
4.1.3	Determinação do fator de estabilidade (F_{st})	82
4.1.4	Determinação do fator de desvanescimento térmico (F_{fad})	83
4.1.5	Fatores de linearidade (F_{lin}) e dependência com a energia (F_{en})	84
4.1.6	Determinação da radiação de fundo	84
4.2	Determinação do espectro de nêutrons em solo	85
4.3	Ensaio de medição de dose em solo	93
4.4	Medições de nêutrons no CERN.....	95
4.4.1	Sistema detector THERMO FH.....	102
4.4.2	Dosímetros baseados em pastilhas termoluminescentes	107
4.5	Calibração do sistema THERMO FH para radiação gama	110
4.6	Testes de compatibilidade e interferência eletromagnética.....	112
4.7	Mensurações do equivalente de dose ambiente em voo	114
4.8	Influência do posicionamento dentro da aeronave	136
4.9	Estimativa do perfil de dose nas regiões da América do Sul e Caribe	138
4.9.1	Características da amostragem	138
4.9.2	Avaliação da distribuição de dose na região CAR/SAM	142
4.9.3	Distribuição de dose anual nas tripulações.....	146
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	152
6	PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	155
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157

ANEXO A - DADOS GEOFÍSICOS.....	164
ANEXO B - ESPECTROS DE FLUÊNCIA.....	168
ANEXO C - CERTIFICADO DE ENSAIO.....	169
ANEXO D - PRINCIPAIS TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A ELABORAÇÃO DESTA TESE.....	172

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Interação das radiações com a matéria.....	47
Tabela 2 - Fatores de ponderação (W_T) recomendados pela publicação 60 da ICRP, para o órgão ou tecido T (ICRP, 1991).....	48
Tabela 3 - Fatores de ponderação (W_R) recomendados pela publicação 60 da ICRP, para o tipo de radiação R (ICRP, 1991).....	49
Tabela 4 - Fatores de ponderação para radiação (W_R), propostos pela ICRP 103 (ICRP, 2007).....	51
Tabela 5 - Fatores de ponderação para tecidos (W_T) propostos pela ICRP 103 (ICRP, 2007).....	52
Tabela 6 – Razão E/H*(10) para diferentes valores de rigidêz de corte vertical e diferentes níveis de voo. A dose efetiva foi calculada desconsiderando os efeitos da aeronave (extraído e adaptado da recomendação ICRU 84 (2010)).	54
Tabela 7 - Características básicas dos códigos de cálculo de dose.	55
Tabela 8 - Principais características da sonda FHT-762 (THERMO-SCIENTIFIC, 2009).62	62
Tabela 9 - Características da esfera ICRU e da esfera de PMMA.	69
Tabela 10 – Origens das incertezas nas medições realizadas com as fontes de nêutrons. ..	76
Tabela 11 - Fontes utilizadas para calibração.	77
Tabela 12 - Sistemas auxiliares.....	77
Tabela 13 - Parâmetros utilizados de avaliação termoluminescente.....	79
Tabela 14 - Coeficientes de calibração dos TLDs.	82
Tabela 15 - Valores estimados da radiação de fundo (BG) e limite inferior de detecção (LID).....	85
Tabela 16 - Informações dos pontos de medição de espectro de nêutrons em solo.....	86
Tabela 17 - Medidas da densidade de fluxo de nêutrons no solo e comparação com os valores calculados.	89
Tabela 18 - Localização dos ensaios de mensuração de dose em solo.....	94
Tabela 19 - Resultados dos ajustes das funções lineares aos dados experimentais do equivalente de dose ambiente para nêutrons.....	106
Tabela 20 - Resultados dos ajustes de funções lineares aos dados experimentais do equivalente de dose ambiente para radiação gama.	111
Tabela 21 - Resultados dos testes de susceptibilidade do sistema THERMO FH à influência de campos magnéticos e de radiofrequência (RF).	113

Tabela 22 - Informações dos ensaios em voo.	116
Tabela 23 - Parâmetros preponderantes nas datas e locais dos ensaios.	118
Tabela 24 - Parâmetros ajustados à distribuição da carga de trabalho.	142
Tabela 25 - Parâmetros ajustados à distribuição de frequências relativas das taxas de dose.	143
Tabela 26 - Integral da distribuição de probabilidade produto normal em função do valor z_{crit} para valores específicos de ρ_x e ρ_y , obtida por interpolação dos valores tabelados por Meeker Jr. et al. (1981) e comparação com a distribuição normal.	148
Tabela 27 - Parâmetros das distribuições de taxa de dose, número de horas de voo por ano e dose efetiva anual de tripulações de aeronaves no espaço aéreo brasileiro.	150

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Taxas de dose efetiva devidas à radiação cósmica, em função da altitude, calculadas pelo programa CARI-6, para a região de São José dos Campos, SP, em janeiro de 2008 (extraído e adaptado de Federico et al. (2010a)).	21
Figura 2 - Comparação entre doses efetivas médias anuais em várias ocupações, no Reino Unido (extraído e adaptado de Bartlett (2004)).	22
Figura 3 – Densidade de fluxo de partículas típico da radiação cósmica galáctica para massas atômicas até 60 uma (extraído e adaptado de Bartlett (2004)).	32
Figura 4 - Taxa de contagem de nêutrons e do número de manchas solares em função do tempo (extraído e adaptado de Hajek et al. (2004)).	33
Figura 5 - Taxa de equivalente de dose ambiente medida em um voo de Praga a Nova York durante o evento solar GLE 60 (AL ANID et al., 2009), em comparação com a estimativa feita para um fluxo solar normal por meio do código computacional PCAIRE e com uma simulação computacional da propagação do evento solar (GCR + modelo SPE).	34
Figura 6 - Linhas de campo magnéticas e regiões de interação da radiação de origem solar (extraído e adaptado do NCRP 132 (2000)).	36
Figura 7 - Representação esquemática da movimentação de cargas aprisionadas pelo campo magnético terrestre (extraído e adaptado de Brum (2004)).	37
Figura 8 - Representação do perfil do campo magnético a uma altitude de 20 km (SPENVIS, 2010).	38
Figura 9 - Efeito da latitude na taxa de dose, para as altitudes de 2.743 m, 5.486 m e 8.230 m. O mapa é apresentado para fins de comparação com a faixa de latitudes abrangida pelo território brasileiro (extraído e adaptado de Federico et al. (2010a)).	38
Figura 10 - Mapa do campo magnético (intensidade total, expressa em nT) obtido pelo modelo IGRF2011, para a data de 01/10/2010, para a altitude de 12 km.	40
Figura 11 - Posicionamento dos treze laboratórios de medida do campo geomagnético, cujos valores medidos do índice K são utilizados para cálculo do índice Kp.	41
Figura 12 - Densidade atmosférica em função da altitude (dados extraídos de SPENVIS (2010)).	43
Figura 13 - Representação das reações envolvidas na interação das partículas da radiação cósmica primária com a atmosfera, dando origem aos raios cósmicos secundários.	44
Figura 14 - Composição da taxa de equivalente de dose devido à radiação cósmica em função da altitude (extraído e adaptado do UNSCEAR (2000)).	45

Figura 15 - Taxa de equivalente de dose ambiente em função da altitude barométrica padrão para vários componentes da radiação cósmica atmosférica em época de mínimo solar de 465 MV, em um local com rigidez magnética de 1,0 GV (extraído e adaptado da ISO (2006)).	45
Figura 16 - Fatores de ponderação para nêutrons propostos pela ICRP 103 (ICRP, 2007), comparativamente aos fatores propostos pela ICRP 60 (ICRP, 1991).	51
Figura 17 - Curva de resposta em função da energia do nêutron incidente para a sonda FHT-762 (WENDI-II), em comparação com aquela obtida para outros monitores convencionais do tipo Eberline Hankins-NRD e Andersson-Braun (extraído e adaptado de Thermo-Scientific (2009)).	61
Figura 18 - Sistema THERMO FH.	61
Figura 19 - Sistema Qdos (DYER et al., 2009).	63
Figura 20 - Espectrômetro de nêutrons e eletrônica associada.	64
Figura 21 - Esquema da eletrônica do espectrômetro de nêutrons.	64
Figura 22 - Monitor de nêutrons do tipo <i>Long-counter</i> .	66
Figura 23 - Dependência angular do <i>Long-counter</i> , para nêutrons da RC (extraído e adaptado de Pazianotto et al. (2011)).	67
Figura 24 - Eficiência do <i>Long-counter</i> para nêutrons monoenergéticos com incidência frontal (extraído e adaptado de Pazianotto et al. (2011)).	67
Figura 25 - Esfera construída de PMMA, parcialmente desmontada para melhor visualização, para posicionamento de pastilhas termoluminescentes.	68
Figura 26 - Desenho esquemático da esfera de PMMA com as posições de DTL utilizadas.	69
Figura 27 - Esfera de PEAD/Pb aberta, mostrando as diferentes camadas de materiais e a posição central para acomodação dos dosímetros.	70
Figura 28 - Desenho esquemático da esfera de PEAD/Pb com as posições de DTL utilizadas.	70
Figura 29 - Curvas de emissão termoluminescente de pastilhas de TLD-600 (^6LiF) e TLD-700 (^7LiF) após exposição em um campo misto nêutron-gama, mostrando a curva resultante da subtração do sinal do TLD-700 no sinal do TLD-600, cujo resultado corresponde ao sinal referente a nêutrons (extraído e adaptado de Hajek et al. (2004)).	72
Figura 30 - Seção de choque total para ^6Li e ^7Li (extraído da biblioteca de dados nucleares avaliados ENDF/B-VI (IAEA, 2011)).	73
Figura 31 - Sistema de detecção baseado em CR39.	74

Figura 32 - Resposta por unidade de fluência em função da energia para o sistema detector, em suas versões passiva (baseado em CR39, utilizado neste trabalho) e ativa, em comparação com a curva do equivalente de dose ambiente. As respostas foram normalizadas em 4 MeV (AGOSTEO et al., 2010).	74
Figura 33 - Histograma dos fatores de correção individuais (Si) para sensibilidade à radiação gama.	80
Figura 35 - Curva de dose-resposta dos TLD-700 para radiação gama (^{60}Co).....	81
Figura 36 - Curva de dose-resposta dos TLD-600 para radiação gama (^{60}Co).....	81
Figura 37 - Fatores de correção aplicados aos dosímetros TLD-600 e TLD-700. As linhas tracejadas indicam os limites de aceitação.	83
Figura 38 - Arranjo montado no Laboratório Nacional de Astrofísica - LNA (1.840 m), para medição do espectro e fluxo de nêutrons.	86
Figura 39 - Arranjo montado no Parque Nacional do Itatiaia - PNI (2.400 m), para medição do espectro e fluxo de nêutrons.....	87
Figura 40 - Arranjo montado no Laboratório de Caracterização de Monitores de Radiação do IEAv (680 m), para medição do espectro e fluxo de nêutrons.....	87
Figura 41- Medidas com o detector LC nas campanhas de medição de espectro de nêutrons em solo.....	89
Figura 42 - Espectro de nêutrons obtido em diversas altitudes, no Brasil.....	90
Figura 43 - Espectro de nêutrons medido a 2.400 m, em comparação com o espectro calculado.....	91
Figura 44 - Espectro de nêutrons medido a 25 m, em comparação com o medido por Goldhagen et al. (2002), no hemisfério norte, ao nível do mar. Os espectros são normalizados para uma amplitude unitária do pico de evaporação. Os fatores de normalização foram: Medições x 252,5 e Goldhagen x 813).....	91
Figura 45 - Fatores de conversão de fluxo para dose oriundos da ICRP 74 (1997), Ferrari et al. (1997), Pelliccioni (2000) e combinação deles em estruturas de grupo compostas.	92
Figura 46 - Comparação dos resultados experimentais com a estimativa teórica e com o obtido por Kowatari, et al. (2005), em local com rigidez de corte semelhante.	93
Figura 47 - Taxas de equivalente de dose ambiente medidas em solo.....	94
Figura 48 - Representação ilustrativa de vista aérea do CERN, mostrando a posição do anel do <i>Super Proton Synchrotron</i> (subterrâneo) e a posição da área experimental Norte.	96

Figura 49 - Desenho esquemático do arranjo de irradiação na linha de feixe H6, com as posições do feixe, alvo e locais de medição experimental (extraído e adaptado de Mitaroff and Silari, (2002)).	96
Figura 50 - Sala de alvos, onde se pode observar a câmara monitora, posicionada na saída do feixe de hádrons, e o alvo conversor, constituído de cobre.	97
Figura 51 - Formas do pulso de hádrons para as taxas de equivalente de dose ambiente utilizadas.	97
Figura 52 - Distribuição de fluência de nêutrons, em letargia, para o campo sobre a plataforma de ferro e sobre as plataformas de concreto superior e lateral (extraído e adaptado de Mitaroff and Silari, (2002)).	98
Figura 53 - Distribuição de fluência de nêutrons, em letargia, para o campo sobre a plataforma de concreto, comparado com espectro na altitude de 10,6 km em aeronaves (extraído e adaptado de Mitaroff e Silari (2002)). Em ambos os espectros, a fluência total foi normalizada à unidade.	99
Figura 54 - Parte dos equipamentos, em irradiação sobre a plataforma de ferro.	100
Figura 55 - Parte dos equipamentos, em irradiação sobre a plataforma de concreto.	100
Figura 56 - Avaliação da radiação de fundo do componente fotônico no campo CERF.	101
Figura 57 - Avaliação da radiação de fundo do componente neutrônico no campo CERF.	102
Figura 58 - Curva de resposta em função da taxa de equivalente de dose ambiente para a sonda FHT-762, no campo de concreto do CERF, com a reta ajustada aos dados experimentais.	103
Figura 59 - Curva de resposta em função da taxa de equivalente de dose ambiente para a sonda FHT-762, no campo de ferro do CERF, com a reta ajustada aos dados experimentais.	103
Figura 60 - Medidas obtidas com a fonte de $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ do LNMRI, com a reta ajustada aos dados experimentais.	104
Figura 61 - Medidas obtidas com a fonte de ^{252}Cf , com a reta ajustada aos dados experimentais.	105
Figura 62 - Curva de resposta em função da direção preferencial de incidência da radiação para a sonda FHT-762.	107
Figura 63 - Desenho esquemático da esfera de PMMA com as posições de DTL utilizadas.	108

Figura 64 - Desenho esquemático da esfera de PEAD/Pb com a posição de DTL utilizada.	108
Figura 65 - Calibração da esfera de PEAD/Pb para o componente neutrônico no campo CERF, na plataforma de concreto de topo. As linhas pontilhadas representam o intervalo de confiança de um desvio padrão.	110
Figura 66 - Calibração do sistema THERMO FH para radiação gama.	111
Figura 67 - Representação esquemática das posições dos instrumentos de medição ativos e passivos (quando instalados) e dos compartimentos de combustível da aeronave.	114
Figura 68 - A aeronave VU-35, do IPEV, sendo aparelhada para um dos ensaios experimentais.	115
Figura 69 - Rota dos ensaios de ponto fixo, realizados na região próxima ao aeroporto de São José dos Campos, SP.	117
Figura 70 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 4.876 m (FL160), referentes ao ensaio 1.....	119
Figura 71 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 7.010 m (FL230), referentes ao ensaio 2.....	119
Figura 72 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 9.448 m (FL310), referentes ao ensaio 3.....	120
Figura 73 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 10.668 m (FL350), referentes ao ensaio 4.....	120
Figura 74 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 13.106 m (FL430), referentes ao ensaio 5.....	121
Figura 76 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 12.192 m (FL400), referentes ao ensaio 12.....	122
Figura 77 - Valores das taxas de equivalente de dose ambiente medidas e calculadas em função da altitude. As curvas tracejadas indicam o intervalo de $\pm 12,5\%$ do valor médio, desconsiderando-se o código QARM.....	123
Figura 78 - Valores das taxas de equivalente de dose ambiente medidas e calculadas em função da altitude para os ensaios 9 e 12. Os traços indicam o intervalo de $\pm 12,5\%$ do valor médio, desconsiderando o código QARM.	124
Figura 79 - Conjunto completo de dados das medições de equivalente de dose ambiente em pontos fixos, normalizados pela média.	124
Figura 80 - Razão entre os componentes não neutrônico e neutrônico em função da altitude, para as medidas com o sistema THERMO FH, para as estimativas feitas com os	

códigos computacionais EXPACS e QARM e comparação com dados obtidos por Romero et al. (2004).....	125
Figura 81 - Avaliação da imprecisão estatística do sistema THERMO FH para cada componente do campo, em função da taxa de equivalente de dose ambiente. As curvas ajustadas são polinomiais de segunda ordem que não possuem significado físico e servem apenas como guia visual para indicar o comportamento geral de cada componente no intervalo das taxas de equivalente de dose ambiente medidas.	126
Figura 82 - Rota do ensaio realizado entre São José dos Campos (SP) e Recife (PE).	128
Figura 83 - Rota dos ensaios realizados entre São José dos Campos (SP), Foz do Iguaçu (PR) e Canoas (RS).	128
Figura 84 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota SJC-Recife (ensaio 6).	129
Figura 85 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota Recife-SJC (ensaio 7).	130
Figura 86 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota SJC-Foz do Iguaçu (ensaio 8).	130
Figura 87 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota Foz do Iguaçu-Canoas (ensaio 10).	131
Figura 88 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota Canoas-ponto fixo de Canoas (ensaio 11).....	131
Figura 89 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota ponto fixo de Canoas-SJC (ensaio 13).....	132
Figura 90 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 6.	133
Figura 91 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 7.....	133
Figura 92 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 8.....	134
Figura 93 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 10.....	134
Figura 94 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 11.....	135
Figura 95 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 13.....	135

Figura 96 - Avaliação do efeito de estruturas da aeronave na taxa de dose.	136
Figura 97 - Comportamento dos componentes neutrônico e não neutrônico em função da posição do sistema THERMO FH dentro da aeronave.	137
Figura 98 - Comportamento da taxa de equivalente de dose ambiente total em função da posição dentro da aeronave, com reta ajustada aos dados.	138
Figura 99 - Mapa dos fixos de rota localizados na região CAR/SAM.	139
Figura 100 - Potencial solar mensal médio no período de janeiro de 1958 a março de 2011.	140
Figura 101 - Total de horas de voo por intervalo de altitude, para todo o tráfego aéreo da região CAR/SAM, projetada para o ano de 2009.	141
Figura 102 - Histograma de distribuição da carga de trabalho entre as tripulações de empresas brasileiras com gaussiana ajustada aos dados.	142
Figura 103 - Histograma da frequência relativa de permanência de aeronaves em tramos da região CAR/SAM em função da taxa de dose média, para época de máximo solar.	144
Figura 104 - Histograma da frequência relativa de permanência de aeronaves em tramos da região CAR/SAM em função da taxa de dose média, para época de mínimo solar.	144
Figura 105 - Mapa da taxa de dose média em cada tramo, para o máximo solar de 1.376 MV.	145
Figura 106 - Mapa da taxa de dose média em cada tramo, para o mínimo solar de 220 MV.	146

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMAS	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CAR/SAM	<i>Caribbean and South American</i>
CERF	<i>Cosmic Energy Reference Field</i>
CERN	<i>Centré European de Recherché Nucleaire</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
EURATOM	<i>European Atomic Energy Community</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
GLE	<i>Ground Level Event</i>
GOES	<i>Geosynchronous Operational Environmental Satellites</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
ICRU	<i>International Commission on Radiation Units and Measurements</i>
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
JAA	<i>Joint Aviation Authorities</i>
LCI	Laboratório de Calibração de Instrumentos
LNA	Laboratório Nacional de Astrofísica
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes
PEAD	Polietileno de alta densidade
PMMA	Polimetilmetacrilato
PNI	Parque Nacional do Itatiaia
RC	Radiação Cósmica
RCG	Radiação Cósmica Galáctica
RCS	Radiação Cósmica Solar
RVSM	<i>Reduced Vertical Separation Minimum</i>
SPE	<i>Solar Particle Event</i>

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o problema do controle do nível de dose de radiação ionizante recebida por tripulações de aeronaves, bem como por equipamentos sensíveis a danos por nêutrons e partículas carregadas, passou a ser gradualmente mais importante nas áreas de saúde ocupacional, proteção radiológica, radiobiologia (HAJEK et al., 2004) e segurança de voo, motivando diversos estudos sobre esse assunto publicados na literatura especializada internacional, por exemplo: Bartlett, (2004); FAA, (1990) e Wilson et al., (1998).

A taxa de dose advinda da radiação cósmica nas proximidades da Terra sofre um aumento considerável em função da altitude, conforme pode ser observado na Figura 1, fazendo com que tripulações de aeronaves possam ultrapassar com frequência o limite de dose anual proposto por organismos internacionais para indivíduos do público (ICRP, 1991), que é de 1 mSv (VERGARA and ROMÁN, 2009).

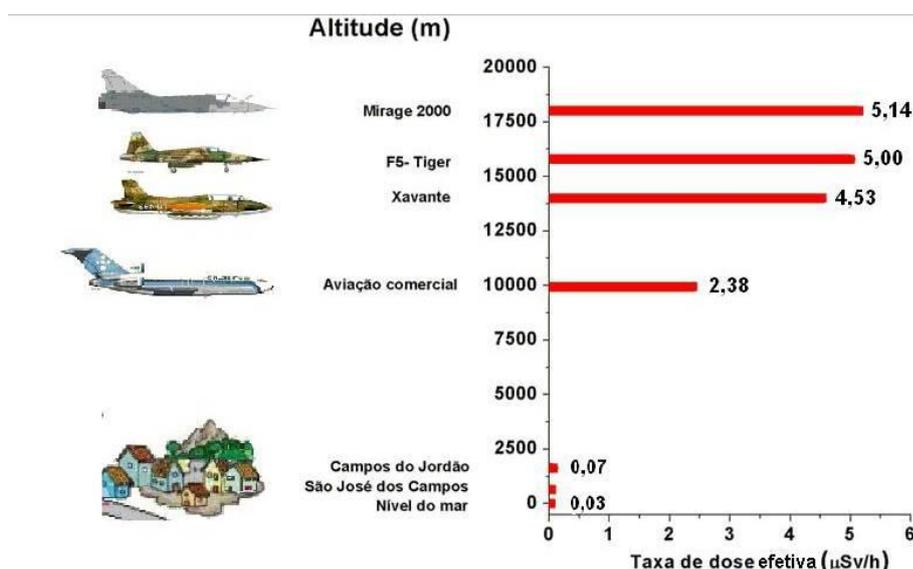


Figura 1 - Taxas de dose efetiva devidas à radiação cósmica, em função da altitude, calculadas pelo programa CARI-6¹, para a região de São José dos Campos, SP, em janeiro de 2008 (extraído e adaptado de Federico et al. (2010a)).

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) reconhece que é necessário controlar a exposição da pessoa representativa dos profissionais de voo, como pilotos e tripulações (ICRP, 1998). Estudos mostram (BARTLETT, 2004) que este grupo

¹ O Programa CARI-6 foi desenvolvido pelo *Civil Aerospace Medical Institute*, pertencente ao *Federal Aviation Administration* (FAA) dos EUA e é apresentado mais detalhadamente no item 2.10.2.

está exposto a níveis de radiação que são comparáveis aos níveis médios de radiação recebidos por profissionais que trabalham com radiação nas áreas de medicina e tecnologia, chegando mesmo a excedê-los em alguns casos, conforme ilustrado na Figura 2.

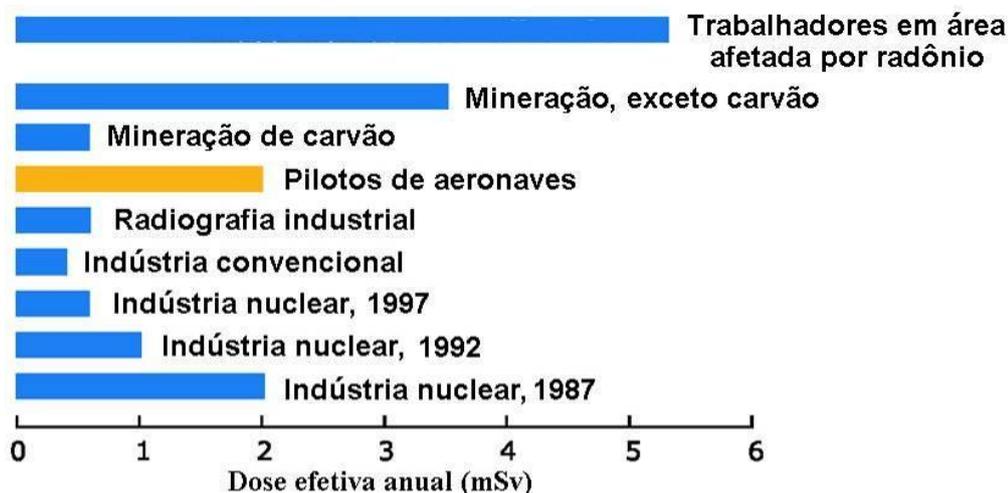


Figura 2 - Comparação entre doses efetivas médias anuais em várias ocupações, no Reino Unido (extraído e adaptado de Bartlett (2004)).

Em 1990, o ICRP propôs, em sua recomendação de número 60 (ICRP, 1991), que pilotos e tripulações devam ser considerados como pessoal ocupacionalmente¹ exposto à radiação ionizante. Esta mesma recomendação foi mantida e melhor detalhada nas publicações de números 75 e 103 do ICRP (ICRP, 1998; ICRP, 2008). Nessa mesma linha de atitude, a União Europeia e o Canadá reconheceram as tripulações de aeronaves como pessoal ocupacionalmente exposto à radiação ionizante.

Os efeitos da radiação em dispositivos e materiais utilizados em aeronaves (HOLMESS-SIEDLE and ADAMS, 2002; NORMAND, 2004), da mesma forma, passaram então a ser importantes, uma vez que as falhas de determinados componentes, em particular as denominadas falhas de evento único (do termo em inglês *Single Event Upsets* - SEUs), causadas por nêutrons nos computadores de bordo, podem comprometer a segurança da aeronave. A crescente miniaturização de componentes, indo da escala de microtecnologia para a escala de nanotecnologia, apesar do significativo avanço tecnológico, implica, por outro lado, no aumento da sua suscetibilidade a efeitos da

¹ Neste texto será utilizado o termo “ocupacional” para manter a compatibilidade com as Normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear. O termo mais adequado, do ponto de vista linguístico, para manter o significado original e compatibilizar com a Língua Portuguesa seria o termo “laboral” (SORDI, 2011).

radiação (SCHRIMPF and FLEETWOOD, 2004). Neste sentido, o desenvolvimento da metodologia para a caracterização dosimétrica do campo de radiação cósmica em função da altitude também possibilitará a geração de dados para se efetuar melhores estimativas das probabilidades de falhas em equipamentos de bordo de aeronaves.

A radiação cósmica (RC), que penetra na atmosfera, é constituída por vários tipos de radiações ionizantes originárias de fontes externas ao nosso planeta, que interagem com o campo magnético terrestre bem como com os constituintes atmosféricos, causando ionizações e radiações secundárias e perdendo sua energia gradualmente. A composição do campo da RC primária de origem galáctica é muito heterogênea, incluindo núcleos (cerca de 98 % no total, dos quais 87 % de hidrogênio, 12 % de hélio e 1 % de núcleos pesados), com pequena contribuição de elétrons e pósitrons (2 %) (BARTLETT, 2004). Além destes, também está presente a contribuição da radiação de origem solar, que é composta de prótons, elétrons, núcleos de hélio e radiação eletromagnética.

Uma diferença importante no caso do território brasileiro é que grande parte de sua área, principalmente a costa sudeste, está sujeita aos efeitos de uma anomalia magnética cuja origem geológica ainda não é totalmente conhecida, denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) (LAURIENTE et al., 1995; COSTA e MENDES JUNIOR, 2004). Esta anomalia modifica a forma com que as radiações cósmicas interagem com o campo geomagnético e com a atmosfera terrestre, justificando mais estudos e uma avaliação dosimétrica mais detalhada.

1.1 Evolução da proteção radiológica de tripulações no mundo

As fontes naturais de radiação são geralmente excluídas do controle radiológico por serem consideradas fora do escopo de radioproteção, embora, em alguns casos, não deixem de ser um problema de saúde pública. Entretanto, em 1991, o ICRP propôs, no parágrafo 136 de sua recomendação de número 60 (ICRP, 1991), que pilotos e tripulações, entre outros, devem ser considerados como pessoal ocupacionalmente exposto à radiação ionizante de origem cósmica. Nesta mesma recomendação, o ICRP alerta ainda sobre a possível necessidade de controle para determinados grupos de profissionais que efetuam viagens frequentes, tais como *couriers*¹.

¹ O termo *courier* é frequentemente utilizado para designar o profissional encarregado do transporte de cargas ou documentações que, por sua natureza sensível, não são enviadas por meios convencionais. A tradução mais aproximada do termo para o português seria “mensageiro”.

Nessa mesma linha de atitude, a União Europeia adotou, a partir de 1996, uma nova regulamentação a ser aplicada por todos os estados membros da Comunidade Europeia (COURADES, 1999), por meio da Diretiva 96/29/EURATOM, de 13 de maio de 1996 que, em seu artigo 42, estabelece que devam ser tomadas as seguintes medidas, de forma a controlar as exposições de tripulações que possam estar sujeitas a doses anuais superiores a 1 mSv:

- a) possibilitar o controle da exposição das tripulações;
- b) levar em conta as exposições prévias ao planejar a agenda de voos, com o objetivo de reduzir as doses de tripulações muito expostas;
- c) informar aos trabalhadores a respeito dos riscos à saúde associados a essa atividade; e
- d) aplicar às tripulações femininas gestantes os mesmos cuidados propostos no artigo 10 desta mesma diretiva (em seu artigo 10, a Diretiva 96/29/EURATOM estabelece que, assim que a gestante informar seu estado, ela deve ser tratada como membro do público, de forma que a dose equivalente no feto deve ser tão baixa quanto razoavelmente exequível e não deve ultrapassar 1 mSv durante todo o período restante de gravidez).

Como consequência desta diretiva, foram incorporadas considerações específicas sobre o assunto aos Procedimentos Operacionais JAR-OPS-1390 (JAA, 2001), da União das Autoridades de Aviação (*Joint Aviation Authorities* - JAA), organização que congrega as autoridades europeias da área de aviação.

Atualmente essas diretrizes já são seguidas de forma rotineira pelos países membros da União Europeia e pelas empresas com sede nesses países. Algumas empresas já possuem algumas aeronaves de sua frota equipadas com monitores de radiação (THIERFELDT et al., 2009), que podem servir para verificação da consistência da dose medida com as estimativas feitas por meio de programas computacionais. Busca-se agora uma maior coordenação entre as informações dosimétricas obtidas em cada empresa ou país (THIERFELDT et al., 2009).

A recomendação de número 75 do ICRP (ICRP, 1998), que trata de princípios gerais de proteção radiológica de trabalhadores, especifica claramente, em seu parágrafo 156, que a exposição de tripulações de aeronaves deve ser tratada sob a égide de exposição ocupacional e delinea algumas considerações a mais a esse respeito, em seu parágrafo 164:

- a) as doses efetivas anuais devem ser obtidas por meio do tempo de voo e da taxa de dose efetiva típica para as rotas pertinentes;
- b) como inexitem outras medidas de controle praticáveis a este caso, não há necessidade de considerar o uso de classificação de áreas;
- c) acredita-se que as restrições no tempo de voo das tripulações poderá prover o controle necessário das exposições; e
- d) membros femininos de tripulações que estejam em processo de gravidez devem ser usualmente afastadas de atividades em voo bem antes do final da gravidez.

Tais recomendações foram posteriormente reforçadas na ICRP 103 (2007), que mantém a mesma linha de atitude.

De forma consistente com as recomendações da ICRP e da Diretiva EURATOM, o Canadá iniciou em 1996 estudos sobre esse assunto, com a participação do Colégio Militar Real do Canadá (*Royal Military College of Canada*), que culminaram em 2001 com a publicação da recomendação "*Commercial and business aviation advisory circular 183*" (TRANSPORT CANADÁ, 2001), a qual foi posteriormente revisada e atualmente está em sua versão 183R, de 28 de abril de 2006.

A circular 183 (TRANSPORT CANADÁ, 2001) segue, em linhas gerais, as recomendações de controle de doses das tripulações propostas pela ICRP, e estabelece níveis de intervenção para a prática e propõe maiores cuidados em casos de rotas em altitudes altas ou latitudes polares, mais sujeitas aos efeitos da RC e de eventuais explosões solares.

De maneira menos rigorosa, a Administração Federal de Aviação (*Federal Aviation Administration - FAA*), pertencente ao Departamento de Transporte dos EUA, também se manifestou emitindo uma série de recomendações sobre o assunto, que culminou com a *Advisory Circular AC 120-61A* (FAA, 2006). Esta recomendação orienta sobre materiais de referência sobre o assunto, discute as variáveis que influenciam a exposição de tripulações, orientando sobre os limites recomendados e risco associado, e estabelece diretrizes sobre o gerenciamento das exposições da tripulação e códigos computacionais a serem utilizados para a estimativa das doses, entre outras informações.

Sob o ponto de vista de proteção radiológica, um fator importante e frequentemente apontado na maior parte das orientações é a grande proporção de jovens do sexo feminino em tripulações de aeronaves (ALVES and MAIROS, 2007; BECK et al., 2006), características estas que podem implicar em um maior risco quanto aos efeitos

hereditários da radiação introduzidos na população, além ainda do aspecto específico de proteção ao feto, no caso de gestantes.

Sob o aspecto de quantificação da dose no feto, deve-se observar que, em alguns casos de fontes convencionais, admite-se que uma dose efetiva de 1 mSv no feto corresponde aproximadamente a 2 mSv na superfície do abdomen da mãe. Este não é o caso para indivíduos expostos à radiação cósmica. Estudos demonstram que, por sua grande capacidade de penetração, a dose na superfície do abdomen da mãe corresponde aproximadamente à mesma dose no feto (COURADES, 1999; FAA, 2000).

A comunidade internacional atribui grande importância a estes controles, de forma que existem vários códigos computacionais, livres ou comerciais, que permitem o cálculo da dose de radiação em diversas rotas aéreas. Tais códigos efetuam as estimativas das doses baseados em simulações da interação da radiação cósmica primária na atmosfera pelo método de Monte Carlo ou baseados em soluções analíticas da equação de transporte das partículas na atmosfera ou ainda por meio de ajuste de funções empíricas aos dados experimentais existentes. Uma descrição mais detalhada dos principais códigos comumente utilizados pode ser encontrada na referência de Botollier-Depois et al. (2007).

1.2 Considerações sobre proteção radiológica em tripulações brasileiras

Nos últimos anos têm sido realizadas muitas medições experimentais, principalmente em rotas aéreas do hemisfério norte, cobrindo altitudes de voo que variam de 8 a 20 km e latitudes de 30° S a 70° N (SULLIVAN et al., 2002; BARTLETT, 2004; VUKOVIC´ et al., 2010). Sullivan et al. (2002) relataram taxas de dose que variaram de 1 µSv/h a 17 µSv/h. Entretanto, poucos estudos foram realizados na região da América do Sul, sendo que, destes poucos, a maior parte avalia as informações da rota que se inicia na América do Sul mas termina no hemisfério norte, ou o inverso, e relata o resultado como um todo, raramente se detendo em detalhamentos de comportamento da taxa de dose sobre a América do Sul, região esta sob os possíveis efeitos da AMAS. Da mesma forma, observa-se, nas principais publicações da área, a inexistência de artigos oriundos de grupos sediados na América do Sul.

Alguns estudos foram desenvolvidos sobre a AMAS desde 1968, utilizando balões estratosféricos entre outros métodos (MARTIN, 1972; COSTA, 1981; PINTO JUNIOR, 1985). A maior parte destes estudos indicam que a AMAS modifica a radiação incidente em altas altitudes, mas não foram detectadas modificações sensíveis em altitudes

menores, compatíveis com as altitudes de aviação comercial. Entretanto, é importante observar que estes estudos foram focados em propósitos de geofísica espacial e não com o objetivo de mensuração de dose em tripulações, sendo que as grandezas utilizadas, bem como as faixas de energia pertinentes, são diferentes em cada caso. Além disso, nestas altitudes a contribuição de nêutrons pode chegar até a 40 % da dose total, sendo para isso importante a sua distribuição em energia (FEDERICO et al., 2010a).

A norma de radioproteção da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) CNEN NN-3.01 (CNEN, 2005) considera um indivíduo como Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE) à radiação quando ele está sujeito à exposição normal ou potencial em decorrência de seu trabalho ou treinamento em práticas autorizadas ou intervenções, excluindo-se a radiação natural do local. Nessa mesma norma, é definido o termo "Fontes Naturais" como fontes de radiação que ocorrem naturalmente, incluindo radiação cósmica e terrestre, não existindo na Norma CNEN NN-3.01 nenhuma ressalva em relação ao caso de tripulações de aeronaves.

A legislação trabalhista brasileira estipula compensações financeiras, bem como aposentadoria especial e férias diferenciadas para trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação ionizante, fato este que, pelo impacto financeiro nas empresas aéreas, deve ser levado em consideração antes de se tomar medidas conservadoras no enquadramento das tripulações como indivíduos ocupacionalmente expostos, uma vez que as taxas de dose e conseqüentemente os riscos a este grupo da população podem ser razoavelmente conhecidos e previstos.

1.3 Motivação e justificativa

Pelo exposto e pelo número de publicações recentes, observa-se que o assunto tem merecido destaque crescente na comunidade científica internacional. Entretanto, deve-se observar que a maior parte das medições dosimétricas de radiação cósmica em altitudes de voo de aeronaves foi realizada no continente Norte Americano e na Europa, sendo que poucos dados foram coletados na região da América do Sul. Ressalta-se que inexistem, até o presente momento, grupos consolidados na América do Sul que possuam publicações específicas e experiência destacada sobre este assunto.

Desta forma, o presente trabalho aborda o problema da dosimetria da radiação ionizante de origem cósmica, incidente em tripulações e instrumentação sensível de aeronaves operando no espaço aéreo brasileiro, com o foco principal do projeto situando-se

no desenvolvimento da metodologia e na aplicação das ferramentas experimentais e teóricas de avaliação dosimétrica e sua aplicação na região da AMAS.

A comparação dos resultados experimentais obtidos na região da AMAS com outros resultados experimentais obtidos em outras regiões, bem como, com as estimativas obtidas por meio de cálculos teóricos e simulações em programas computacionais existentes, permitirão inferir as medidas de proteção necessárias às tripulações das aeronaves que voam no espaço aéreo brasileiro, imerso na Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), bem como verificar a adequação dos programas computacionais existentes para cálculos de dose a bordo de aeronaves, nesta região.

1.4 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é fornecer subsídios conceituais, computacionais e experimentais que permitam estabelecer um sistema de dosimetria para as tripulações de aeronaves que operam no território nacional, que estão sujeitas à irradiação de origem cósmica durante os voos de grande altitude.

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) A seleção, caracterização, verificação e teste de monitores e dosímetros convencionais adequados para medidas referentes à radiação cósmica a bordo de aeronaves em voos de rotina de grande teto operacional;
- b) A avaliação da adequabilidade de programas computacionais de acesso livre para cálculo de doses em rotas do espaço aéreo brasileiro, por meio da comparação de seus resultados com medidas do equivalente de dose ambiente a bordo de aeronaves realizadas em rotas pré-determinadas no território nacional dentro da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS);
- c) A estimativa da distribuição de dose a que estão expostas as tripulações que operam nas regiões do Brasil e da América do Sul;
- d) Estabelecimento das bases para o projeto de um sistema de dosímetros passivos para medidas de rotina a bordo de aeronaves.

Entende-se como sistema de dosimetria todo o conjunto de conhecimentos, protocolos e instrumentação necessários para efetuar as medidas dosimétricas propostas, com grau de confiabilidade adequado, de acordo com a literatura e o conhecimento existente, que permita conhecer com suficiente grau de precisão e exatidão as doses de radiação ionizante a que está exposto um determinado grupo de trabalhadores e equipamentos sensíveis. O conhecimento das doses a que está exposto o grupo de

trabalhadores aeronavegantes (pilotos e tripulações) permitirá que sejam adotadas as medidas de radioproteção e controle adequados ao risco radiológico correspondente a estas doses, bem como o acompanhamento histórico para estudos da correlação de efeitos estocásticos com a dose, correlação esta importante também no aspecto de saúde pública.

1.5 Método de abordagem

Conforme já comentado nas subseções anteriores, não há relatos de estudos abrangentes no país sobre a exposição de tripulações à radiação de origem cósmica durante os voos de grande altitude no território brasileiro. Não há também iniciativas no país de órgãos reguladores quanto à radioproteção de tais trabalhadores, não havendo, portanto, orientações ou recomendações sobre equipamentos e métodos para a avaliação das doses correspondentes às exposições à radiação cósmica em voo. Não há também, no país, instalações adequadas para a calibração de monitores e dosímetros no campo de radiação existente nas altitudes de voo de aeronaves.

Dessa forma, o método adotado para abordagem do problema em questão consistiu nas seguintes etapas:

- a) Seleção no mercado internacional de instrumentos convencionais de medição de grandezas dosimétricas que sejam, ou possam ser, apropriados para o campo de radiação existente em altitudes de voo;
- b) Verificação destes instrumentos num campo de radiação tão próximo quanto possível ao campo objeto do presente estudo;
- c) Emprego destes instrumentos em ensaios de voo em rotas pré-definidas dentro da AMAS para a medição das doses correspondentes a tais rotas e comparação da resposta destes instrumentos, em condição de ensaio em voo, com outros específicos para campos de alta energia e reconhecidos internacionalmente para emprego na dosimetria em altitudes de voo;
- d) Cálculo das doses correspondentes a estas rotas utilizando alguns códigos computacionais de acesso livre dedicados a estes cálculos e comparação dos seus resultados com as respectivas medições de dose, a fim de selecionar aqueles mais adequados para este fim, considerando as possíveis peculiaridades do campo de radiação cósmica decorrente da AMAS, nas altitudes de voo;
- e) Estudo da distribuição de dose nas tripulações que operam no território nacional, empregando o código computacional mais adequado para esta finalidade e as estatísticas de voos (trechos de rotas, altitudes e horas de voo) na região da América do Sul

e Caribe e registros das horas de voo de pilotos e co-pilotos das principais empresas aéreas brasileiras;

f) Proposição de um protótipo de um sistema de dosimetria passivo para emprego em aeronaves.

1.6 Roteiro desta tese

No capítulo 1 foi discutida sucintamente a situação atual da radioproteção das tripulações de aeronaves no mundo e no Brasil e foram apresentadas: a motivação, justificativas e objetivos do presente estudo. Foi, ainda, apresentado o método de abordagem do objeto de estudo e, por fim, o roteiro dos capítulos seguintes (a presente subseção).

No capítulo 2 é apresentada a base de conhecimento necessária para a compreensão do método de abordagem do problema objeto de estudo e de obtenção dos resultados do presente trabalho, envolvendo: a radiação cósmica, o campo geomagnético, a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), os índices geomagnéticos K e Kp, a atmosfera padrão, interações da radiação cósmica com a atmosfera e as principais grandezas dosimétricas utilizadas neste trabalho. Ainda, neste capítulo, é apresentada uma breve descrição dos principais programas computacionais de acesso livre empregados nos cálculos de dose em voo de aeronaves, os quais foram avaliados no presente trabalho.

No capítulo 3 são descritos os arranjos experimentais utilizados nas aferições de equipamentos e nas medidas efetuadas.

No capítulo 4 são apresentados todos os resultados obtidos, sua análise e discussão. Inicialmente são apresentados, com algum detalhamento, os resultados de desenvolvimentos experimentais e metodológicos que foram necessários para a obtenção dos resultados das medições e análises definidas nos objetivos do presente trabalho. Em seguida são apresentados os resultados principais das medições em voo e a correspondente discussão e análise. Neste capítulo é também apresentada a estimativa de dose efetiva anual das tripulações que operam na região da América do Sul e Caribe.

No capítulo 5, que compreende à conclusão de texto desta tese, é feita uma sinopse dos principais resultados e conclusões, a aplicabilidade de tais resultados e a sugestão de trabalhos para a execução de experimentos e desenvolvimentos que, por sua extensão, transcenderam o escopo desta tese e para continuidade da linha de pesquisa iniciada no país com o presente trabalho de doutorado.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Radiação Cósmica

A radiação de origem cósmica foi primeiramente estudada a partir de 1911 por Victor Hess, por meio de medidas em balões, mas somente em 1936 ele recebeu o prêmio Nobel por seus trabalhos sobre este tipo de radiação (DORMAN, 2004).

Raios cósmicos, de forma genérica, são radiações compostas por diversos tipos de partículas e ondas, com origem externa ao nosso planeta. A radiação cósmica (RC) pode ser classificada mais detalhadamente de acordo com a sua origem, como extragaláctica, galáctica, solar, interplanetária e magnetosférica (DORMAN, 2004), sendo que as energias envolvidas variam de 10^{15} MeV para a primeira categoria a 30 keV para a última.

Didaticamente, neste trabalho as radiações cósmicas serão agrupadas em duas grandes categorias, devido às suas similaridades de origem e comportamento. A primeira será a RC de origem solar, denominada simplesmente de RC solar (RCS). A segunda englobará as outras origens de radiação cósmica e será genericamente chamada de RC galáctica (RCG). Ambas as categorias podem dar origem a partículas (principalmente prótons e elétrons) que podem vir a ser aprisionadas pelo campo magnético terrestre em órbitas fechadas (NCRP, 2000), fenômeno este importante para o entendimento do comportamento da taxa de dose incidente em altitudes de voo de aeronaves e que será, juntamente com as categorias citadas, discutido com maiores detalhes nas seções e sub-seções a seguir.

2.1.1 Radiação Cósmica Galáctica (RCG)

A RCG distribui-se isotropicamente no espaço interestelar e é constituída predominantemente de núcleos (cerca de 98% no total), sendo que destes, 87% consistem de hidrogênio, 12 % de hélio e 1 % de núcleos pesados, conforme pode ser observado na Figura 3), com pequena contribuição de elétrons e pósitrons (cerca de 2 %) (BARTLETT, 2004). Todas essas radiações não possuem direção definida e perdem energia principalmente por ionização ao atravessarem o meio material, bem como sofrem deflexão pelo campo magnético terrestre. Além disso, ao colidirem com núcleos de átomos da atmosfera terrestre, por meio de reações de espalação, produzem chuveciros de partículas secundárias: nêutrons, píons, mésons, elétrons, fótons e prótons. Conforme sua energia ou massa, estas partículas interagem de diversas formas com as moléculas da atmosfera

terrestre, perdendo energia até serem finalmente freadas ou absorvidas na atmosfera ou na crosta terrestre.

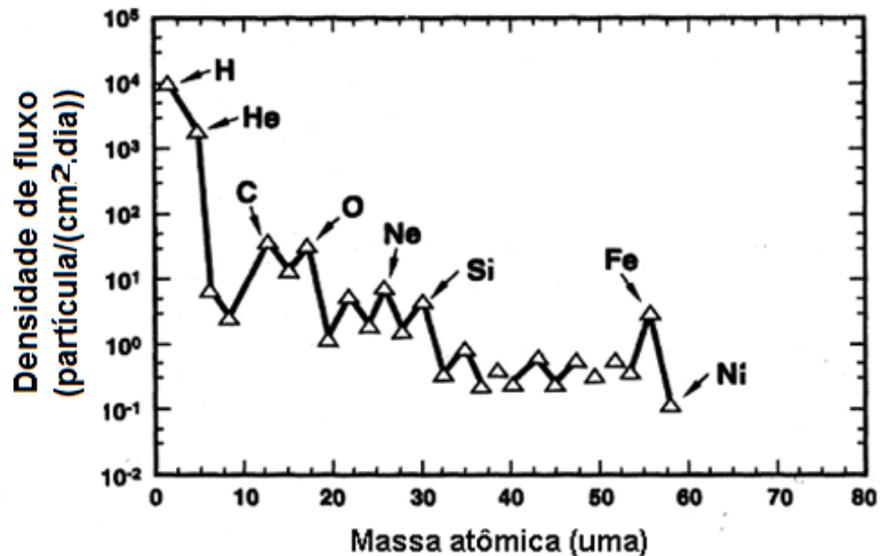


Figura 3 – Densidade de fluxo de partículas típico da radiação cósmica galáctica para massas atômicas até 60 uma (extraído e adaptado de Bartlett (2004)).

Além do efeito de blindagem devido à atmosfera terrestre, outros dois efeitos também influenciam a intensidade dos raios cósmicos que penetram a atmosfera: o vento solar e o campo magnético terrestre.

O campo magnético terrestre atua defletindo parte das partículas incidentes, com uma forte dependência da latitude de incidência, sendo que a taxa de dose causada por raios cósmicos chega a ser duas a três vezes maior próximo aos pólos do que nas regiões equatoriais (LEWIS et al., 2005). Esta capacidade de deflexão das partículas é determinada por uma característica local do campo geomagnético denominada rigidez de corte, que será explicada mais adiante.

2.1.2 Radiação Cósmica Solar (RCS)

A radiação cósmica solar é produto da atividade solar, sendo dependente dela. O Sol possui um ciclo de atividade conhecido, com um período de 11 anos dentro do qual ocorre a inversão da polaridade magnética solar, sendo que, a cada mudança de polaridade, o Sol passa por um ciclo de máximo e mínimo em sua atividade. Uma representação de 50 anos do ciclo solar é apresentada na Figura 4, por meio de indicadores como a quantidade de manchas solares e a taxa de contagem de nêutrons na Terra.

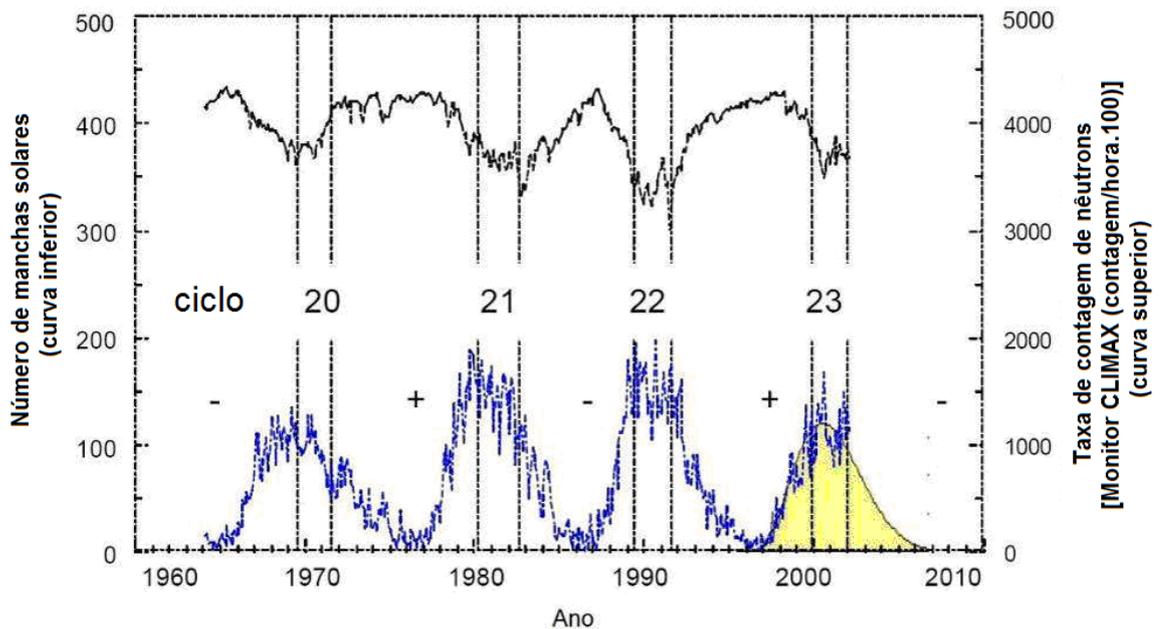


Figura 4 - Taxa de contagem de nêutrons e do número de manchas solares em função do tempo (extraído e adaptado de Hajek et al. (2004)).

A frequência do surgimento de manchas solares (*Sun spots*) é dependente da fase do ciclo solar (são mais frequentes quando o Sol atinge um máximo em seu ciclo). As manchas solares são produtos de grandes explosões que geralmente são acompanhadas por ejeção de massa coronal solar e liberam grandes quantidades de material (plasma próton-elétron), com prótons de altas energias, cujo espectro de energia pode chegar até centenas de MeV ou eventualmente unidades de GeV (SULLIVAN et al., 2002), além de elétrons, núcleos de hélio e radiação eletromagnética. Quando ocorrem grandes explosões solares, denominados na literatura especializada de Eventos de Partículas Solares ou "*Solar Particle Events*" (SPE), as partículas emitidas podem chegar à Terra e contribuir para o aumento da dose devida à radiação cósmica. Quando essa contribuição é observável ao nível do solo, tais eventos são identificados e catalogados como Eventos ao Nível do Solo, ou "*Ground Level Event*" (GLE), na literatura especializada. Estes eventos são identificados por meio de uma rede de monitores de nêutrons em solo ou pelos satélites GOES (*Geosynchronous Operational Environmental Satellites*) e podem durar horas ou dias. Como exemplo, pode-se citar um grande evento deste tipo ocorrido em 23 de fevereiro de 1956, que pode ter aumentado os níveis de dose de cerca de 10 $\mu\text{Sv/h}$ a cerca de 4,5 mSv/h a uma altitude de 9 km (LEWIS et al., 2009). Na Figura 5 é apresentado um exemplo de aumento da taxa de dose medida durante um voo entre Praga e Nova York (AL

ANID et al., 2009) durante a ocorrência de um evento ao nível do solo, denominado GLE 60, em relação à dose estimada em condição normal.

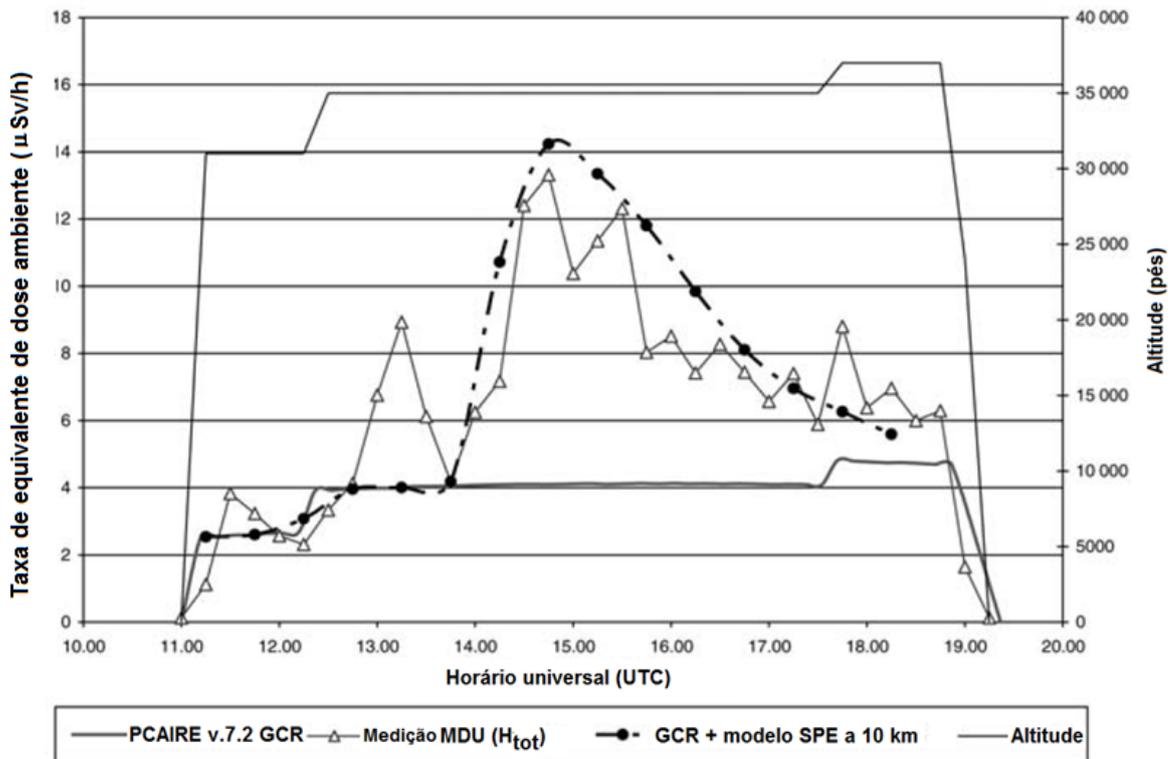


Figura 5 - Taxa de equivalente de dose ambiente medida em um voo de Praga a Nova York durante o evento solar GLE 60 (AL ANID et al., 2009), em comparação com a estimativa feita para um fluxo solar normal por meio do código computacional PCAIRE e com uma simulação computacional da propagação do evento solar (GCR + modelo SPE).

Estes eventos solares são também muito preocupantes no que se refere à segurança em voo, pois se estima que eventos como o que ocorreu em setembro de 1989, cujas doses podem ter chegado a unidades de mSv em voos polares, possam causar taxas de mudança de bit da ordem de uma por minuto, em módulos de memória de 1 Gbyte (DYER, 2001).

Eventualmente também podem ocorrer decréscimos momentâneos da dose, ocasionados por um efeito de deflexão da radiação cósmica por nuvens de plasma emitidas pelo Sol, sendo que tais eventos são denominados “decréscimos de *Forbush*”.

A influência da RCS estende-se por centenas de unidades astronômicas ($1 \text{ ua} = 150 \times 10^6 \text{ km}$) e sua intensidade flutua de acordo com o ciclo de atividade solar. Com seu campo magnético, a RCS provoca o espalhamento e a desaceleração da RCG de menor energia, de forma que a intensidade de raios cósmicos incidentes na atmosfera terrestre diminui durante seus períodos de máximo e aumenta durante os períodos de

mínimo, ou seja, o ciclo solar e a intensidade de radiação cósmica galáctica incidente na Terra estão anti-correlacionados (TYLKA et al., 1997). Esta anti-correlação não é simples, pois depende da rigidez magnética (momento por unidade de carga) da RCG (as RCG de maior rigidez magnética serão menos afetadas pela RCS) e também do efeito temporal na interação da RCS com a RCG, pois a RCS pode demorar até um ano para atingir os limites da heliosfera. No momento atual (início de 2011), a época é ainda de um mínimo solar, que corresponde a um máximo de radiação cósmica galáctica.

As medições de fluxo de prótons e elétrons devem ser acompanhadas durante a realização de ensaios de medição de radiação a bordo de aeronaves, de forma a se poder discernir entre o fluxo normal de radiação para aquela localidade e altitude e uma possível alteração induzida por SPE e GLE. Este acompanhamento pode ser efetuado por meio de dados fornecidos pelos satélites GOES-13 e GOES-11, os quais medem em tempo real os fluxos de prótons e elétrons de origem solar em diversas faixas de energia.

Entretanto, estes índices não são totalmente representativos das flutuações da RC em determinada localização geográfica. O fluxo de partículas solares medido pelos satélites GOES é um indicador que, idealmente, deve ser complementado por medições feitas por estações em solo, de forma a avaliar a distribuição geográfica e penetração das RC incidentes. De fato, inexistem estações de medida em solo na região da AMAS que disponibilizem resultados em tempo real para se efetuar estas avaliações. Neste trabalho, este acompanhamento foi efetuado inicialmente por meio de um detector do tipo *Long-Counter*, em solo e direcionado para o zênite.

2.2 Campo geomagnético

O magnetismo terrestre induz à formação de linhas de campo magnético ao redor da Terra que, afetadas pelo plasma de origem solar, formam estruturas no espaço próximo à Terra, as quais podem ser observadas na Figura 6. O plasma da RCS afeta as linhas do campo geomagnético de forma que elas sofrem uma deformação na direção do Sol, que é resultado da compressão causada pelo vento solar, produzindo um arco estacionário a uma distância de cerca de 95.565 km (cerca de 15 raios terrestres médios). A inclinação de 23,5 graus do dipolo em relação ao plano orbital da Terra e a diferença entre o eixo do dipolo e o eixo de rotação terrestre causam assimetrias que possuem características sazonais. Parte das anomalias do campo geomagnético têm sua origem na movimentação do magma terrestre.

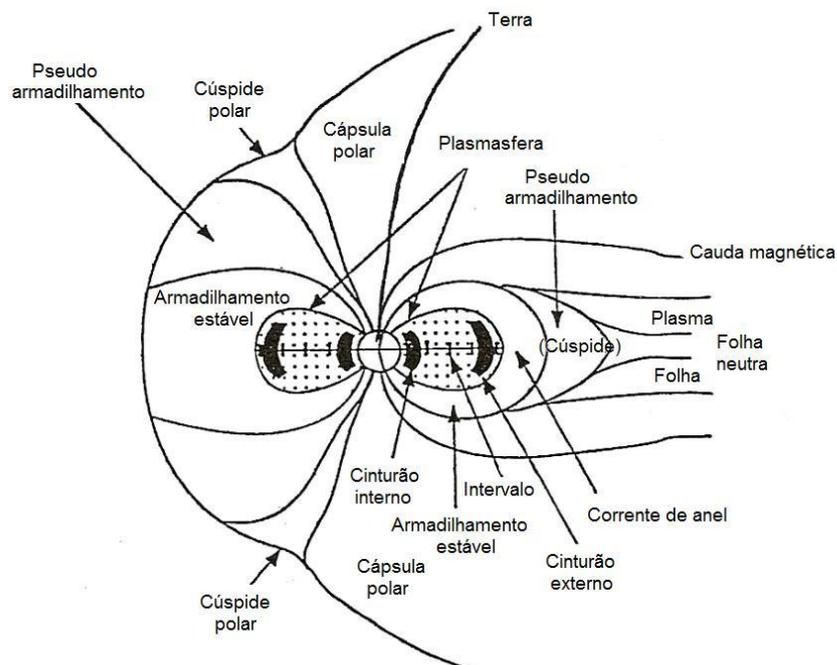


Figura 6 - Linhas do campo magnético e regiões de interação da radiação de origem solar (extraído e adaptado do NCRP 132 (2000)).

O campo magnético terrestre é responsável pelo aprisionamento de partículas carregadas de baixas energias, principalmente elétrons e prótons e, em menor quantidade, íons pesados. Estas partículas aprisionadas têm seu movimento caracterizado por três componentes: uma trajetória helicoidal ao longo da linha de campo magnético, a reflexão, nos chamados pontos de reflexão polares e um movimento de deriva longitudinal ao redor da Terra. O movimento destas partículas é governado pela equação da força Lorentziana (**F**):

$$\mathbf{F} = q\mathbf{V} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

onde q e \mathbf{V} são a carga e velocidade da partícula, respectivamente, e \mathbf{B} é o vetor campo magnético ao qual a partícula está submetida. O ângulo entre \mathbf{V} e \mathbf{B} é chamado de ângulo de arremesso (*pitch angle*) e varia de 90 graus nos pontos de reflexão a 0 grau na região equatorial.

O campo magnético terrestre possui um gradiente de intensidade com a altitude que faz com que o raio de giro das partículas seja menor em menores altitudes, onde o campo magnético é mais intenso. Este efeito provoca um movimento de deriva (*drift*) perpendicular às linhas do campo de forma que partículas com carga positiva se

movimentem no sentido oeste e partículas com carga negativa se movimentem no sentido leste, conforme é representado na Figura 7 (BRUM, 2004).

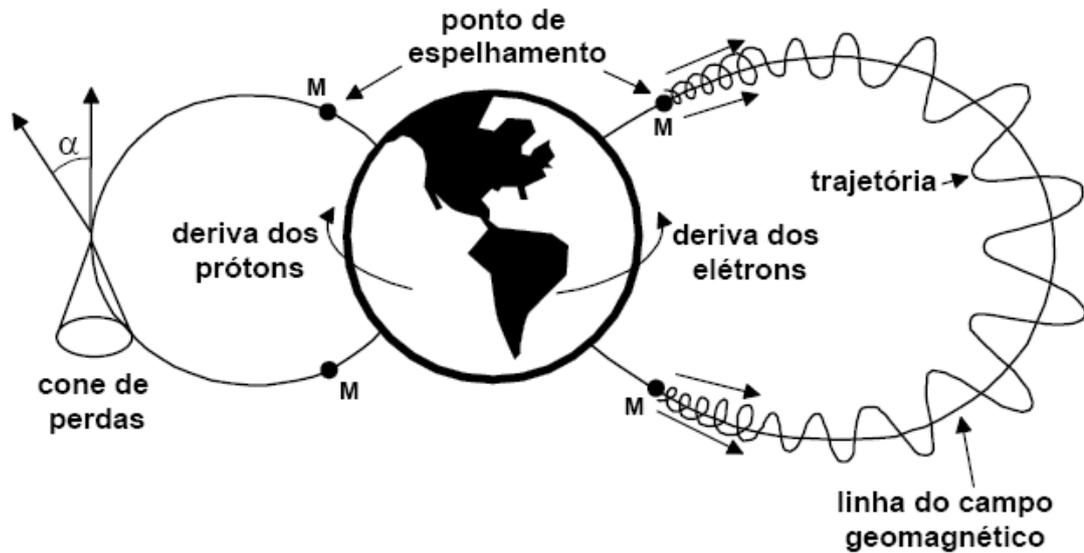


Figura 7 - Representação esquemática da movimentação de cargas aprisionadas pelo campo magnético terrestre (extraído e adaptado de Brum (2004)).

O resultado final da combinação de movimentos das partículas aprisionadas traça um cinturão semelhante a um toróide, que pode ser visto na Figura 8, e é denominado cinturão de radiação de Van Allen. Esta trajetória faz com que as partículas aprisionadas tenham uma maior penetração em latitudes maiores, próximas aos pólos magnéticos, e explica o fato que a dose devida à radiação cósmica tem seu perfil fortemente afetado pelo efeito da latitude, principalmente em maiores altitudes, conforme pode ser observado na Figura 8.

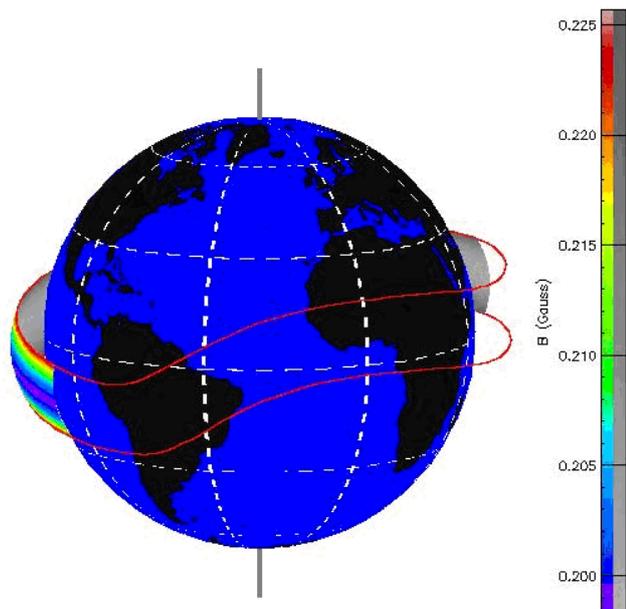


Figura 8 - Representação do perfil do campo magnético a uma altitude de 20 km (SPENVIS, 2010).

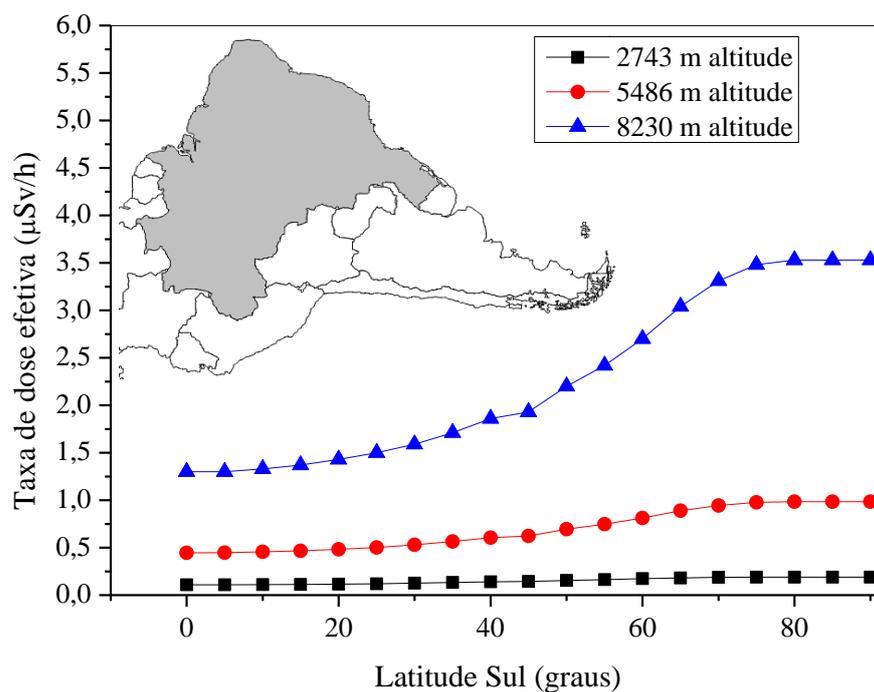


Figura 9 - Efeito da latitude na taxa de dose, para as altitudes de 2.743 m, 5.486 m e 8.230 m. O mapa é apresentado para fins de comparação com a faixa de latitudes abrangida pelo território brasileiro (extraído e adaptado de Federico et al. (2010a)).

A equação geral do movimento de uma partícula carregada em um campo magnético, expressa por exemplo, em coordenadas esféricas, resulta em três equações diferenciais simultâneas, conforme demonstrado por Smart e Shea (2005). Uma solução

bastante utilizada deriva da simplificação proposta por Störmer (STÖRMER apud SMART and SHEA, 2005), para o caso de um campo dipolar, que estabelece a energia mínima que uma partícula deve possuir para poder penetrar o campo magnético. A capacidade de penetração destas partículas é dependente do seu ângulo de incidência e rigidez magnética. Uma partícula pode penetrar na atmosfera terrestre se sua rigidez magnética, R_p , dada pela Equação 2, for maior do que a rigidez de corte do campo magnético terrestre, R_c , no mesmo ponto de entrada.

$$R_p = pc/q; \quad (2)$$

onde p é o momento da partícula, q a sua carga e c a velocidade da luz (LEWIS et al., 2001).

Utilizando a magnitude do momento de dipolo magnético calculada por meio do modelo geomagnético IGRF 2000 e considerando uma aproximação referente à incidência da partícula em ângulo vertical, Smart e Shea (2005) calcularam o valor da rigidez de corte vertical do campo (R_{cv}), em gigavolts, para determinado ponto do campo, que é dada pela Equação 3, a seguir:

$$R_{cv} = (14,5 \cos^4 \lambda) / r^2, \quad (3)$$

onde λ é a latitude a partir do equador magnético e r é a distância do centro do dipolo, expressa em raios terrestres.

É importante observar que esta aproximação é limitada, pois não contempla adequadamente os componentes não dipolares do campo magnético terrestre (vide seção 2.3), bem como, a simplificação do cálculo da rigidez de corte vertical leva a uma superestimação do fluxo de raios cósmicos incidentes, que é maior próxima ao equador geomagnético (O'BRIEN, 2008a e O'BRIEN, 2008b).

2.3 A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS)

As distorções do campo geomagnético colaboram para criar uma anomalia magnética denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Trata-se de uma região em que as linhas de campo magnético terrestre aproximam-se da crosta, permitindo que raios cósmicos e partículas carregadas penetrem mais profundamente na atmosfera terrestre, chegando a poder interferir com comunicações, satélites e aeronaves (LAURIENTE et al., 1995 e COSTA and MENDES JUNIOR, 2004).

De acordo com Hartmann (2005), a anomalia tem parte de sua origem explicada por um componente dipolar do campo geomagnético e parte (cerca de 10 % a

20 %) explicada por outros componentes não dipolares. Dessa forma, o modelo de dipolo simples não representa completamente todos os aspectos do campo geomagnético na região da AMAS. Saboia e Marques (2006) alertaram que o perfil da AMAS deve se ampliar bastante, podendo, a longo prazo, vir a cobrir mais da metade do hemisfério Sul. De acordo com o trabalho de Hartmann (2005), o mínimo de campo da AMAS se encontra próximo à região da fronteira tríplice (Brasil, Argentina e Paraguai).

Na Figura 10 é apresentado o mapeamento na forma de curvas de nível do campo magnético terrestre a uma altitude de 12 km, obtida por meio do modelo geomagnético IGRF2011 (IGRF, 2010), onde se pode visualizar que grande parte do território brasileiro, principalmente a costa sudeste, situa-se próximo ao centro da anomalia e que a região da AMAS apresenta as menores intensidades de campo magnético do planeta. Na Figura 10 se pode observar que as diferenças na intensidade do campo magnético entre a região central da anomalia e o seu entorno são da ordem de 20 μ T, valores estes bem superiores às alterações típicas de tempestades geomagnéticas, que giram em torno de dezenas a centenas de nT. O modelo geomagnético IGRF 2011, lançado no início de 2010, permite efetuar estimativas preditivas para o período de 2010 a 2015, com uma incerteza cumulativa estimada em 20 nT/ano.

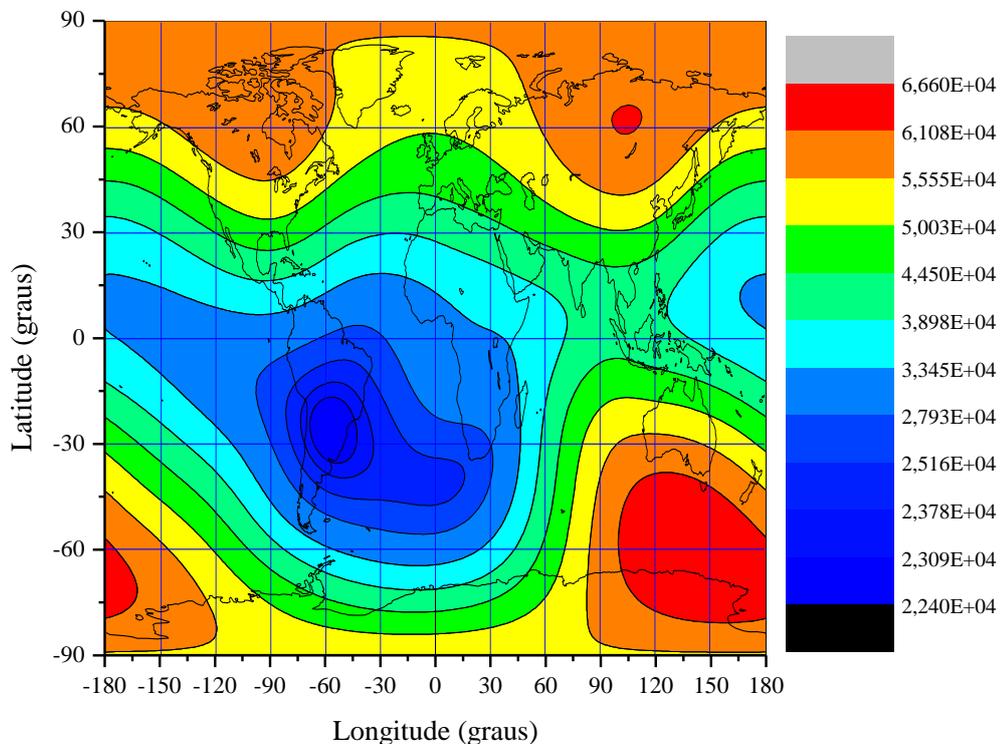


Figura 10 - Mapa do campo magnético (intensidade total, expressa em nT) obtido pelo modelo IGRF2011, para a data de 01/10/2010, para a altitude de 12 km.

2.4 Índices geomagnéticos K e Kp

O índice geomagnético K é obtido por meio da mensuração, por observatórios magnéticos situados em solo, do intervalo de variação do mais perturbado componente magnético horizontal do campo geomagnético durante três horas consecutivas, não sendo consideradas as flutuações sazonais do campo. O valor obtido é então convertido em uma escala de 0 a 9, normalizada para a frequência de ocorrência das intensidades das perturbações. Originalmente, este índice foi definido por Siebert (1971) como:

“Variações K são todas as perturbações do campo geomagnético, causadas por partículas da radiação solar, dentro de um intervalo estabelecido de 3 horas. Todas as outras perturbações, regulares ou irregulares, não são variações K. Atividade geomagnética é a ocorrência de variações K”.

O índice global Kp (da origem "*planetarische Kennziffer*", que significa índice planetário) é obtido como o valor médio dos índices de perturbação geomagnética K, calculado pelo observatório geomagnético Adolf Schmidt pertencente ao Centro Alemão Helmholtz de pesquisa em Geociências, a partir dos índices K de 13 observatórios magnéticos, distribuídos conforme apresentado na Figura 11.

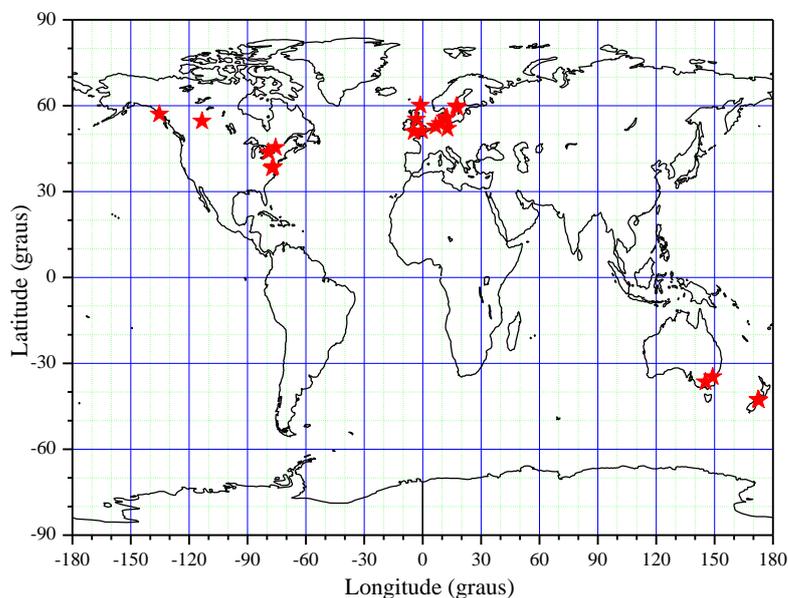


Figura 11 - Posicionamento dos treze laboratórios de medição do campo geomagnético, cujos valores medidos do índice K são utilizados para cálculo do índice Kp.

O índice Kp é muito utilizado em estudos ionosféricos e magnetosféricos, e também é um dos índices utilizados por programas de cálculo de dose para estimativa da variação da taxa de dose decorrente de perturbações geomagnéticas. Pode ser observado na

Figura 11 que este índice não considera dados de estações nas regiões da América do Sul e da África, justamente as regiões mais afetadas pela AMAS.

2.5 Fluxo de prótons e elétrons solares

O acompanhamento da RC de origem solar durante a realização dos ensaios em voo é de fundamental importância para que seja possível distinguir entre medições realizadas dentro de condições magnetosféricas e solares calmas e aquelas realizadas durante eventos solares ou tempestades geomagnéticas, as quais podem induzir modificações anômalas nas leituras obtidas.

O fluxo de prótons e elétrons no ambiente espacial próximo à Terra pode ser monitorado por meio dos dados obtidos pelos satélites GOES, situados em órbita geoestacionária a uma altitude aproximada de 38.000 km. Atualmente (maio de 2011) o satélite GOES 13 é o satélite primário para coleta de dados de fluxos de elétrons e prótons e o satélite GOES 15 é o satélite secundário. Ambos possuem três canais de medição de fluxo de prótons e dois canais de medição de fluxo de elétrons, sendo que cada canal registra partículas com energia acima de um determinado limiar. Os dados são fornecidos em partículas/(cm².s.sr), em tempo real, por meio de acesso on-line ao site do Centro de Predição do Clima espacial (*Space Weather Prediction Center - SWPC*) pertencente à Administração Atmosférica e Oceânica Nacional (*National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA*), onde também podem ser obtidos os registros históricos (SWPC, 2011) de fluxo solar. Os registros para as datas de interesse deste trabalho são apresentados no Anexo A.

2.6 Atmosfera padrão

A atmosfera terrestre provê uma camada de, aproximadamente, 1000 g/cm² de ar, que causa uma atenuação da radiação inicial, de forma que a sua contribuição na dose total recebida pelos seres vivos é de 10 % do total da radiação natural, ao nível do mar (HEINRICH et al., 1999). Na Figura 12 é apresentado um gráfico ilustrativo da densidade atmosférica média em função da altitude.

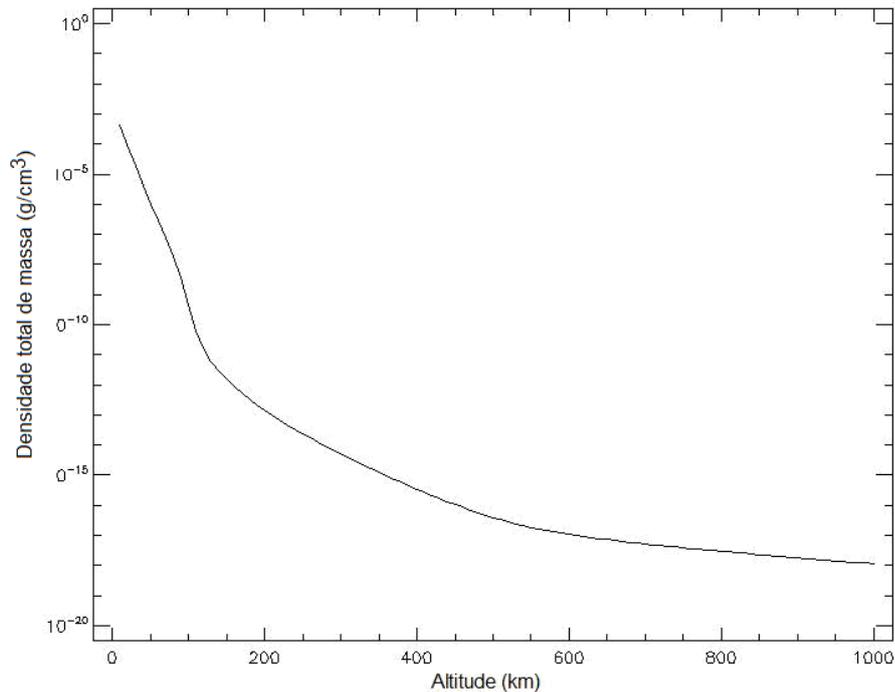


Figura 12 - Densidade atmosférica em função da altitude (dados extraídos de SPENVIS (2010)).

A relação entre a pressão decorrente da densidade atmosférica e a altitude é dada por meio do modelo de Atmosfera Padrão Internacional (*International Standard Atmosphere* - ISA) e nela se baseiam os altímetros de aeronaves, que determinam o denominado "nível de voo" (em Inglês, *flight level*, abreviado por FL) por meio da determinação da pressão e da temperatura externas à aeronave. Sendo assim, o nível de voo é a altitude esperada, em unidades de centenas de pés, correspondente à determinada condição de temperatura e pressão, considerando uma atmosfera padrão ISA.

Ocorre que, geralmente, a atmosfera sofre influências que a afastam da condição padrão, fazendo com que a altitude assim determinada não corresponda à altitude real de voo. A determinação da altitude em termos de nível de voo é, entretanto, bastante conveniente para fins de determinação da dose, pois implica em que a aeronave esteja voando sempre sob a mesma densidade atmosférica, independentemente da altitude real, garantindo assim a mesma condição de interação da radiação cósmica. Sendo assim, neste trabalho é utilizado o nível de voo para medições da altitude da aeronave, sendo ele indicado pela sigla FL, seguida do valor em centenas de pés (por exemplo, FL390 indica nível de voo 390, correspondendo a 39.000 pés). Para manter a compatibilidade com o sistema internacional de unidades, as altitudes assim determinadas foram convertidas em

metros utilizando a atmosfera padrão ISA. Para medições em solo é utilizada a altitude real do ponto de medida, em metros.

2.7 Interação da radiação cósmica e seus subprodutos com a atmosfera

As partículas da radiação cósmica que penetram as camadas mais externas do campo geomagnético interagem por meio de processos de colisões elásticas e inelásticas com os núcleos dos constituintes atmosféricos, produzindo uma cascata de radiações secundárias que inclui mésons pi neutros e carregados (π^0 and π^\pm), prótons, nêutrons e suas anti-partículas e mésons pesados (K) (HARTMANN, 2005; OLIVEIRA, 2000; BRUM, 2004), conforme pode ser observado na Figura 13.

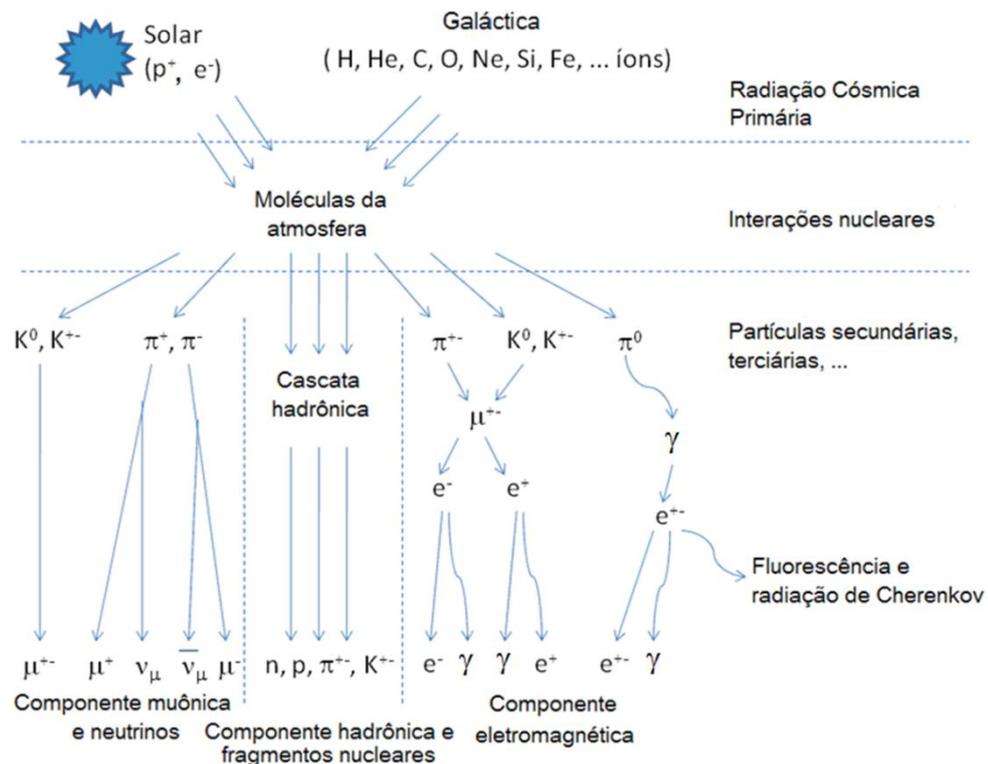


Figura 13 - Representação das reações envolvidas na interação das partículas da radiação cósmica primária com a atmosfera, dando origem aos raios cósmicos secundários.

A contribuição dos diferentes tipos de partículas no equivalente de dose ambiente depende da altitude, conforme pode ser observado nas Figuras 14 e 15. Na altitude de interesse para aviação, os principais componentes que determinam a dose absorvida no tecido são, em ordem de importância, nêutrons, elétrons, fótons, prótons, múons e píons carregados.

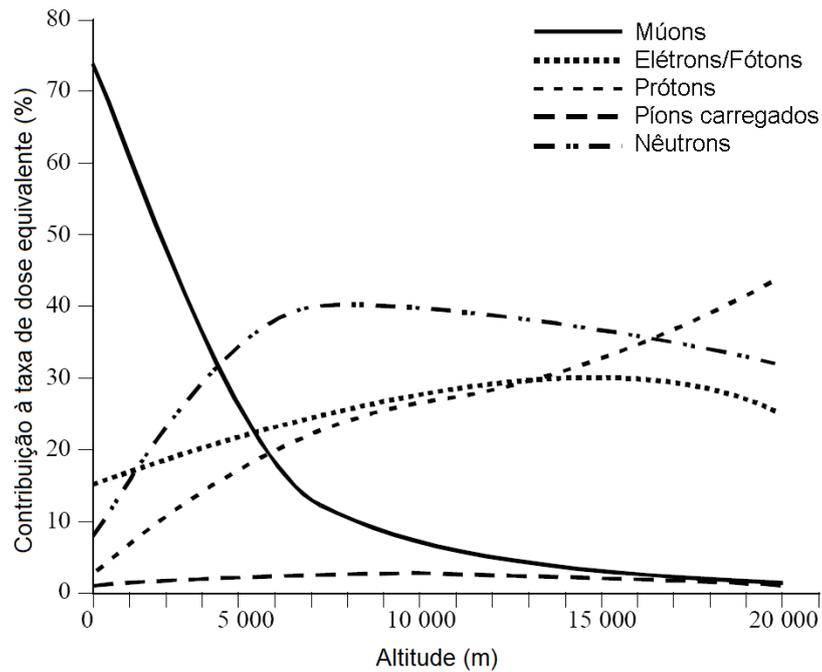


Figura 14 - Composição da taxa de equivalente de dose devido à radiação cósmica em função da altitude (extraído e adaptado do UNSCEAR (2000)).

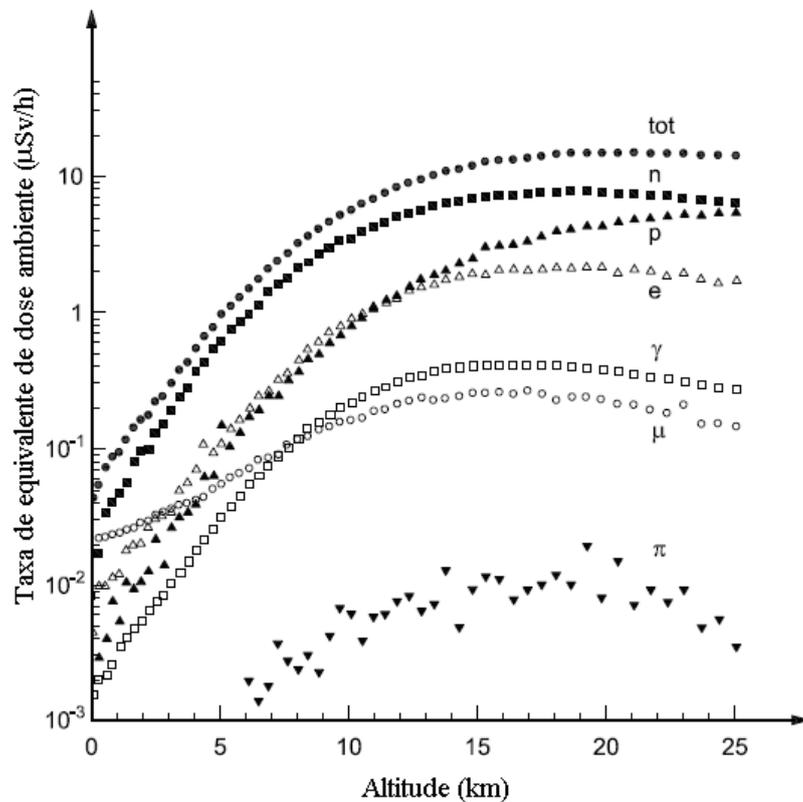


Figura 15 - Taxa de equivalente de dose ambiente em função da altitude barométrica padrão para vários componentes da radiação cósmica atmosférica em época de mínimo solar de 465 MV, em um local com rigidez magnética de 1,0 GV (extraído e adaptado da ISO (2006)).

O tipo de interação com a matéria varia conforme o componente. Por exemplo, píons carregados perdem sua energia principalmente por meio de interações coulombianas. Píons negativos, quando perdem toda a sua energia, são usualmente capturados por núcleos atômicos os quais sofrem desintegração (chamada fragmentação do tipo estrela), emitindo uma variedade de partículas de alta transferência linear de energia - LET (ICRP, 2007). Múons podem ser: capturados pelos núcleos atômicos, decair ou perder sua energia por interações coulombianas, sendo que em qualquer dos casos a energia será convertida em radiações diretamente ionizantes, como elétrons, ou em raios x.

Como pode ser observado na Tabela 1, o resultado final dos diversos fenômenos de interação com a matéria, para os diferentes componentes da radiação cósmica, resulta em produção de cascata eletromagnética ou de partículas de alto LET e nêutrons. A abordagem adotada neste trabalho, que é a mesma abordagem utilizada por diversos autores que efetuaram medidas do equivalente de dose ambiente em voo, é a de classificar os componentes medidos entre componentes neutrônico e não neutrônico (VERGARA and ROMÁN, 2009; ROMERO et al., 2004; ICRU, 2010). A parte considerada como componente neutrônico abrange as interações de nêutrons e as interações nucleares dos componentes protônicos de altas energias, que geram partículas secundárias de alta transferência linear de energia ($>10 \text{ keV}/\mu\text{m}$), enquanto que a parte considerada como componente não neutrônico corresponde aproximadamente aos componentes de baixa transferência linear de energia ($<10 \text{ keV}/\mu\text{m}$).

Tabela 1 - Interação das radiações com a matéria.

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

A distribuição em energia de cada componente da radiação cósmica, para altitudes típicas de aviação, extraída da norma ISO 20785-1 (ISO, 2006), é apresentada no Anexo B.

A distribuição angular da radiação cósmica, para fins de determinação do equivalente de dose ambiente em aeronaves, é usualmente considerada como sendo isotrópica, ou seja, a fluência por unidade de ângulo sólido é independente da direção de incidência. Esta premissa é discutida por alguns autores, principalmente para os componentes de alta energia que tendem a possuir acentuada direcionalidade (PELLICIONI, 2004). Outro fator importante que vai de encontro à esta premissa é a contribuição da radiação espalhada pelas estruturas da aeronave, que sofre influência principalmente da localização do compartimento de combustível da aeronave, bem como do posicionamento dos passageiros e da carga (FERRARI et al., 2004; DYER and LEI, 2001). Estudos publicados por Ferrari et al. (2005) demonstraram que, para determinados

tipos de aeronave, desconsiderar os efeitos de atenuação decorrentes de tais estruturas pode levar a uma superestimação, principalmente das doses decorrentes da radiação incidente pela parte inferior da aeronave. A ICRU, em sua recomendação de número 84 (ICRU, 2010) utiliza uma geometria denominada semi-isotrópica, que consiste em uma incidência semiesférica pelo hemisfério superior. Entretanto, apesar da recente adoção da geometria semi-isotrópica pela ICRU (ICRU, 2010), Sato et al. (2011b) mostram que a geometria isotrópica ainda é a mais adequada para reproduzir a dose efetiva recebida por tripulações, utilizando-se os fatores definidos pela ICRP 103 (2007).

2.8 Grandeza dosimétrica limitante: dose efetiva

A grandeza de proteção Dose Efetiva (E), de acordo com a ICRP 60 (1991), é dada por:

$$E = \sum_T W_T \sum_R W_R D_{T,R} , \quad (4)$$

onde W_T representa o fator de ponderação para o órgão ou tecido T , W_R é o fator de ponderação para o tipo de radiação R e $D_{T,R}$ é a dose absorvida média no órgão ou tecido T , devido à radiação de tipo R . Os fatores de ponderação W_T e W_R recomendados na publicação 60 da ICRP (ICRP, 1991) são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. A mesma definição da grandeza Dose Efetiva (E) é adotada pela ICRU em sua recomendação de número 84 (ICRU, 2010).

Tabela 2 - Fatores de ponderação (W_T) recomendados pela publicação 60 da ICRP, para o órgão ou tecido T (ICRP, 1991).

Órgão ou tecido	W_T
Gônadas	0,20
Medula óssea vermelha, cólon, pulmão, estômago	0,12
Bexiga, peito, fígado, esôfago, tireóide, restante	0,05
Superfície óssea, pele	0,01

Tabela 3 - Fatores de ponderação (W_R) recomendados pela publicação 60 da ICRP, para o tipo de radiação R (ICRP, 1991).

Radiação	W_R
Fótons	1
Elétrons e múons	1
Nêutrons ($E < 10$ keV)	5
Nêutrons ($10 \text{ keV} \leq E \leq 100 \text{ keV}$)	10
Nêutrons ($100 \text{ keV} < E \leq 2 \text{ MeV}$)	20
Nêutrons ($2 \text{ MeV} < E \leq 20 \text{ MeV}$)	10
Nêutrons ($E > 20 \text{ MeV}$)	5
Prótons (exceto prótons de recuo), ($E > 2 \text{ MeV}$)	5
Partículas alfa, fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

Para outros tipos de radiações e energias não incluídos na Tabela 3, a própria publicação 60 da ICRP (ICRP, 1991) recomenda que seja feita uma aproximação do W_R por meio do cálculo do fator de qualidade médio (\bar{Q}), a uma profundidade de 10 mm na esfera ICRU¹, por meio da Equação 5, onde L é o coeficiente de transferência linear de energia e $D_L dL$ é a dose absorvida a uma profundidade de 10 mm entre o coeficiente de transferência linear de energia L e $L+dL$, sendo que $Q(L)$ é o correspondente fator de qualidade (PELLICCIONI, 1998).

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_{L=0}^{\infty} Q(L) D_L dL \quad , \quad (5)$$

onde D representa a integral de 0 ao infinito de $D_L dL$.

A publicação 103 da ICRP (ICRP, 2007) recomenda que seja utilizada a função representada na Equação 6 para o cálculo do $Q(L)$,

$$Q(L) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \rightarrow L/(keV/\mu m) < 10 \\ 0,32 L/(keV/\mu m) - 2,2 & \rightarrow 10 \leq L/(keV/\mu m) \leq 100 \\ 300/\sqrt{L/(keV/\mu m)} & \rightarrow L/(keV/\mu m) > 100 \end{array} \right\} \quad (6)$$

¹ Trata-se de um objeto simulador (*phantom*) constituído de uma esfera de 30 cm, composta de material tecido-equivalente com densidade de 1 g/cm³ e composição em massa de 76,2 % de oxigênio, 11,1 % de carbono, 10,1 % de hidrogênio e 2,6 % de nitrogênio.

Foram realizados vários estudos com o objetivo de verificar a adequação desses fatores para as energias e a diversidade de partículas comumente encontradas na radiação cósmica incidente em aeronaves (PELLICCIONI, 1998; SCHREWE et al., 1999). Estudos indicam (BARTLETT, 1999 e CURZIO et al., 2001) que, de fato, para a maior parte dos componentes da dose em altitudes de voo de aeronaves (9 a 12 km), as magnitudes da dose efetiva e do equivalente de dose ambiente são similares. Há uma exceção feita para o componente protônico, cuja magnitude da dose efetiva é 5 vezes superior ao equivalente de dose ambiente, fazendo com que os valores de dose efetiva sejam, ao final, 20 % a 30 % superiores ao equivalente de dose ambiente (BARTLETT, 1999; BARTLETT, 2004).

Modificações nestes fatores foram incluídas na publicação 103 da ICRP (2007), onde o fator W_R para prótons foi alterado de 5 para 2 em decorrência da pequena importância dos prótons com energias menores do que 5 a 10 MeV no cálculo da dose efetiva, bem como devido ao fato de que prótons de alta energia são pouco efetivos na deposição de energia e podem praticamente ser caracterizados como radiação de baixo LET. Com as modificações no fator de ponderação para prótons, a contribuição dos prótons na dose efetiva para tripulações de aeronaves passa do intervalo de 22 % a 27 % para cerca de 9 % a 11 % da dose total, dependendo da rota efetuada pela aeronave (DIETZE, 2009).

Foi também sugerida uma nova função para o cálculo do fator W_R para nêutrons, de forma que os novos fatores de ponderação da radiação são apresentados na Tabela 4 e, no caso de nêutrons, a Figura 16 apresenta os novos fatores de ponderação, em comparação com os anteriores recomendados pela ICRP 60 (ICRP, 1991), onde se pode observar que as modificações diminuíram o fator de ponderação para nêutrons com energias inferiores a 1 MeV. Estas modificações implicam em pouco impacto para o caso de tripulações de aeronaves, reduzindo em poucas unidades percentuais o valor final da dose efetiva (DIETZE, 2009), o que pode ser explicado pela baixa importância relativa dos nêutrons de menor energia na dose total (vide dados e análise a serem apresentados na seção 4.2, em especial na Figura 46).

Tabela 4 - Fatores de ponderação para radiação (W_R), propostos pela ICRP 103 (ICRP, 2007).

Tipo de radiação	Fatores de ponderação, W_R
Fótons	1
Elétrons e múons	1
Prótons e píons carregados	2
Partículas alfa, fragmentos de fissão e íons pesados	20
De acordo com a faixa de energia do nêutron (E_n):	
Nêutrons	$E_n < 1 \text{ MeV} \rightarrow W_R = 2,5 + 18,2 e^{-[\ln(E_n)]^2 / 6}$
	$1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \rightarrow W_R = 5 + 17 e^{-[\ln(2E_n)]^2 / 6}$
	$E_n > 50 \text{ MeV} \rightarrow W_R = 2,5 + 3,25 e^{-[\ln(0,04E_n)]^2 / 6}$

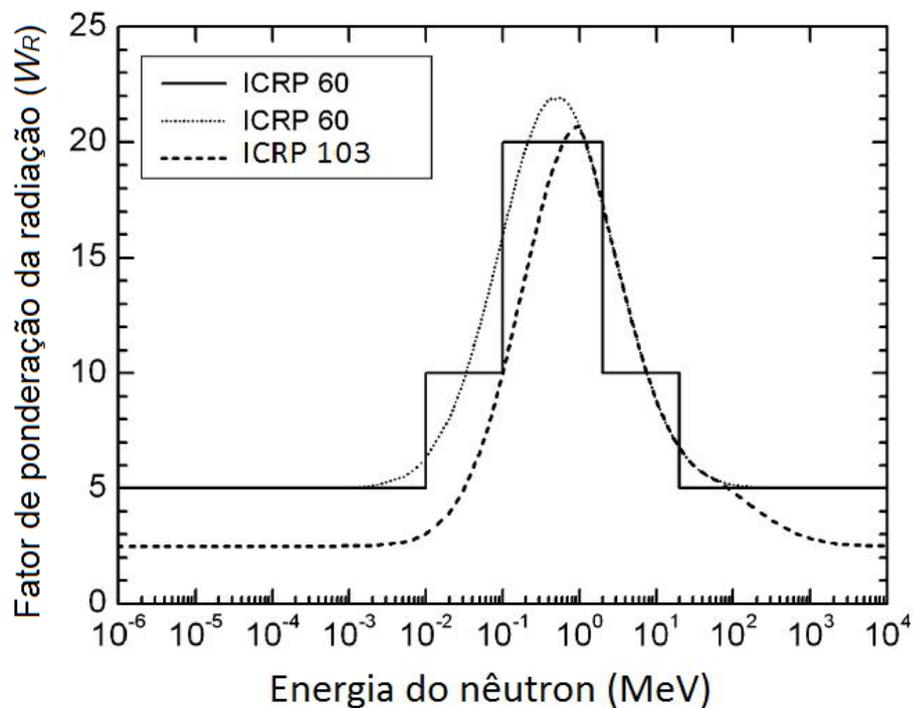


Figura 16 - Fatores de ponderação para nêutrons propostos pela ICRP 103 (ICRP, 2007), comparativamente aos fatores propostos pela ICRP 60 (ICRP, 1991).

De forma similar, a ICRP 103 (ICRP, 2007) propôs novos valores para o W_T em substituição aos anteriores, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores de ponderação para tecidos (W_T) propostos pela ICRP 103 (ICRP, 2007).

Órgão ou tecido	Número de órgãos/tecidos	W_T	Contribuição total
Pulmão, estômago, cólon, medula óssea, mama, restante	6	0,12	0,72
Gônadas	1	0,08	0,08
Tireóide, esôfago, bexiga, fígado	4	0,04	0,04
Superfície óssea, pele, encéfalo, glândulas salivares	4	0,01	0,04

2.9 Grandeza dosimétrica operacional: equivalente de dose ambiente

Grandezas operacionais são aquelas grandezas diretamente mensuráveis, estabelecidas com a finalidade de obter uma estimativa para os valores das grandezas de proteção, como a dose efetiva, sob determinada condição de irradiação.

Para todos os tipos de radiação externa, a grandeza operacional para monitoramento de área é definida com base no valor do equivalente de dose em um determinado ponto do objeto simulador padrão denominado esfera ICRU.

A grandeza operacional indicada para monitoração de área para radiações penetrantes é o $H^*(10)$ (equivalente de dose ambiente)¹. Em um ponto de interesse no campo de radiação real o $H^*(10)$ é o equivalente de dose que seria obtido pelo correspondente campo de radiação alinhado e expandido na esfera da ICRU à profundidade d igual a 10 mm na direção do vetor raio da esfera, oposto à direção de incidência da radiação. Como resultado do imaginário alinhamento e da expansão do campo de radiação, as contribuições das radiações originárias de diferentes direções são somadas, fazendo com que $H^*(10)$ seja independente da distribuição direcional da radiação no campo real. Isto implica que a leitura de um dosímetro de área para a grandeza $H^*(10)$ deve, idealmente, ser independente da distribuição direcional da radiação incidente e que a referida grandeza

¹ Neste trabalho, por tratar-se de texto científico e por questões de compatibilidade com as normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear, será utilizado o termo “equivalente de dose ambiente” para representar a grandeza $H^*(10)$. Entretanto, deve ser feita a ressalva de que há discussões, baseadas na etimologia e constituição da Língua Portuguesa que, em termos cultos, indicam a utilização dos termos “equivalente à dose ambiente” ou “dose equivalente ambiente”, ou ainda, “equivalente dose ambiente”, como traduções mais corretas para o termo original em Francês: *équivalent de dose ambiant* (SORDI, 2011).

deve fornecer uma estimativa conservativa¹ da dose efetiva que uma pessoa recebe ao permanecer na referida posição.

Na maior parte das situações experimentais, a grandeza equivalente de dose ambiente cumpre o requisito de ser uma estimativa conservativa para o valor das grandezas limitantes. Entretanto, este não é sempre o caso para pessoas submetidas a campos de radiação de altas energias, como os de aceleradores de alta energia e campos de radiação cósmica em aeronaves, conforme alertado no parágrafo 357 da publicação 74 da ICRP (ICRP, 1997). Para campos de energias altas, a profundidade de medida de 10 mm na esfera ICRU pode não ser suficiente para estabelecer o equilíbrio de partículas carregadas, podendo levar a uma subestimação da dose efetiva.

Já no ano de 2008, a ICRP 103 (2007), em seu parágrafo B 164, considera que o equivalente de dose ambiente pode ser considerado um estimador apropriado para a dose efetiva, para o caso de exposição das tripulações à radiação cósmica e nas situações onde o monitoramento individual não é aplicável, desde que sejam consideradas as modificações propostas na publicação 103 (ICRP, 2007) com relação aos fatores de peso para nêutrons e prótons.

Entretanto, a Comissão Internacional de Medidas e Unidades de Radiação (*International Commission on Radiation Units and Measurements - ICRU*), em sua publicação recente de número 84 (ICRU, 2010), que foi elaborada por meio de um esforço conjunto das comissões ICRU e ICRP, estabelece coeficientes de conversão dependentes da rigidez de corte vertical, a serem utilizados para converter a grandeza equivalente de dose ambiente em dose efetiva. A relação entre a dose efetiva e o equivalente de dose ambiente só pode ser obtida por meio de simulação computacional e, no caso da publicação ICRU 84 (ICRU, 2010), os cálculos foram baseados nos coeficientes obtidos por Ferrari et al. (2001) e Pellicioni (2000), baseados em condições de referência pré-estabelecidas e considerando uma incidência isotrópica pelo hemisfério superior, denominada incidência semi-isotrópica. Estes coeficientes, apresentados na Tabela 6, são aplicáveis aos valores de referência apresentados na publicação ICRU 84 (ICRU, 2010) e são aplicados para as conversões entre dose efetiva e equivalente de dose ambiente no presente estudo.

¹ Neste texto, entende-se por estimativa conservativa aquela estimativa realizada de forma a que o valor da grandeza $H^*(10)$ seja sempre superior ou igual ao valor que seria obtido para a dose efetiva na mesma situação de medição, sendo, portanto, restritiva em relação à dose efetiva.

Tabela 6 – Razão E/H*(10) para diferentes valores de rigidêz de corte vertical e diferentes níveis de voo. A dose efetiva foi calculada desconsiderando os efeitos da aeronave (extraído e adaptado da recomendação ICRU 84 (2010)).

Rigidêz de corte vertical (GV)	E/H*(10) (Sv/Sv)		
	Nível de voo 9.448,8 m (FL310)	Nível de voo 10.668 m (FL350)	Nível de voo 11.887,2 m (FL390)
0,4	0,88	0,90	0,91
6	0,90	0,91	0,92
17	0,91	0,93	0,94

Todavia, deve-se observar que a discussão referente à relação entre as grandezas dose efetiva e equivalente de dose ambiente para o caso de tripulações de aeronaves ainda parece estar distante de um posicionamento final e definitivo. Um recente artigo de Sato e colaboradores (SATO et al., 2011a) indica que, mesmo para geometrias convencionais, o equivalente de dose ambiente calculado conforme os critérios propostos pela publicação 103 da ICRP (ICRP, 2007), ainda não é uma grandeza conservativa em relação à dose efetiva, para casos de instalações que operam com radiações de energias altas.

2.10 Códigos computacionais para estimativa da dose oriunda da radiação cósmica

Nesta seção são descritos resumidamente os princípios de funcionamento e as características principais dos códigos computacionais mais utilizados para estimativa da dose oriunda da radiação cósmica, cujas características básicas mais relevantes são sumarizadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características básicas dos códigos de cálculo de dose.

Código	Disponibilidade	Grandeza de resposta	Fatores de conversão para dose	Tipo de cálculo
AVIDOS	On-line	E	ICRP 60 (ICRP, 1991)	Rota
CARI-6	Pacote	E, \dot{E}	ICRP 60 (ICRP, 1991)	Rota, coordenada fixa
EPCARD	On-line	E, \dot{E}	ICRP 60 (ICRP, 1991)	Rota, coordenada fixa
EXPACS	Pacote	$E, \dot{E}, H^*(10), \dot{H}^*(10)$	ICRP 60 ou ICRP 103 (ICRP, 1991; ICRP, 2008)	Coordenada fixa
PCAIRE	On-line	E	ICRP 60 (ICRP, 1991)	Rota
QARM	On-line	$E, \dot{E}, H^*(10), \dot{H}^*(10)$	ICRP 74 (ICRP, 1997)	Rota, coordenada fixa
SIEVERT	On-line	E	ICRP 60 e EPCARD (ICRP, 1991)	Rota

E = dose efetiva;

\dot{E} = taxa de dose efetiva;

$H^*(10)$ = equivalente de dose ambiente;

$\dot{H}^*(10)$ = taxa de equivalente de dose ambiente.

2.10.1 AVIDOS

O código AVIDOS (LATOCHA et al., 2009) foi desenvolvido e certificado pelo Instituto Austríaco de Tecnologia (AIT, sigla em Inglês) conforme a regulamentação europeia, para ser utilizado em todos os países da comunidade europeia. O código utiliza um modelo multiparamétrico elaborado a partir de simulações da exposição à radiação cósmica efetuadas pelo método de Monte Carlo por meio do código FLUKA (ROESLER et al., 2002). O código AVIDOS calcula a dose efetiva acumulada na rota mais curta entre dois aeroportos, selecionáveis em uma listagem de aeroportos disponíveis, ou entre dois pontos geográficos selecionáveis por meio da indicação direta em um mapa mundi. Na listagem de aeroportos nativa do código só existem cinco aeroportos brasileiros. O usuário deve fornecer a data do voo e pode selecionar a altitude e o tempo de duração do voo, ou aceitar os valores propostos automaticamente pelo código, não sendo possível considerar voos com mais de um nível de altitude. O código é disponível para uso público por meio de uma interface gráfica on-line, acessível via internet (AVIDOS, 2011).

2.10.2 CARI-6

O código CARI-6 (EURADOS, 2004) foi elaborado pelo *Civil Aerospace Medical Institute*, pertencente ao *Federal Aviation Administration (FAA) dos EUA* e é baseado no código LUIN (O'BRIEN, 1978; O'BRIEN et al., 2003), que se utiliza da solução analítica da equação geral de transporte para o campo oriundo da radiação cósmica. O código calcula a dose total no caminho mais curto entre dois pontos, considerando a curvatura geodésica entre os aeroportos de origem e destino. O código é baseado em sistema operacional DOS e requer que o usuário forneça a data do voo, os aeroportos de origem e destino, os patamares de altitude, a duração do voo em cada patamar de altitude e o tempo de ascensão e descida (FEDERICO et al., 2010a). A base de dados nativa de aeroportos pode ser incrementada pelo usuário, tornando o programa facilmente adaptável a diferentes localidades. O conhecimento do potencial heliocêntrico¹ é necessário como parâmetro de entrada do código, muito embora o próprio programa possua uma base de dados de potencial heliocêntrico nativa. Novos valores médios mensais do potencial heliocêntrico podem ser obtidos no site da FAA (FAA, 2011a) e atualizados no código, sendo eles suficientes para cálculos de rotina. Entretanto, para aplicações científicas é recomendável a obtenção do potencial heliocêntrico para a data e horário do voo, que deve ser feita por solicitação direta à FAA.

2.10.3 EPCARD

O código EPCARD, elaborado pelo Centro de Pesquisa Alemão para Saúde Ambiental (*German Research Center for Environmental Health*), baseia-se na simulação da propagação da radiação cósmica pelo método de Monte Carlo, por meio do código FLUKA (ROESLER et al., 2002). O código EPCARD possui duas versões atuais. A primeira versão, aqui avaliada, possui acesso livre para uso público por meio de uma interface gráfica on-line acessível via internet (EPCARD, 2011) e permite o cálculo da taxa de dose efetiva em coordenadas fixas ou dose efetiva acumulada em rotas entre aeroportos escolhidos em uma listagem de aeroportos pré-estabelecida (na qual só existem cinco aeroportos brasileiros). Nesta versão on-line o usuário deve selecionar os aeroportos de origem e destino, fornecer o número e altitude dos patamares de voo e respectivos tempos de duração, bem como a data do voo.

¹ O potencial heliocêntrico é o resultado da solução da equação de difusão dos raios cósmicos através do vento solar (O'BRIEN et al., 2005). Este dado pode ser obtido no endereço eletrônico da FAA (FAA, 2011a).

2.10.4 EXPACS

Embora não possa ser considerado propriamente um código de cálculo de dose em rotas, o código EXPACS consiste em uma planilha que permite a determinação da taxa de dose para qualquer posição geográfica e altitude desejada pelo usuário (no intervalo de 0 a 20 km de altitude). O código EXPACS foi elaborado a partir de simulações da interação da radiação cósmica pelo método de Monte Carlo, por meio do código PHITS, posteriormente parametrizadas em um código analítico denominado PARMA (SATO and NIITA, 2006; SATO et al., 2008). Como parâmetros de entrada do código EXPACS, o usuário é solicitado a inserir as coordenadas geográficas e altitude do ponto desejado e os parâmetros geofísicos são fornecidos pelo usuário na forma da data desejada, caso ela se encontre dentro do intervalo de datas para o qual o código possui os parâmetros geofísicos armazenados, ou então o usuário pode inserir diretamente o potencial de modulação solar para a data pretendida ou ainda a contagem de nêutrons obtida na estação de monitoramento de nêutrons de Thule (Groenlândia). Uma diferença importante desse código reside no fato de que ele permite estimar a influência do ambiente circundante nos resultados de dose, possuindo, já como ambientes circundantes pré-parametrizados, o solo, a cabine da aeronave e a posição dos pilotos. No caso de aeronaves, o usuário é solicitado ainda a inserir a massa aproximada da aeronave, de forma ao código poder estimar a sua influência na blindagem e espalhamento da radiação. Os resultados podem ser obtidos na forma de taxa de dose efetiva ou taxa de equivalente de dose ambiente, optando pelo cálculo com os fatores de ponderação da ICRP 60 (ICRP, 1991) ou da ICRP 103 (ICRP, 2007). Os resultados são apresentados ainda separadamente por componente da radiação (nêutrons, prótons, núcleos de hélio, múons positivos e negativos, elétrons, pósitrons e fótons), com a apresentação dos espectros de partículas para cada componente.

2.10.5 PCAIRE

O código PCAIRE (LEWIS et al., 2005) utiliza um processo composto de um conjunto de funções ajustadas a dados experimentais de equivalente de dose ambiente coletados por meio de um contador proporcional equivalente ao tecido em um largo intervalo de latitudes geomagnéticas e de ciclo solar. O usuário é solicitado a fornecer a data do voo, os aeroportos de origem e destino, a altitude e duração dos voos em cada altitude. A base de dados de aeroportos é composta dos aeroportos registrados com códigos da Associação Internacional de Transporte Aéreo (*International Air Transport Association* - IATA) ou da Organização Internacional da Aviação Civil (*International Civil Aviation*

Organization -ICAO), sendo bastante abrangente, mas não permitindo o acréscimo de aeroportos ou localidades pelo usuário. Uma rota circular é produzida entre os dois aeroportos e as coordenadas e a dose de radiação são calculadas a cada minuto do voo por meio de interpolação em uma ampla base de dados. A conversão destes resultados em dose efetiva é efetuada por meio de uma relação baseada em cálculos efetuados por meio dos códigos FLUKA e LUN. O código PCAIRE é disponível on-line mediante registro gratuito e os resultados dos cálculos são armazenados em um relatório dosimétrico do usuário, para análise posterior.

2.10.6 QARM

O QARM, versão 1.2, é um código que utiliza uma base de dados de matrizes resposta geradas por cálculos de propagação da radiação cósmica efetuados pelo método de Monte Carlo, para energias de até 1 TeV. O código possui uma interface gráfica on-line, acessível via internet, e permite o cálculo de taxas de dose para posições fixas, bem como doses acumuladas em rotas definidas pelo usuário, fornecendo a resposta na grandeza dose efetiva e na grandeza equivalente de dose ambiente, utilizando os fatores de conversão da ICRP 74 (1997). O usuário é solicitado a inserir os dados de coordenadas geográficas ou aeroportos de origem e destino, data, tempo e altitude de voo, bem como deve inserir dados geofísicos da data, tais como o índice Kp ou a contagem de nêutrons de alguns observatórios, caso esteja calculando doses em eventos solares detectáveis ao nível do solo (GLE's).

2.10.7 SIEVERT

O código SIEVERT (BOTTOLLIER-DEPOIS et al., 2007) foi desenvolvido pelo Diretorado Geral Francês de Aviação Civil (*French General Directorate of Civil Aviation* - DGAC) e instituições parceiras. O código possui uma versão acessível on-line via internet e permite o cálculo da dose em rotas entre duas localidades escolhidas pelo usuário. O usuário é convidado a inserir a origem e o destino do voo, dentre as localidades existentes na base de dados da qual constam 27 cidades brasileiras, e também as datas e horários de partida e chegada. O nível de voo não é selecionável diretamente e o usuário deve selecionar dentre as opções: subsônico, supersônico, jato executivo e turbo-propelido. O código utiliza dados do código EPCARD para criar uma matriz de taxas de dose em função de coordenadas geográficas e altitudes, que é corrigida em função do potencial solar. Uma das diferenças desse código consiste no fato que ele efetua estimativas das taxas de dose oriundas de eventos solares detectáveis em solo (GLE) por meio de

monitoramento contínuo efetuado em estações em solo e detectores em aeronaves. Esta funcionalidade permite efetuar a estimativa de doses em tripulações voando durante a ocorrência de tais eventos solares.

2.10.8 Códigos selecionados para utilização

Foram selecionados os códigos EXPACS, EPCARD, CARI-6 e QARM, para serem utilizados no presente trabalho, na determinação da dose em coordenadas fixadas.

Para a determinação da dose em rotas foram utilizados os códigos QARM, AVIDOS, CARI-6 e PCAIRE. Os códigos computacionais EPCARD e SIEVERT não foram utilizados para essa finalidade devido à pouca representatividade de aeroportos brasileiros em sua base de dados nativa e à impossibilidade de determinar os destinos com precisão por meio de coordenadas geográficas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os principais materiais e sistemas utilizados no desenvolvimento do trabalho, bem como sua preparação e características principais.

3.1 Detectores ativos

3.1.1 Sistema de detecção THERMO FH

O sistema de detecção THERMO FH consiste de uma eletrônica de aquisição THERMO EBERLINE, modelo FH40G-10, com capacidade de programação remota por meio de conexão a um computador, acoplada a um detector proporcional interno e que permite a conexão de mais uma sonda externa com aquisição simultânea. O sistema foi projetado e calibrado para fornecer os resultados diretamente na grandeza operacional equivalente de dose ambiente ($H^*(10)$) e pode ser operado diretamente ou programado para adquirir medidas de taxa de dose em intervalos de tempo estabelecidos pelo usuário, que podem variar desde 1 s a várias horas. O sistema possui uma memória interna volátil que permite armazenar os resultados de até 256 pontos de medição, que podem ser coletados posteriormente pelo usuário. Cada ponto de medição consiste de um registro com informações que abrangem os horários inicial e final de cada intervalo de medição, o resultado da medição da sonda proporcional interna, a unidade de medição, o resultado da medição da sonda opcional externa, a unidade de medição, o intervalo de medição (em segundos) e o tipo de sonda externa acoplada.

Para as medições apresentadas neste trabalho foi acoplada ao sistema a sonda externa THERMO FHT-762 (WENDI-II), que consiste de uma sonda de nêutrons tipo proporcional de ^3He , envolvida com uma camada de tungstênio e uma camada externa de polietileno, cujo projeto permite a obtenção da resposta para nêutrons com energias até cerca de 5 GeV. A curva de eficiência em função da energia para a grandeza equivalente de dose ambiente é apresentada na Figura 17, em comparação com a curva obtida em outros equipamentos convencionais.

O sistema completo pode ser visto na Figura 18 e as suas características principais são apresentadas na Tabela 8.

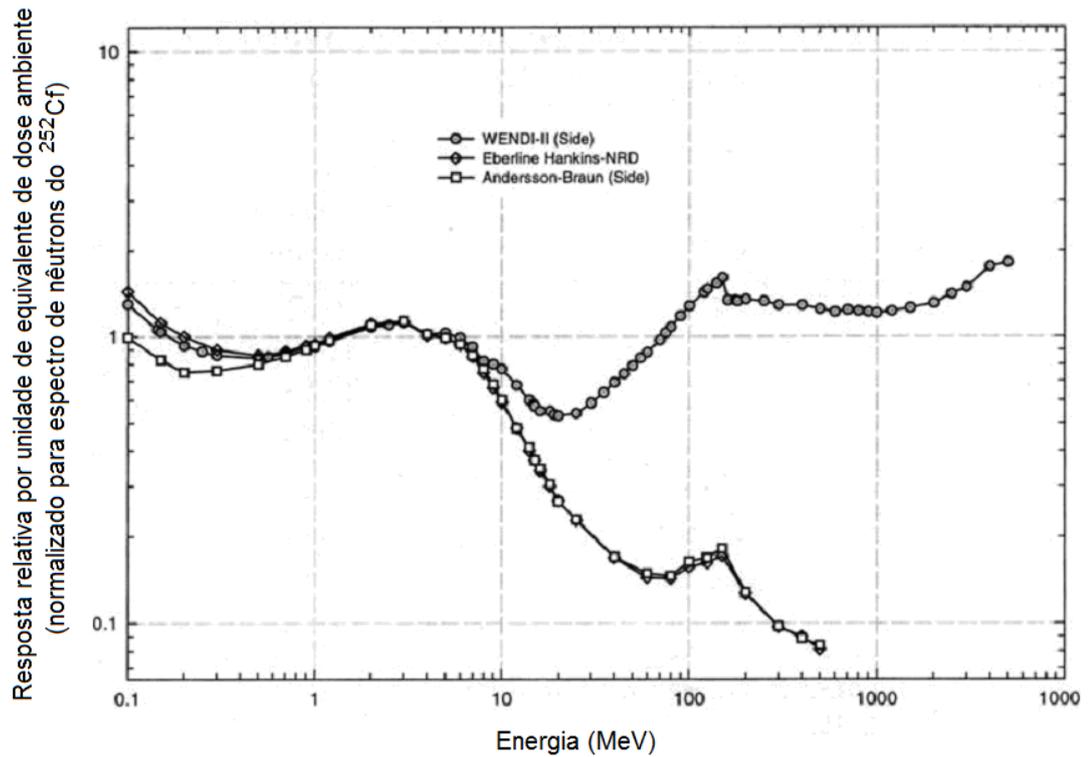


Figura 17 - Curva de resposta em função da energia do nêutron incidente para a sonda FHT-762 (WENDI-II), em comparação com aquela obtida para outros monitores convencionais do tipo Eberline Hankins-NRD e Andersson-Braun (extraído e adaptado de Thermo-Scientific (2009)).



Figura 18 - Sistema THERMO FH.

Tabela 8 - Principais características da sonda FHT-762 (THERMO-SCIENTIFIC, 2009).

Parâmetro	Valor	Observações
Intervalo de medida	(0,001 a 1×10^6) $\mu\text{Sv/h}$	
Sensibilidade	0,84 cps / ($\mu\text{Sv/h}$)	Referenciado a nêutrons do ^{252}Cf
Linearidade	- 9% a + 11%	
Intervalo de energia	25 meV a 5 GeV	Conforme ICRP 74
Dependência angular	$\pm 20 \%$	
Intervalo de pressão	(500 a 1500) hPa	

3.1.2 Sistema de detecção QDos

O detector QDos é um sistema de detecção desenvolvido pelo laboratório QINETIQ (DYER et al., 2009; HANDS and DYER, 2009), baseado em diodos semicondutores tipo PIN e projetado exclusivamente para uso em aeronaves. Trata-se de um sistema previamente caracterizado (DYER et al., 2009; HANDS and DYER, 2009), que permite obter medidas da grandeza operacional Equivalente de Dose Ambiente ($H^*(10)$). O referido equipamento possui alimentação autônoma e permite a aquisição das medidas de taxa de dose equivalente em intervalos de tempo programáveis pelo usuário, armazenando as medidas em uma memória não volátil interna, de forma a permitir serem coletadas posteriormente por meio de conexão a um computador remoto e avaliadas por meio de uma planilha eletrônica.

A medição é efetuada por meio de uma classificação de altura de pulso, que está relacionada diretamente com a quantidade de energia depositada pela partícula no material do diodo. São utilizados quinze canais de detecção, correspondendo a quinze diferentes intervalos de deposição de energia onde, para cada intervalo, é associado um coeficiente de conversão que permite obter a resposta na grandeza $H^*(10)$. Devido ao princípio de funcionamento, as partículas indiretamente ionizantes, como por exemplo nêutrons, são detectadas por meio de seus subprodutos (prótons de recuo, emissões ionizantes provenientes de núcleos excitados, etc.), tornando praticamente impossível a discriminação dos pulsos provenientes de nêutrons em relação aos pulsos provenientes de outras partículas, como prótons, por exemplo.

O sistema QDos permite obter medidas com incertezas sistemáticas menores do que 5 % e incertezas estatísticas, para medições em aeronaves, em torno de 2 % (DYER et al., 2009; HANDS e DYER, 2009) e pode ser visualizado na Figura 19.

Este sistema pertence ao Laboratório QINETIQ (Reino Unido) e foi cedido em regime de colaboração científica pelo pesquisador Dr. Clive Dyer para ser utilizado nas medições em voo na região da AMAS.



Figura 19 - Sistema Qdos (DYER et al., 2009).

3.1.3 Espectrômetro de esferas de Bonner

O espectrômetro de esferas de Bonner utilizado neste trabalho (Figura 20) consiste de um detector de nêutrons térmicos de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ e um conjunto de seis esferas de polietileno (PE) com diâmetros de 5,08 cm, 7,62 cm, 12,7 cm, 20,32 cm, 25,4 cm e 30,48 cm, que podem ser acopladas ao detector, permitindo o registro de sete diferentes contagens de nêutrons, com diferentes termalizações e curvas de resposta em função da energia. Este sistema pertence ao Laboratório de Nêutrons do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN-RJ) e foi cedido em regime de colaboração científica.

O detector foi conectado a um conjunto de módulos eletrônicos padrão NIM (*Nuclear Instrumentation Module*) contendo uma fonte de tensão ORTEC, modelo 456, um pré-amplificador ORTEC, modelo 113, um amplificador linear ORTEC, modelo 571, um analisador monocanal, modelo 552, um contador ORTEC, modelo 775 e um pulsador ORTEC modelo 480. O conjunto foi montado conforme o esquema apresentado na Figura 21 e pré-calibrado utilizando-se um analisador multicanal, de forma a obter a correta discriminação eletrônica do sinal oriundo de nêutrons em relação aos demais sinais observáveis no espectro de amplitude de pulso.

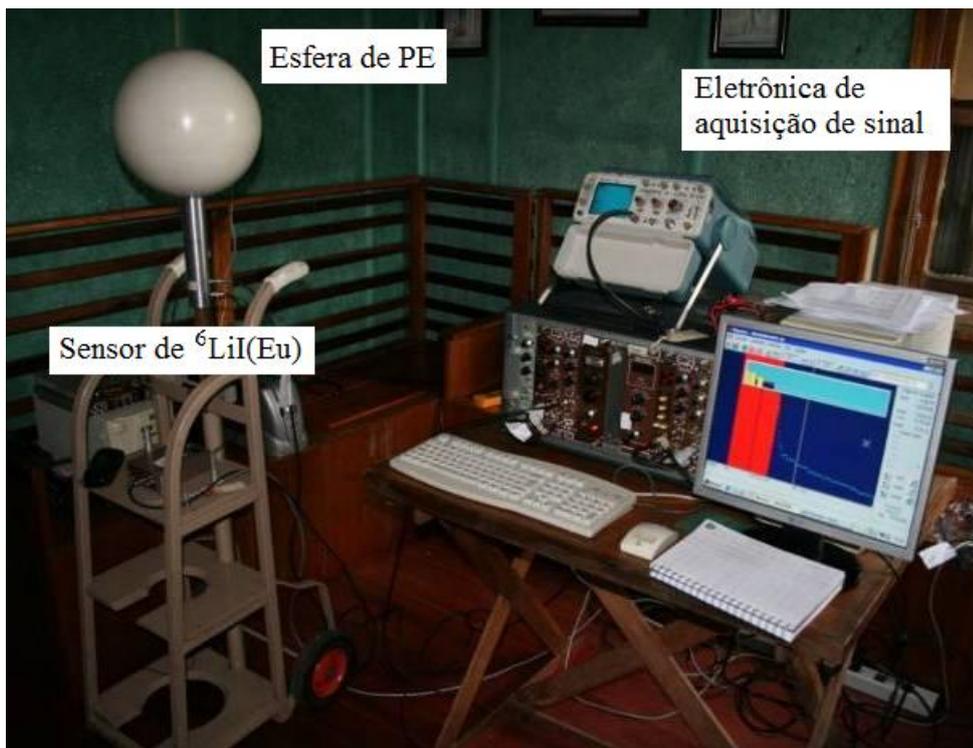


Figura 20 - Espectrômetro de nêutrons e eletrônica associada.

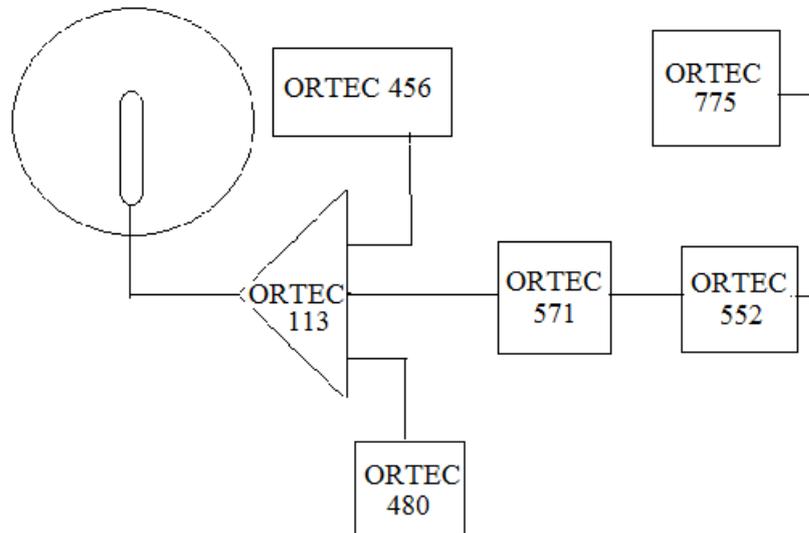


Figura 21 - Esquema da eletrônica do espectrômetro de nêutrons.

A calibração do espectrômetro para fluência total de nêutrons foi efetuada utilizando-se fontes de nêutrons de $^{241}\text{Am/Be}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf}/(\text{D}_2\text{O})$ no Laboratório de Nêutrons do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes - LNMRI, IRD/CNEN, e foi verificada durante o desenvolvimento das medições em campo por meio de uma fonte de nêutrons de $^{241}\text{Am/Be}$ de pequena intensidade.

O processo de desdobramento das respostas consiste, de forma resumida, em obter o espectro de fluxo incidente em função da energia ($\phi(E)$), conhecendo-se as medidas efetuadas com cada esfera (M_i) e conhecendo-se a função resposta em função da energia ($R_i(E)$) para cada esfera, conforme:

$$M_i = \int R_i(E)\phi(E)dE, \quad (7)$$

onde $i = 1, 2, \dots, n$ (n = número de esferas, sendo que no presente trabalho $n = 7$, considerando-se, além das seis esferas de polietileno, o detector nu).

O processo de desdobramento das respostas foi efetuado por meio do programa computacional MAXED (REGINATTO et al., 1999 e REGINATTO et al., 2002), que aplica o princípio da máxima entropia para processar o desdobramento do espectro de nêutrons a partir das contagens registradas em cada esfera (M_i) e permite a avaliação da convergência e consistência do processo por meio do acompanhamento de dois parâmetros indicativos: o valor do chi-quadrado e o valor do parâmetro de controle (*control value parameter*).

A matriz resposta utilizada para o processo de desdobramento foi a SAND4 (LEMOS Jr, 2004), por ter sido avaliada como a mais consistente com o equipamento e intervalo de energia utilizados. Foi utilizado o espectro obtido por Goldhagen et al. (2002) como espectro inicial para o processo iterativo de desdobramento.

Um fator complicador a mais reside no fato de que as medições com as diferentes esferas não são simultâneas e, sendo assim, qualquer flutuação na intensidade da fonte de nêutrons (no caso, as radiações cósmica solar e galáctica) pode comprometer a veracidade do processo, alterando o espectro resultante ao final do processo de desdobramento. Para evitar estas distorções, o fluxo de partículas solares foi acompanhado por meio dos dados históricos obtidos pelo satélite GOES e também por meio de contagens de nêutrons feitas simultaneamente com as medidas do espectrômetro de esferas de Bonner utilizando um detector de grande intervalo de resposta em energia (tipo *Long-Counter*), apontado para o zênite. O resultado deste monitor foi utilizado como referência para normalizar as medidas com cada esfera.

3.1.4 Sistema de detecção *Long-counter*

Os detectores do tipo *Long-counter* e suas variantes são muito utilizados em laboratórios como monitores de referência para monitoramento do fluxo de nêutrons devido ao seu amplo intervalo de eficiência praticamente constante em função da energia. O *Long-counter* utilizado neste trabalho consiste de um detector proporcional central de

^3He , circundado por camadas de polietileno e parafina borada e pode ser visto na Figura 22. A eletrônica de aquisição acoplada à sonda de nêutrons é similar àquela apresentada para o espectrômetro de esferas de Bonner, exceto pelo fato de que o pré-amplificador ORTEC, modelo 113, foi substituído por um pré-amplificador ORTEC, modelo 148PC. Da mesma forma, a regulação da eletrônica para este detector foi efetuada utilizando-se fontes de nêutrons de $^{241}\text{Am/Be}$ (FEDERICO et al., 2009) e posteriormente o equipamento foi calibrado no LNMRI do IRD.



Figura 22 - Monitor de nêutrons do tipo *Long-counter*.

O detector utilizado neste trabalho teve sua dependência angular e eficiência avaliadas por meio de fontes de nêutrons convencionais de $^{241}\text{Am/Be}$ e ^{252}Cf e, posteriormente, estendidas para os espectros de radiação cósmica medidos em solo por meio de simulação computacional, cujos resultados são apresentados nas Figuras 23 e 24, respectivamente. A eficiência para nêutrons da RC está em torno de 5 contagens/(n.cm²) (PAZIANOTTO et al., 2011) tornando este detector razoavelmente adequado para a finalidade de monitoramento de RC em longos intervalos de tempo.

Entretanto, para intervalos de tempo mais curtos, compatíveis com a duração de voos de aeronaves de curta e média distância, é necessária a utilização de monitores mais eficientes ou de dados oriundos de estações ou redes de monitoramento já estabelecidas, pois a incerteza relacionada à baixa estatística de contagem do sinal coletado por este detector não permite identificar com precisão os eventos solares pouco intensos ou de curta duração.

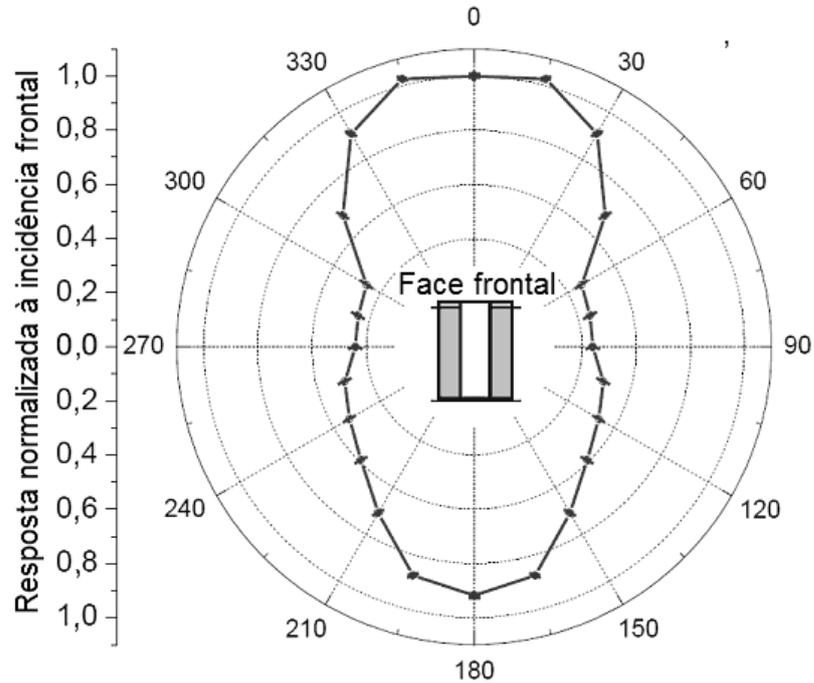


Figura 23 - Dependência angular do *Long-counter*, para nêutrons da RC (extraído e adaptado de Pazianotto et al. (2011)).

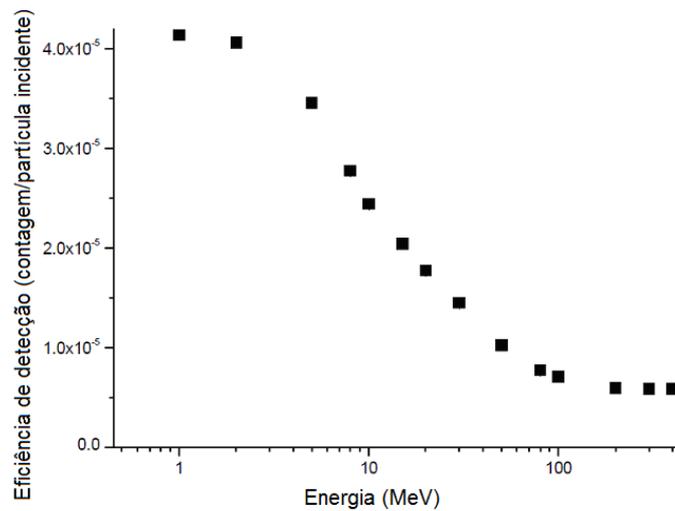


Figura 24 - Eficiência do *Long-counter* para nêutrons monoenergéticos com incidência frontal (extraído e adaptado de Pazianotto et al. (2011)).

3.2 Detectores passivos

Nesta seção serão descritos os sistemas de detecção passivos, que possuem como características comuns a inexistência de circuitos eletrônicos durante a realização das medições.

3.2.1 Proposta de um dosímetro baseado em pastilhas termoluminescentes

Um sistema de dosímetros com medidor passivo é muito conveniente para monitoramento de rotina em aeronaves, acumulando a dose recebida por esta aeronave em voo, durante um certo período de tempo.

Baseados na esfera do ICRU e em moderadores de nêutrons combinados com material de número atômico elevado (como a sonda THERMO FH-762) está sendo proposto neste trabalho um sistema de monitoração constituído de duas esferas e pastilhas dosimétricas de dois materiais termoluminescentes diferentes.

A primeira esfera é voltada para a detecção de radiações ionizantes e a segunda esfera é voltada para maximizar a detecção de nêutrons na faixa de energia de interesse para a RC.

A primeira esfera foi construída de polimetilmetacrilato (PMMA) e baseia-se no modelo teórico da esfera ICRU, com posições para acomodar as pastilhas de dosímetros termoluminescentes (DTL) distribuídas convenientemente no volume da esfera, de forma a facilitar a avaliação da grandeza $H^*(10)$ e a permitir a obtenção de informações adicionais sobre o campo de radiação ionizante incidente, como por exemplo sua direcionalidade e uma estimativa da profundidade de dose máxima. Na Figura 25 é mostrada a esfera construída e na Figura 26 são apresentadas, esquematicamente, as posições dos dosímetros termoluminescentes dentro da esfera.

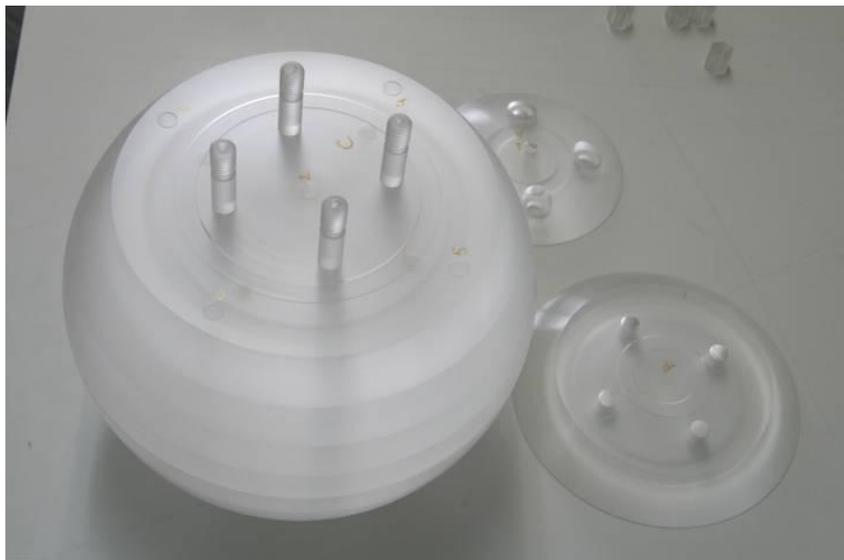


Figura 25 - Esfera construída de PMMA, parcialmente desmontada para melhor visualização, para posicionamento de pastilhas termoluminescentes.

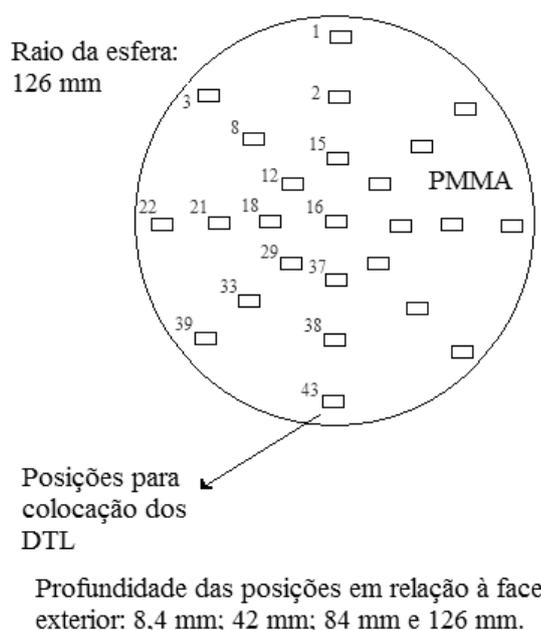


Figura 26 - Desenho esquemático da esfera de PMMA com as posições de DTL utilizadas.

Na Tabela 9 pode-se observar comparativamente as densidades e a composição da esfera de PMMA e da esfera padrão proposta pela ICRU. A esfera construída de PMMA foi projetada de forma a que os dosímetros posicionados em sua primeira camada (mais externa) estejam cobertos pela mesma densidade superficial de massa, em mg/cm^2 que o correspondente ponto de avaliação da grandeza $H^*(10)$ na esfera ICRU. Desta forma, procurou-se minimizar as possíveis diferenças entre a resposta da esfera ICRU e da esfera de PMMA, fazendo com que os fatores de correção necessários sejam minimizados.

Tabela 9 - Características da esfera ICRU e da esfera de PMMA.

Característica	Esfera ICRU	Esfera de PMMA
Densidade (g/cm^3)	1	1,19
Composição em porcentagem de massa (%)	H	10,1
	C	11,1
	O	76,2
	N	2,6
Número atômico efetivo	7,35	6,56
Densidade eletrônica (elétrons/g)	$3,31 \times 10^{23}$	$3,25 \times 10^{23}$

A segunda esfera foi construída com cascas esféricas concêntricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e chumbo (Pb) e projetada para acomodar seis

pastilhas TL em seu interior, conforme pode ser observado nas Figuras 27 e 28. Seu projeto baseia-se no sistema NEMUS (WIEGEL et al., 2002), com a proposta de amplificar a resposta a nêutrons rápidos, que são responsáveis por parte significativa da dose total depositada pelo componente neutrônico, conforme será discutido na seção 4.2. A composição das camadas de PEAD e Pb desta esfera provê uma combinação de processos de termalização e espalação do campo neutrônico incidente, de forma a maximizar a geração de nêutrons térmicos na posição dos dosímetros, principalmente para energias acima de 10 MeV.



Figura 27 - Esfera de PEAD/Pb aberta, mostrando as diferentes camadas de materiais e a posição central para acomodação dos dosímetros.

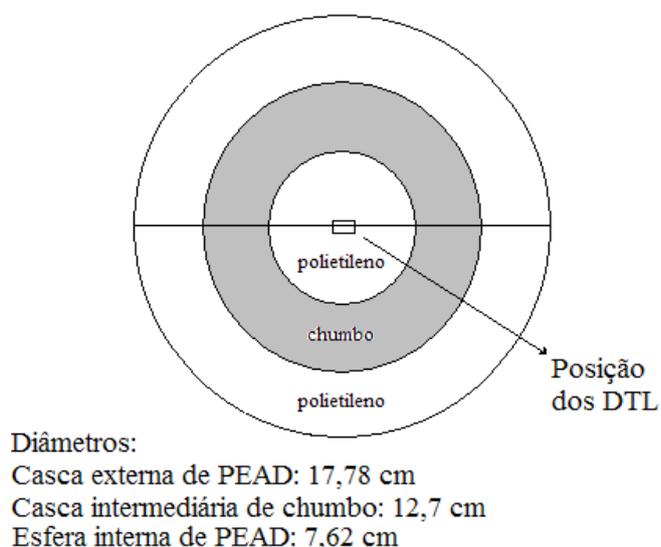


Figura 28 - Desenho esquemático da esfera de PEAD/Pb com as posições de DTL utilizadas.

Em ambas esferas utilizadas neste trabalho (esfera de PMMA e esfera de PEAD/Pb), os dosímetros termoluminescentes utilizados constituem-se de pastilhas de fabricação THERMO, com denominação comercial TLD-600 e TLD-700, ambos os tipos com formato circular, diâmetro de 5 mm e espessura de 0,8 mm, compostas de fluoreto de lítio e dopadas com magnésio e titânio (LiF:Mg,Ti).

O LiF:Mg,Ti é um material muito utilizado para dosimetria, possuindo um número atômico efetivo em torno de 8,14, o qual se aproxima do número atômico do tecido humano que é de 7,40 (OBERHOFER and SCHARMANN, 1981), de forma que o número de ionizações no material do dosímetro seja próximo do número de ionizações no material de interesse (tecido), facilitando ou dispensando a aplicação de correções oriundas da teoria da cavidade, conforme o caso.

Os dosímetros termoluminescentes em uso no presente trabalho são de dois tipos, com diferentes proporções isotópicas de ${}^6\text{Li}$ e ${}^7\text{Li}$. As pastilhas de nome comercial TLD-600 possuem 95,6 % de ${}^6\text{Li}$ e 4,4 % de ${}^7\text{Li}$, e as pastilhas de nome comercial TLD-700 possuem 99,99 % de ${}^7\text{Li}$ e 0,01 % de ${}^6\text{Li}$ (TRIOLO et al., 2007) de forma que as respostas dos dois tipos de pastilhas para nêutrons térmicos e epitérmicos são diferentes, permitindo efetuar a discriminação em campos mistos nêutron-gama, por meio do método dos pares. O intervalo de dose mensurável por este dosímetro é de 10 μGy a 10 Gy e o desvanecimento térmico (*fading*) é da ordem de 5 % ao ano, a 20 °C, de forma que pode ser facilmente corrigido.

O método dos pares consiste em se expor simultaneamente dosímetros do tipo TLD-600 e TLD-700 em campos mistos nêutron-gama. A diferença da leitura obtida nas curvas de termoluminescência do ${}^6\text{LiF}$ e do ${}^7\text{LiF}$ permite avaliar a contribuição de cada componente do campo por meio da subtração das curvas para cada conjunto (par) de pastilhas. Um exemplo comparativo das curvas de emissão termoluminescente do TLD-600 e do TLD-700 expostos a um campo misto nêutron-gama, pode ser visto na Figura 29.

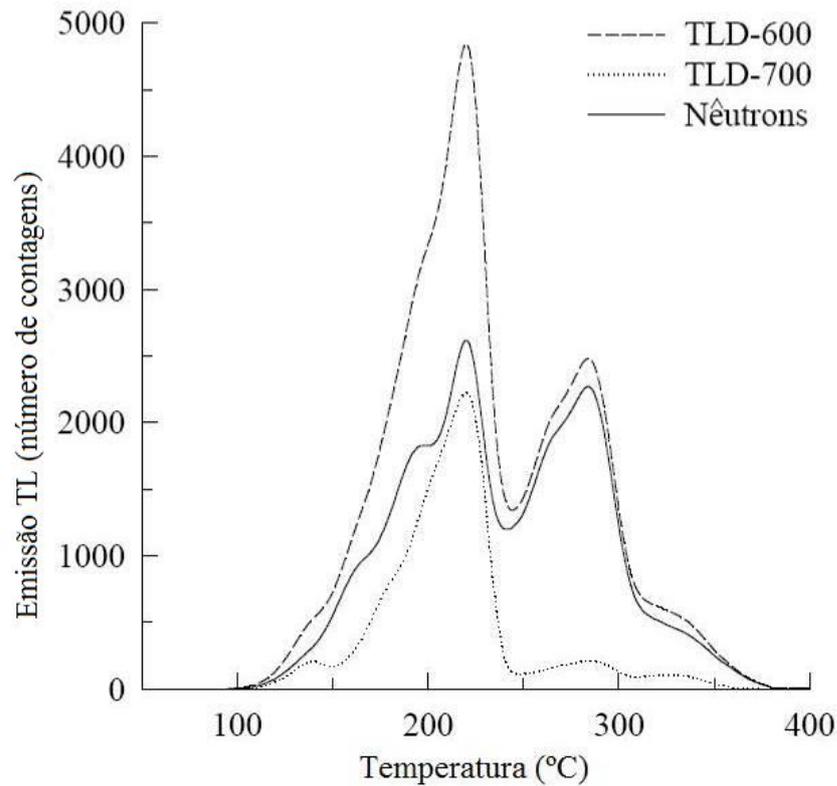


Figura 29 - Curvas de emissão termoluminescente de pastilhas de TLD-600 (${}^6\text{LiF}$) e TLD-700 (${}^7\text{LiF}$) após exposição em um campo misto nêutron-gama, mostrando a curva resultante da subtração do sinal do TLD-700 no sinal do TLD-600, cujo resultado corresponde ao sinal referente a nêutrons (extraído e adaptado de Hajek et al. (2004)).

A diferença entre as respostas dos dois tipos de dosímetros é atribuída à grande sensibilidade do ${}^6\text{Li}$ a nêutrons térmicos e epitérmicos, devido a uma grande seção de choque total de captura (devido principalmente à reação ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$), em comparação com a pequena seção de choque total de captura do ${}^7\text{Li}$ para essa mesma faixa de energia, conforme pode ser observado na Figura 30. A partícula alfa gerada na interação do nêutron com o ${}^6\text{Li}$ irá colidir com o material constituinte do dosímetro até perder toda a sua energia, produzindo ionizações ao redor do local de interação com um LET aproximado de $140 \text{ keV}/\mu\text{m}$.

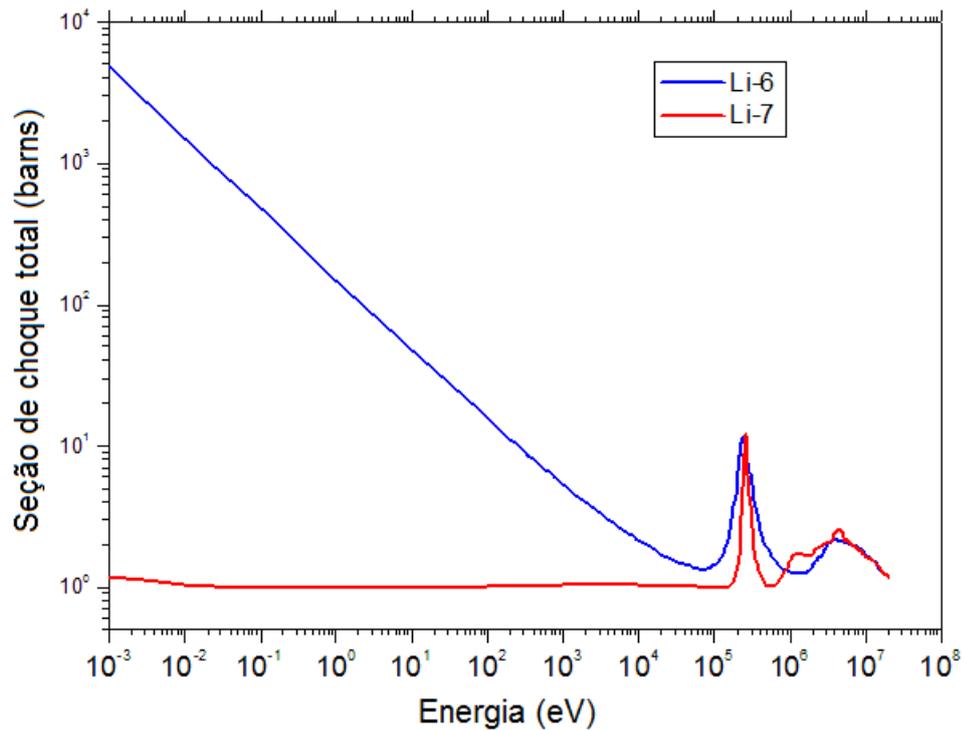


Figura 30 - Seção de choque total para ${}^6\text{Li}$ e ${}^7\text{Li}$ (extraído da biblioteca de dados nucleares avaliados ENDF/B-VI (IAEA, 2011)).

O método dos pares pode ser estendido para utilização em grandes altitudes, se a calibração dos detectores for efetuada em um campo com características semelhantes às aquelas encontradas nos campos a serem medidos (HAJEK et al., 2004).

3.2.2 Sistema de detecção baseado em CR39

O sistema de detecção aqui descrito foi desenvolvido no Instituto Politécnico de Milão por Caresana et al.(2007) e foi cedido por ele para ser utilizado durante os ensaios em voo, em regime de cooperação científica. O sistema utilizado baseia-se em um sensor de nêutrons térmicos de CR39 PADC (Poli-allil-diglicol-carbonato) acoplado a um conversor rico em ${}^{10}\text{B}$, ambos posicionados dentro de uma esfera composta de polietileno com estruturas de chumbo e cádmio, mostrada na Figura 31 (AGOSTEO et al., 2010). O CR39 registra traços gerados por partículas alfa, produzidas por nêutrons térmicos incidentes via reação (n,α) no ${}^{10}\text{B}$, cujo traço é característico e pode ser distinguido daqueles produzidos por outros tipos de partículas.



Figura 31 - Sistema de detecção baseado em CR39.

A estrutura de polietileno, chumbo e cádmio possui a função de termalizar os nêutrons incidentes, de forma que a resposta final do sistema se assemelhe à função resposta do equivalente de dose ambiente, conforme pode ser observado na Figura 32. O sistema possui um limiar de detecção para equivalente de dose ambiente devido a nêutrons em torno de $10 \mu\text{Sv}$, tornando-o utilizável para voos de média ou longa duração.

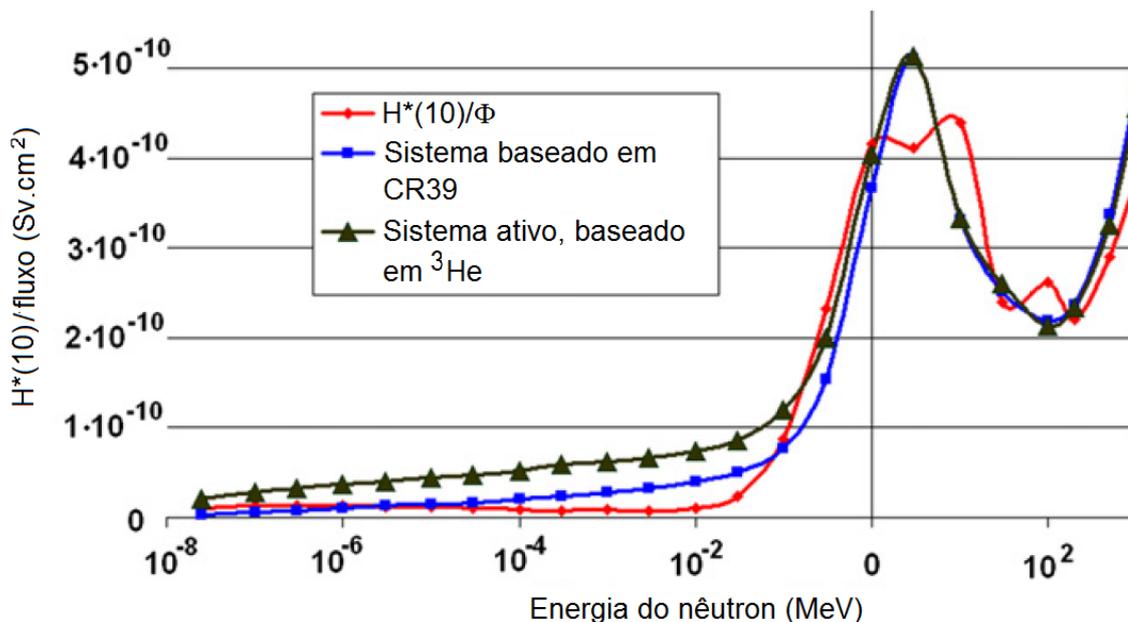


Figura 32 - Resposta por unidade de fluência em função da energia para o sistema detector, em suas versões passiva (baseado em CR39, utilizado neste trabalho) e ativa, em comparação com a curva do equivalente de dose ambiente. As respostas foram normalizadas em 4 MeV (AGOSTEO et al., 2010).

3.3 Sistema de análise TL

A avaliação TL foi efetuada em uma leitora de dosímetros termoluminescentes, de marca Victoreen, modelo 2800M, sendo que os dados são transferidos via porta de comunicação serial e analisados por meio de um programa computacional desenvolvido no próprio laboratório do Instituto de Estudos Avançados (IEAv/DCTA), o qual alimenta planilhas de análise adaptadas especificamente para o tratamento dos dados de pares de dosímetros TLD-600/TLD-700, utilizados neste estudo.

O tratamento térmico, realizado com a finalidade de eliminar qualquer sinal residual e preparar as pastilhas para uma nova irradiação, foi feito em dois fornos marca EDG, modelo 5p, controlados remotamente por um microcomputador. Um dos fornos foi previamente estabilizado na temperatura de 100 °C e o outro, a 400 °C. As temperaturas de trabalho foram verificadas por meio de um termopar IOP THERM 45 externo, previamente calibrado, posicionado diretamente em contato com a prancheta de suporte dos dosímetros. O tratamento térmico consiste de 1h10min no primeiro forno (400 °C), seguido de um resfriamento à temperatura ambiente por 30 minutos, seguido de um tratamento no segundo forno (100 °C) por 2h10min, seguido de novo resfriamento à temperatura ambiente por 30 min. Os resfriamentos são sempre realizados sobre uma mesma placa metálica em ambiente com temperatura controlada, de forma a prover reprodutibilidade à curva de resfriamento.

3.4 Fontes de radiação para calibração dos detectores

Para calibração dos detectores com radiação gama foram utilizadas fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs instaladas no Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI) do IPEN/CNEN e nos laboratórios do IEAv/DCTA. Os equipamentos foram expostos à radiação em distâncias que variaram de 1 m a 5 m das fontes de radiação.

Para calibração dos detectores com radiação neutrônica foram utilizadas as fontes de $^{241}\text{Am/Be}$ e ^{252}Cf instaladas no LNMRI do IRD/CNEN, além do campo existente no Centro Europeu de Pesquisa Nuclear (*Centré European de Recherché Nucleaire - CERN*), o qual será descrito e discutido separadamente na seção 4.4, devido às suas especificidades.

No caso das fontes de nêutrons do LNMRI, o protocolo de calibração tradicional do laboratório foi modificado para atender à peculiaridade na utilização dos

equipamentos deste trabalho, que operam com pequenas taxas de dose, presentes em altitudes de voo de aeronaves. Os equipamentos foram expostos a diferentes distâncias das fontes padrões, variando de 0,86 m a cerca de 4,7 m, onde o equivalente de dose ambiente do campo neutrônico é conhecido com uma incerteza combinada média resultante da combinação das fontes de incerteza apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Origens das incertezas nas medições realizadas com as fontes de nêutrons.

Fator	Incerteza (%)	
	²⁴¹ Am/Be	²⁵² Cf
Taxa de emissão de nêutrons	1,1	2
Coefficiente de conversão	4	1
Tempo de exposição	1	1
Espalhamento	1	1
Posicionamento em relação à fonte	0,6	0,6

As grandezas utilizadas nas calibrações para nêutrons foram a fluência total e o equivalente de dose ambiente, cujos valores verdadeiros convencionais foram obtidos a partir do valor da taxa de emissão da fonte de nêutrons, determinado por meio da técnica do banho de Sulfato de Manganês no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes do IRD/CNEN (LNMRI). O banho de Sulfato de Manganês, que é o sistema padrão primário para determinação da taxa de emissão de fontes de nêutrons, é rastreado pelo Sistema Metrológico Internacional por meio de comparações chaves coordenadas pelo Escritório Internacional de Pesos e Medidas (*Bureau International des Poids et Mesures - BIPM*) (comparação K9).

No caso das fontes de radiação gama do Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI) do IPEN, a grandeza utilizada na calibração foi o equivalente de dose ambiente, rastreado por meio de câmaras de ionização (CI) calibradas no LNMRI ou por comparação a padrões secundários. No caso das fontes gama do IEAv, a rastreabilidade foi feita por meio de câmara de ionização calibrada no LCI.

Na Tabela 11 é apresentado um resumo das características das fontes utilizadas neste trabalho, para a calibração dos equipamentos.

Além das fontes listadas na Tabela 11, também foi utilizada uma fonte de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y, com atividade nominal de 33 MBq, em um arranjo especial para irradiação dos dosímetros TL de referência, de forma a efetuar um controle de qualidade do processo de avaliação dos dosímetros termoluminescentes, identificando eventuais variações espúrias.

Tabela 11 - Fontes utilizadas para calibração.

Fonte	Localização	Atividade (GBq)	Data de referência	Tipo de Rastreabilidade	Rastreabilidade	Incerteza combinada média (%)
^{60}Co	LCI (sala 5)	37	11/05/95	Campo rastreado por CI	LNMRI/IRD	1,4
^{60}Co	IEAv/CTA	5	30/08/95	Campo rastreado por CI	LCI	5
^{137}Cs	LCI (sala 5)	740	28/04/95	Campo rastreado por CI	LNMRI/IRD	6,8
$^{241}\text{Am/Be}$	LNMRI	0,5	29/03/82	Fonte rastreada	BIPM (comparação K9)	2
^{252}Cf	LNMRI	1	15/06/98	Fonte rastreada	BIPM (comparação K9)	9

OBS: CI = câmara de ionização.

3.5 Demais sistemas auxiliares de medição e acompanhamento

Outros sistemas auxiliares foram utilizados no decorrer do trabalho, para medidas e acompanhamento de grandezas físicas de interesse, tais como temperatura e pressão e localização. Tais sistemas são descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Sistemas auxiliares.

Sistema	Marca e modelo	Grandezas de mensuração
Termo-barômetro registrador digital	LUFT, OPUS 10	Temperatura e pressão barométrica
Termômetro digital	IOPE, IOPHERM 45	Temperatura
Gaussímetro	LAKESHORE 460	Campo magnético
GPS	GARMIN, 78S, com antena externa	Posição geográfica e altitude

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos. Os resultados são agrupados de acordo com as diferentes etapas e missões experimentais que foram realizadas no decorrer do estudo e são compostos de experimentos em solo, em voo, e calibrações no campo do CERN.

4.1 Preparação da dosimetria termoluminescente

A dosimetria termoluminescente foi desenvolvida utilizando-se dois lotes de 100 pastilhas termoluminescentes de fabricação THERMO dos tipos TLD-600 e TLD-700, constituídos de pastilhas na forma de disco com 0,9 mm de espessura e 4,5 mm de diâmetro. As pastilhas são compostas de LiF:Mg,Ti com diferentes concentrações isotópicas de ${}^6\text{Li}$, de forma que o TLD-600 apresenta grande sensibilidade para a detecção de nêutrons térmicos enquanto o TLD-700 é praticamente insensível a eles. Ambos os dosímetros são sensíveis às radiações X e gama.

O método de avaliação dosimétrica segue a metodologia proposta por Furetta e Weng (1998), de acordo com a qual a dose de radiação medida por um dosímetro (D_m) pode ser obtida por meio da Equação 8, onde M_{net} é o sinal líquido, S_i é o fator de sensibilidade intrínseco do i -ésimo dosímetro, F_c é o fator de calibração do lote, F_{st} é o fator de estabilidade, F_{en} é o fator de dependência com a energia, F_{lin} é o fator de linearidade e F_{fad} é o fator de desvanecimento térmico (*fading*).

$$D_m = M_{net} \cdot S_i \cdot F_c \cdot F_{st} \cdot F_{en} \cdot F_{lin} \cdot F_{fad} \cdot \quad (8)$$

Os parâmetros S_i e F_{st} são intrínsecos ao dosímetro que está sendo avaliado e ao lote de leitura, respectivamente. Estes parâmetros foram inseridos no programa computacional de avaliação de dados utilizado no LDT, de forma que o próprio programa calcula o sinal corrigido (S_{corr}) como resultado do produto do M_{net} e dos parâmetros S_i e F_{st} , de forma que a Equação 8 pode ser escrita como:

$$D_m = S_{corr} \cdot F_c \cdot F_{en} \cdot F_{lin} \cdot F_{fad} \cdot \quad (9)$$

No caso da utilização de pares de dosímetros TLD-600 e TLD-700 em campos mistos de radiação, deve-se considerar que o sinal obtido pelo dosímetro TLD-600 é oriundo da somatória de sinais oriundos de radiação gama e nêutrons, pois ele é sensível aos dois componentes do campo; já o sinal do TLD-700 só é devido ao componente gama (MUNIZ, 2010). Para obter o sinal oriundo somente do componente neutrônico (S_{corr-n}) é necessário subtrair o sinal corrigido do TLD-700 ($S_{corr-700}$) do sinal corrigido do TLD-600 ($S_{corr-600}$):

$$S_{corr-n} = S_{corr-600} - S_{corr-700}. \quad (10)$$

Entretanto, esta análise pressupõe que os TLDs 600 e 700 possuem sensibilidades iguais, o que não é o caso. Desta forma, necessita-se, primeiramente, converter a resposta do TLD-700 para o seu valor equivalente no TLD-600, de forma a poder proceder à subtração. A conversão da resposta do TLD-700 para o valor equivalente do TLD-600 é feita por meio de um fator de conversão F_{conv} , de forma que a Equação 10 deve ser reescrita da seguinte forma:

$$S_{corr-n} = S_{corr-600} - S_{corr-700} \cdot F_{conv}. \quad (11)$$

O método de avaliação escolhido para ambos os tipos de dosímetros consiste de aquecimento por rampa linear e avaliação do sinal TL por meio da integração da curva de luz em uma determinada região de análise, pois, comparativamente com os métodos de aquecimento isotérmico e de ajuste espectroscópico à curva de emissão TL, este método apresentou boa reprodutibilidade com menor dificuldade operacional. Os parâmetros de leitura escolhidos são especificados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados de avaliação termoluminescente.

Parâmetros	TLD-600 e TLD-700
Temperatura inicial (°C)	80
Taxa de aquecimento (°C/s)	10
Temperatura máxima (°C)	400
Tempo do ciclo (s)	30
Região de interesse 1	Canais 110 a 220
Região de interesse 2	Canais 220 a 300
Tensão na fotomultiplicadora (V)	950

4.1.1 Determinação dos fatores de correção individuais (S_i)

Os fatores de correção individuais (S_i) dos dosímetros utilizados foram avaliados conforme a metodologia proposta por Furetta e Weng (1998), por meio de 3 a 5 irradiações dos dosímetros, de forma repetitiva, utilizando uma fonte de radiação gama de ^{60}Co e uma fonte de nêutrons de $^{241}\text{Am/Be}$. Os resultados são apresentados por meio dos histogramas das Figuras 33 e 34 para cada tipo de dosímetro e campo de radiação.

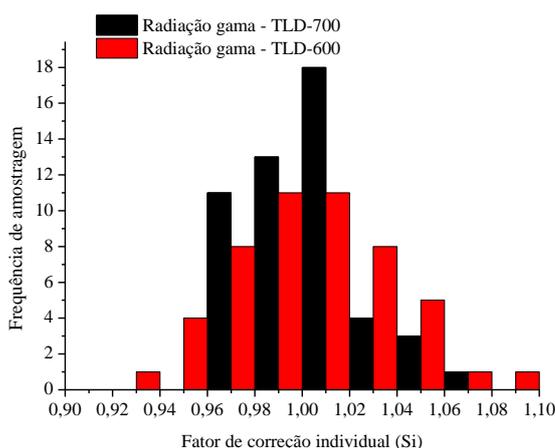


Figura 33 - Histograma dos fatores de correção individuais (S_i) para sensibilidade à radiação gama.

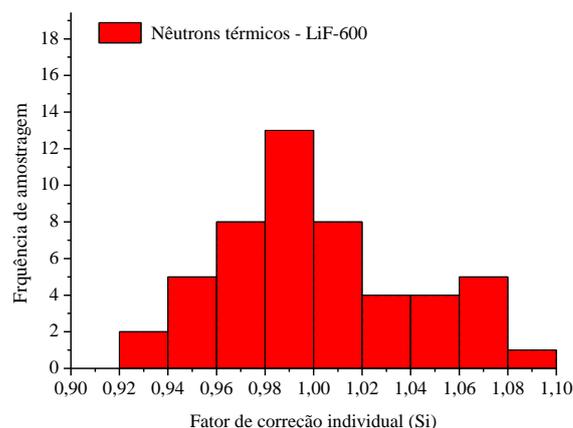


Figura 34 - Histograma dos fatores de correção individuais (S_i) para sensibilidade a nêutrons térmicos.

4.1.2 Determinação do fator de calibração (F_c)

A calibração da resposta dos dosímetros para radiação gama foi efetuada por meio da irradiação de um conjunto de dosímetros pré-selecionados, posicionados sob uma espessura de 5 mm de PMMA (para obter condição de equilíbrio eletrônico), em um campo de radiação gama obtido com uma fonte de ^{60}Co com atividade aproximada de 18,6 MBq (0,50 mCi). O campo foi previamente caracterizado por meio de uma câmara de ionização PTW, modelo LS-01 e um eletrômetro PTW-UNIDOS, calibrados em relação ao sistema padrão secundário do LCI. Os valores medidos, bem como o resultado do ajuste de uma função linear são apresentados nas Figuras 35 e 36. O processo de ajuste considerou as incertezas em ambas variáveis. Os coeficientes lineares obtidos são apresentados na Tabela 14 para cada tipo de dosímetro.

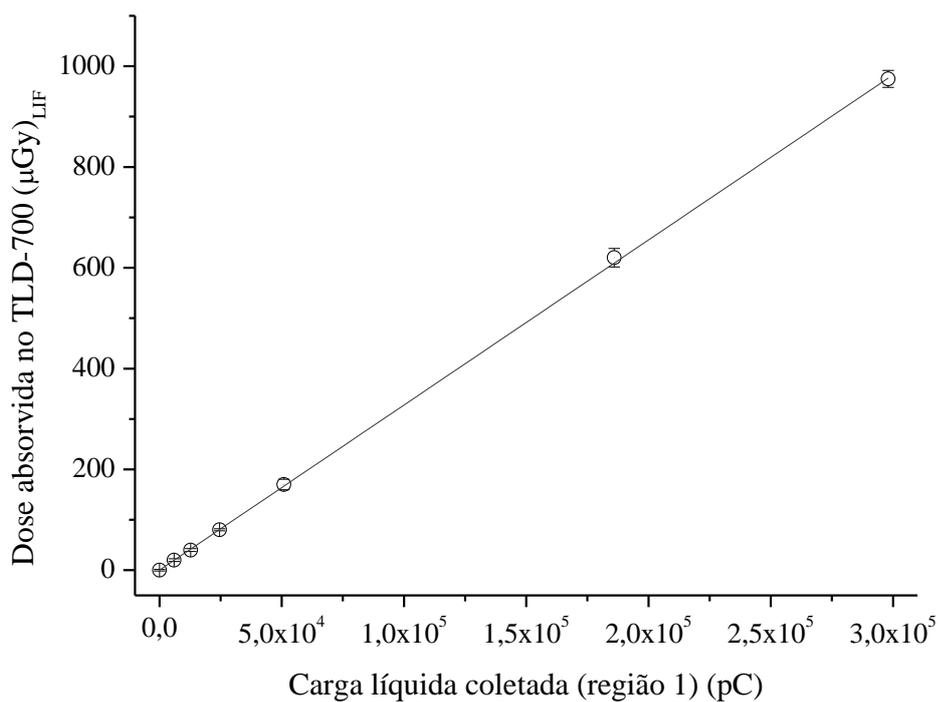


Figura 35 - Curva de dose-resposta dos TLD-700 para radiação gama (^{60}Co).

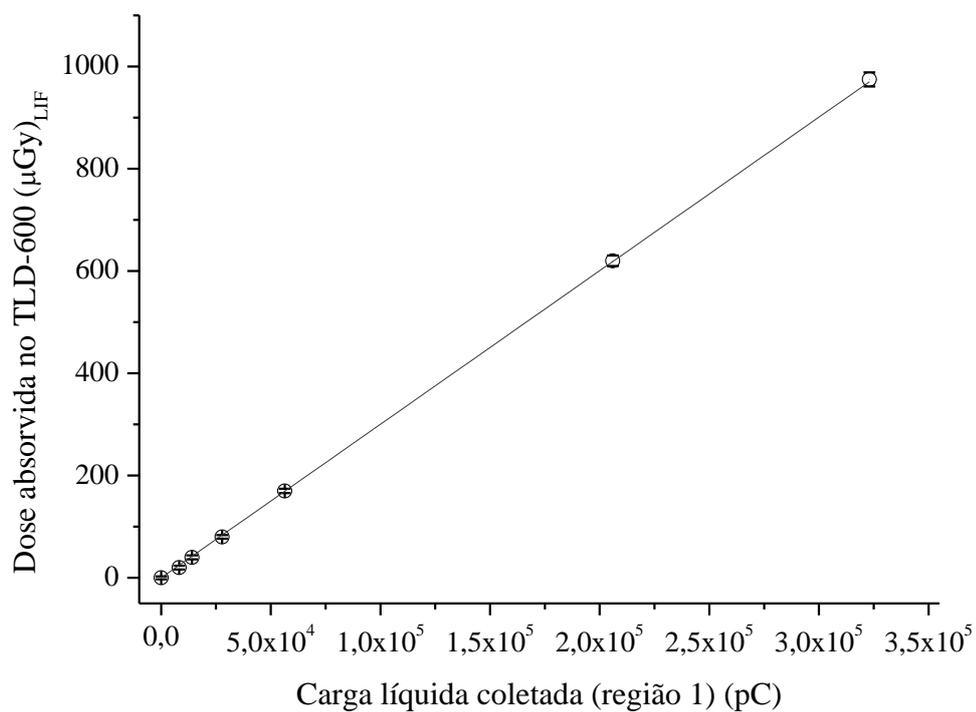


Figura 36 - Curva de dose-resposta dos TLD-600 para radiação gama (^{60}Co).

Tabela 14 - Coeficientes de calibração dos TLDs.

Dosímetro	Coeficiente ($\mu\text{Gy/pC}$) $\times 10^{-3}$	incerteza ($\mu\text{Gy/pC}$) $\times 10^{-3}$
TLD-700	3,28	0,04
TLD-600	3,00	0,03

Por meio dos coeficientes de calibração determinados experimentalmente (Tabela 14) obteve-se a relação entre as respostas TL, para radiação gama, para os DTL TLD-600 e TLD-700. Esta relação é dada pela Equação 12 e será utilizada para obter as respostas dos dosímetros TLD-600 para radiação gama a ser subtraída na resposta do campo misto pelo método dos pares de dosímetros (TLD-600/TLD-700), calculando-se o fator de conversão:

$$F_{conv} = \frac{F_{c\ 600}}{F_{c\ 700}}, \quad (12)$$

onde F_{conv} é o fator de conversão do sinal corrigido do TLD-700 para o valor equivalente no TLD-600, que possui o valor de: $F_{conv} = 1,093 \pm 0,017$.

4.1.3 Determinação do fator de estabilidade (F_{st})

O fator de estabilidade possui a função de corrigir eventuais flutuações oriundas do sistema de avaliação TL e tratamento térmico. O protocolo implantado no laboratório de dosimetria termoluminescente prevê a utilização de dois tipos de correções nas leituras de dosímetros, um por meio de uma “luz de referência” interna da leitora e outro por meio da utilização de um conjunto de dosímetros de controle irradiados com uma mesma dose com uma fonte de $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$.

A “luz de referência” consiste em uma fonte de ^{14}C em $\text{CaF}:\text{Mn}$ que emite uma luminosidade constante. Sua utilização é feita por meio de medições da luz de referência no início (L_i) e no final (L_f) de uma sequência de medições de um lote de dosímetros, de forma a corrigir eventuais flutuações na eficiência da eletrônica de medição por meio da aplicação de um fator de correção multiplicativo (F_{LR}) para cada curva de emissão termoluminescente.

A correção por meio dos dosímetros de controle visa corrigir diferenças de eficiência do sistema de detecção em relação aos parâmetros existentes na data de calibração dos dosímetros, bem como outros fatores que não poderiam ser corrigidos por meio da luz de referência como, por exemplo, deficiência de aquecimento, refletividade da

prancheta e deficiências de tratamento térmico. Esta correção é feita por meio de uma irradiação de três dosímetros de controle, pertencentes ao lote utilizado, com uma fonte de $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ em geometria pré-definida com duração de dez minutos. O fator de correção (F_{ref}) é obtido por meio da razão entre a leitura média dos dosímetros de controle do lote (L_{lote}) e um valor histórico tomado como referência (L_{hist}), conforme a Equação 13:

$$F_{ref} = \frac{L_{hist}}{L_{lote}} \quad (13)$$

Dessa forma, o fator de estabilidade F_{st} aplicado às leituras dos DTL é composto dos fatores F_{ref} e F_{lr} e pode ser calculado por meio da Equação 14:

$$F_{st} = F_{ref} \cdot F_{lr} \quad (14)$$

Na Figura 37 pode ser observado o fator de estabilidade ao longo de uma sequência de leituras de lotes de DTL, onde se observa o efeito de perda de eficiência em virtude de diminuição da refletividade da prancheta de aquecimento dos dosímetros, bem como um ponto fora dos limites de aceitação, ocasionado por falha no tratamento térmico, devido a um problema ocorrido em um dos fornos.

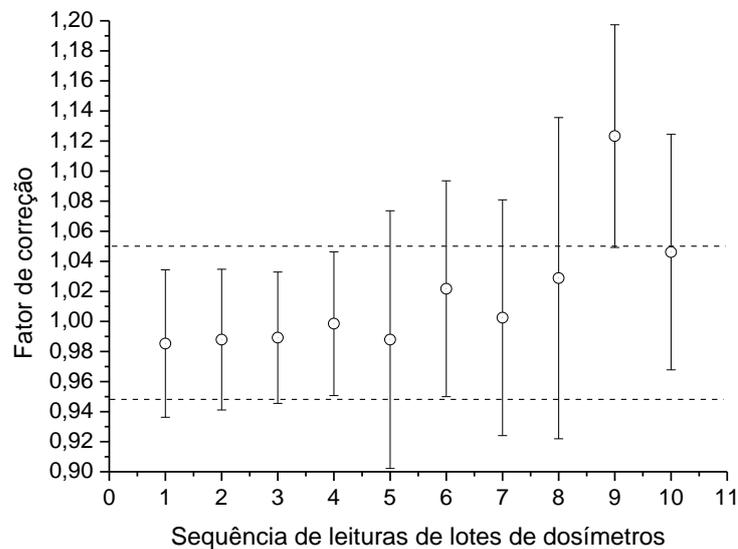


Figura 37 - Fatores de correção aplicados aos dosímetros TLD-600 e TLD-700. As linhas tracejadas indicam os limites de aceitação.

4.1.4 Determinação do fator de desvanescimento térmico (F_{fad})

Para o protocolo utilizado, o desvanescimento térmico foi avaliado por meio da irradiação de dosímetros TL em um campo conhecido de ^{60}Co e avaliação de sua emissão térmica em diferentes intervalos de tempo após a irradiação. Esta avaliação resultou em um

fator de desvanescimento térmico de $1,000244 \pm 0,000001$ ao dia, ou seja, menos de 0,8 % ao mês, que é aplicável tanto à dose devida à radiação gama quanto à dose devida a nêutrons.

4.1.5 Fatores de linearidade (F_{lin}) e dependência com a energia (F_{en})

O fator de linearidade foi admitido como igual à unidade, pois o intervalo de dose utilizado neste trabalho é bastante restrito e encontra-se distante do intervalo de não linearidade para o material dosimétrico utilizado (LiF).

O fator de dependência com a energia também foi admitido como igual à unidade pois não foi observada dependência com a energia para as fontes de calibração convencionais utilizadas. A calibração efetuada neste trabalho toma como base a deposição de energia no próprio material dosimétrico (LiF), de forma que eventuais dependências com a energia, para energias maiores, serão parcialmente corrigidas quando da aplicação da teoria da cavidade, por meio da relação entre os poderes de freamento (*stopping power*) mássicos do material do dosímetro em relação ao meio circundante onde se deseja obter a dose. Eventuais discrepâncias serão englobadas no fator de calibração final, que é obtido por irradiações em um campo com características similares ao campo do local de trabalho.

4.1.6 Determinação da radiação de fundo

A radiação de fundo (BG) de um dosímetro, também chamado de “leitura de dose zero” ou “leitura de fundo”, é obtida da repetição de medidas realizadas em dosímetros não irradiados. Esta quantidade é particularmente importante quando os dosímetros são usados para medições de doses baixas. Conforme a dose aumenta, o BG e sua variação se tornam menos significativos, podendo até ser desprezados para doses mais elevadas.

O sinal TL relacionado ao BG é devido a diversos componentes, entre os quais podem ser citados os sinais espúrios de triboluminescência, emissão de infravermelho do elemento de aquecimento e sua circunvizinhança, flutuações de corrente de escuro e sinais residuais, entre outros.

A leitura do BG pode ser mensurada quantitativamente por meio da avaliação de leituras sem dosímetro (L_0) provenientes de “corrente de escuro” e de leituras com dosímetros não irradiados (L_u), resultando em um valor de radiação de fundo médio dado por $\bar{L}_{BG} = \bar{L}_0 + \bar{L}_u$.

O limite inferior de detecção (LID) pode ser obtido pela soma da radiação de fundo com três vezes a sua incerteza, multiplicando o resultado pelo fator de calibração.

Das avaliações efetuadas para a estimativa da radiação de fundo e para o LID, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores estimados da radiação de fundo (BG) e limite inferior de detecção (LID).

DTL	BG (pC)	LID (μGy)_{LIF}
TLD-600	7882 \pm 508	28,2 \pm 0,3
TLD-700	3507 \pm 172	13,2 \pm 0,2

4.2 Determinação do espectro de nêutrons em solo

Para este estudo foram avaliadas a distribuição de energia, a taxa de fluência total e o equivalente de dose ambiente para o componente neutrônico no nível do solo em função da altitude, com a finalidade de se avaliar possíveis discrepâncias em relação ao obtido em avaliações similares em outras localizações geográficas, fora da região da AMAS, bem como utilizando cálculos realizados por meio de programas computacionais (SATO et al., 2008). As medições foram efetuadas durante o ano de 2009 em quatro diferentes localidades em torno das coordenadas geográficas 22° S e 45° O, conforme apresentado na Tabela 16 e nas Figuras 38 a 40. Os dados de rigidez de corte vertical foram obtidos por meio do programa computacional EXPACS, (SATO and NIITA, 2006; SATO et al., 2008) .

Tabela 16 - Informações dos pontos de medição de espectro de nêutrons em solo.

Período	Localização	Coordenadas geográficas	Altitude	Rigidez de corte vertical
			(m)	(GV)
De 26/09/09 a 30/09/09	Ilhabela – SP	23°85' S, 45°42' O	20	9,7
De 22/06/09 a 10/07/09	São José dos Campos (IEAv) – SP	23°15' S, 45°51' O	680	9,9
De 18/09/09 a 19/09/09	Itajubá, SP - Laboratório Nacional de Astrofísica - (LNA)	22°50' S, 45°50' O	1.840	10
De 15/03/09 a 21/03/09	Itatiaia, RJ - Parque Nacional do Itatiaia (PNI) ¹	22°20' S, 44°40' O	2.400	10



Figura 38 - Arranjo montado no Laboratório Nacional de Astrofísica - LNA (1.840 m), para medição do espectro e fluxo de nêutrons.

¹ Medições realizadas sob as autorizações de pesquisa IBAMA n.º. 17941-1, de 24/10/2008 e n.º. 17941-2, de 23/06/2009.

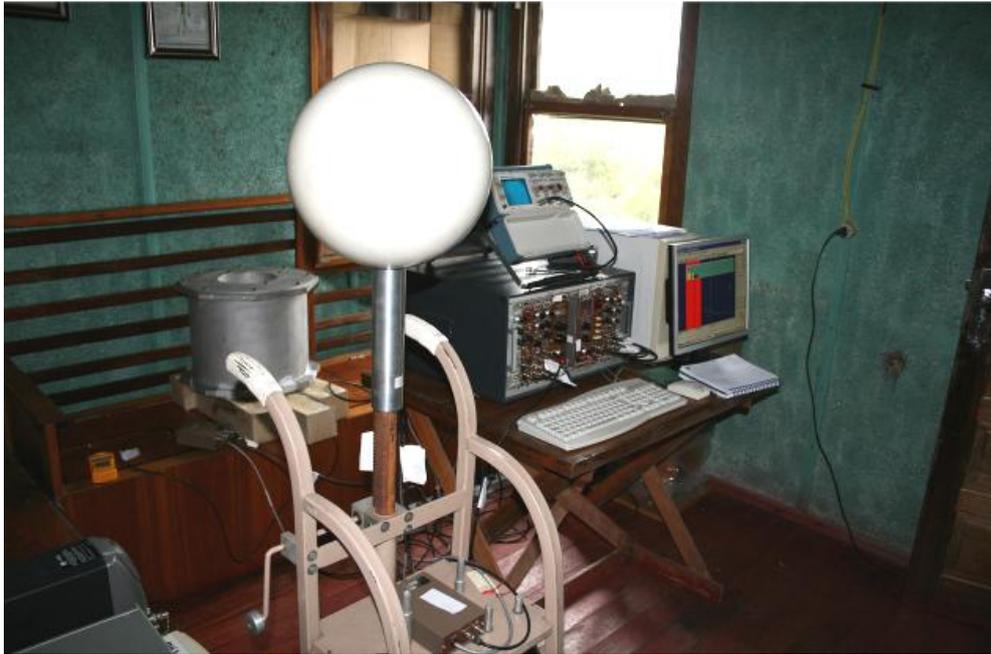


Figura 39 - Arranjo montado no Parque Nacional do Itatiaia - PNI (2.400 m), para medição do espectro e fluxo de nêutrons.



Figura 40 - Arranjo montado no Laboratório de Caracterização de Monitores de Radiação do IEAv (680 m), para medição do espectro e fluxo de nêutrons.

A eletrônica de aquisição foi previamente testada e regulada para discriminar os pulsos provenientes da captura de nêutrons térmicos tanto no detector de ^3He quanto no detector de $^6\text{Li}(\text{Eu})$, conforme o caso, utilizando para isto uma fonte de nêutrons de $^{241}\text{Am}/\text{Be}$. Após a regulação adequada, ambos os instrumentos foram calibrados para a medição de fluxo integral de nêutrons no Laboratório Nacional de Metrologia de Nêutrons (IRD) e rotineiramente verificados, utilizando-se uma fonte de controle de $^{241}\text{Am}/\text{Be}$.

Os resultados da medição da densidade de fluxo de nêutrons em solo, em quatro altitudes diferentes, são apresentados na Tabela 17, comparados com os valores calculados por meio do programa computacional EXPACS (SATO e NIITA, 2006; SATO et al., 2008), o qual considera a presença de água no solo, que atua como elemento refletor e termalizador de nêutrons. Para esta comparação, considerou-se a fração de água no solo como variando de 10 % a 20 %.

A densidade de fluxo e a distribuição em energia dos nêutrons são obtidos por um procedimento de desdobramento a partir do número de contagens de nêutrons em cada esfera do espectrômetro de Bonner. Como as medidas não são feitas simultaneamente para todas as esferas, elas precisam ser normalizadas pelo fluxo total incidente ou por uma grandeza proporcional ao fluxo total. Assim, paralelamente às medições efetuadas com o espectrômetro de esferas de Bonner, foi utilizado o detector de nêutrons *Long-counter* (LC) apontado para o zênite, cujos resultados são apresentados na Figura 41, o qual foi utilizado como instrumento de normalização de forma a eliminar eventuais variações no fluxo de nêutrons decorrentes de flutuações na emissão de prótons solares, bem como as variações decorrentes de flutuações da pressão atmosférica. As variações da temperatura ambiente foram acompanhadas por meio de um registrador de temperatura. Além disso, as variações do fluxo de prótons foram também monitoradas por meio dos dados obtidos em órbita geoestacionária pelos satélites GOES, os quais não indicaram a ocorrência de tempestades solares intensas durante os períodos de medição com as esferas de Bonner, conforme pode ser observado nas figuras constantes do Anexo A.

Tabela 17 - Medidas da densidade de fluxo de nêutrons no solo e comparação com os valores calculados.

Altitude (m)	Densidade de fluxo medido (10^{-2} n/cm ² .s)	Taxa de contagens no detector LC (cont/s)	Densidade de fluxo calculado pelo EXPACS (10^{-2} n/cm ² .s)		
			Fração de água		
			0,10	0,15	0,20
25	$2,95 \pm 0,11$	$0,0459 \pm 0,0111$	1,06	0,96	0,89
680	$3,53 \pm 0,08$	$0,0501 \pm 0,0017$	1,83	1,65	1,54
1840	$4,52 \pm 0,24$	$0,1156 \pm 0,0056$	4,38	3,95	3,68
2400	$6,39 \pm 0,15$	$0,1580 \pm 0,0220$	6,42	5,79	5,39

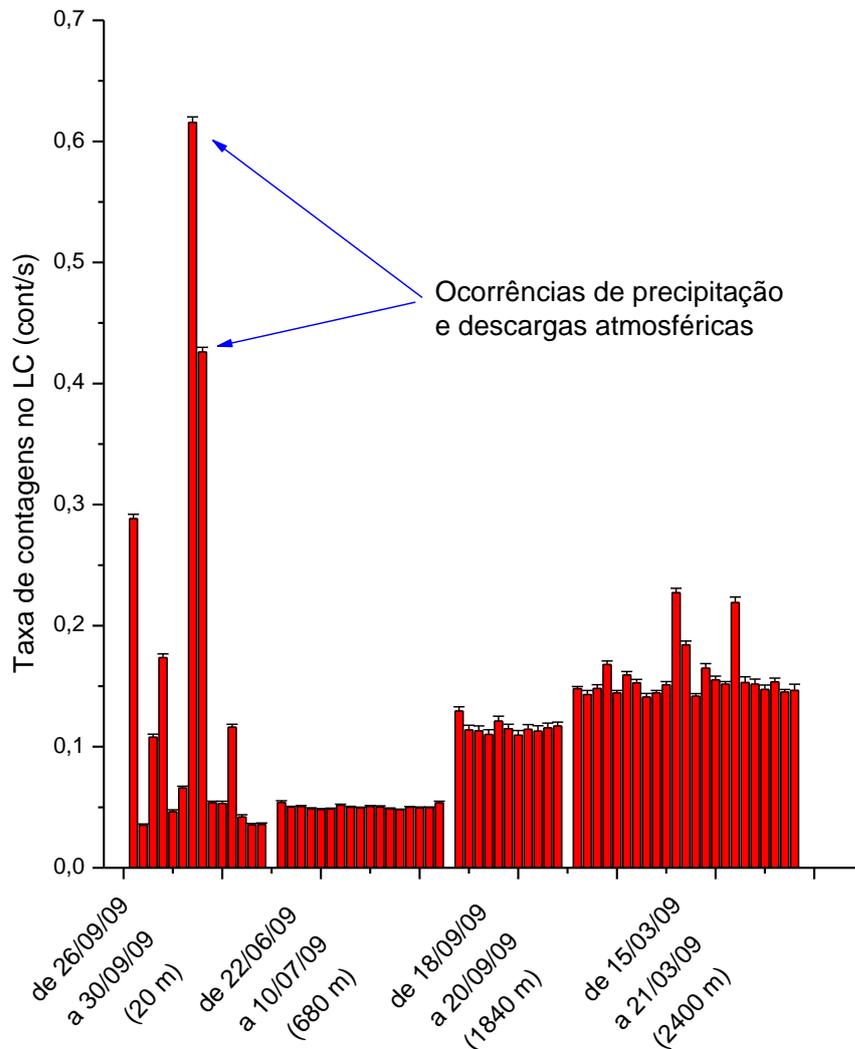


Figura 41- Medidas com o detector LC nas campanhas de medição de espectro de nêutrons em solo.

Os espectros obtidos para cada altitude são apresentados na Figura 42. Na Figura 43 é apresentada uma comparação com o fluxo calculado por meio do programa computacional EXPACS. Na Figura 44, o resultado obtido na altitude de 25 m é ainda comparado, normalizado pela amplitude do pico de evaporação, com o obtido por Goldhagen et al. (2002) no hemisfério norte, ao nível do mar, de maneira a poder comparar a forma do espectro.

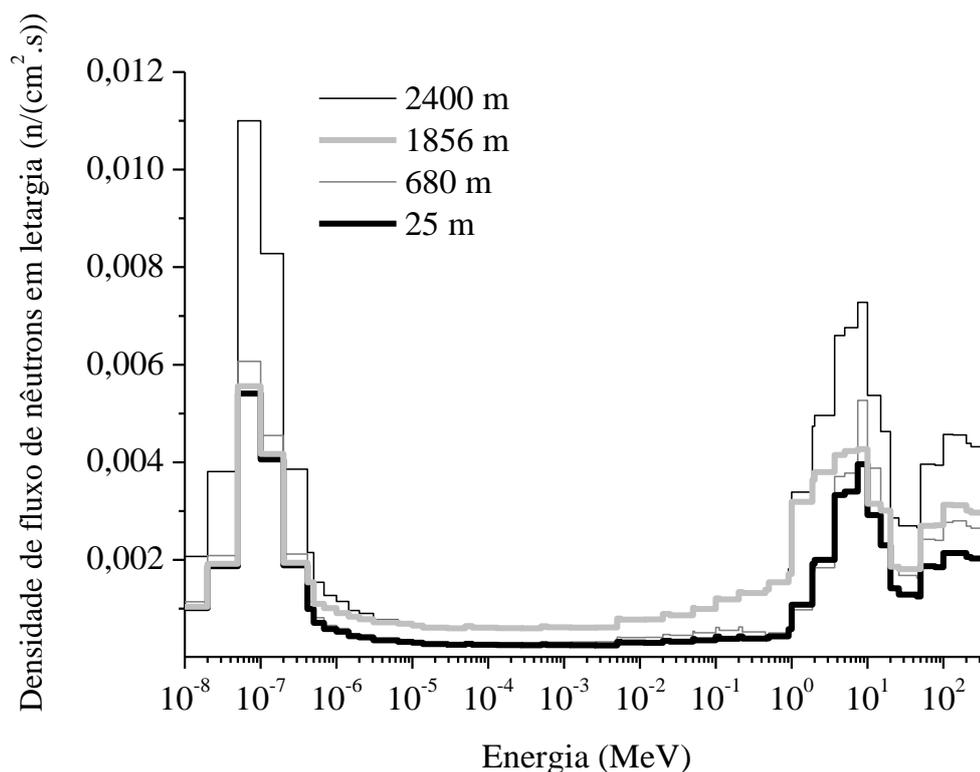


Figura 42 - Espectro de nêutrons obtido em diversas altitudes, no Brasil.

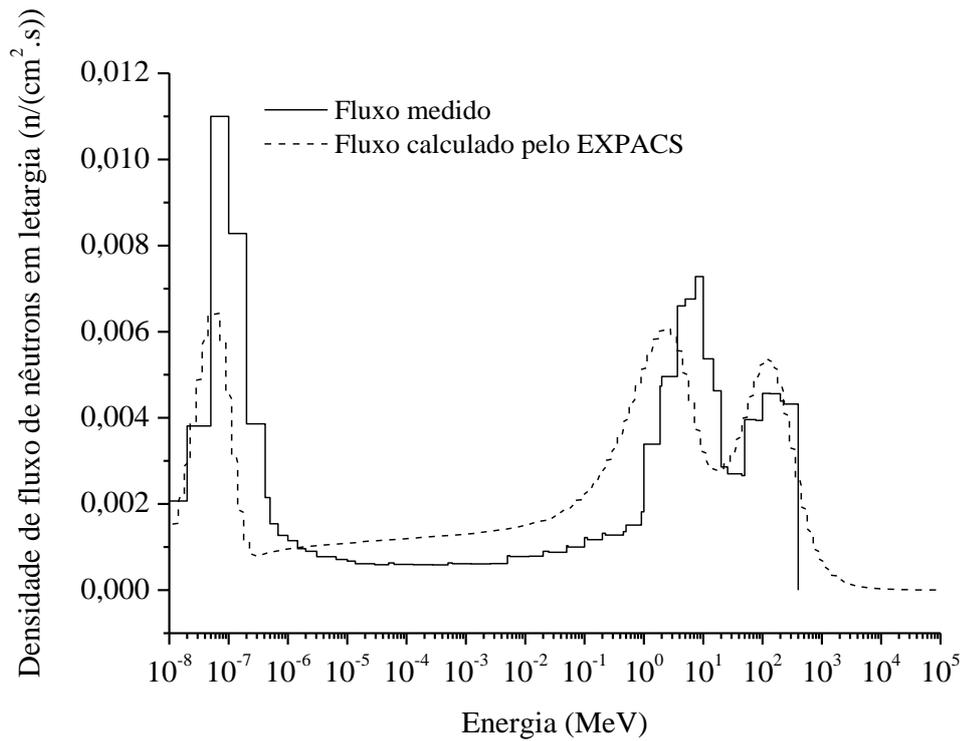


Figura 43 - Espectro de nêutrons medido a 2.400 m, em comparação com o espectro calculado.

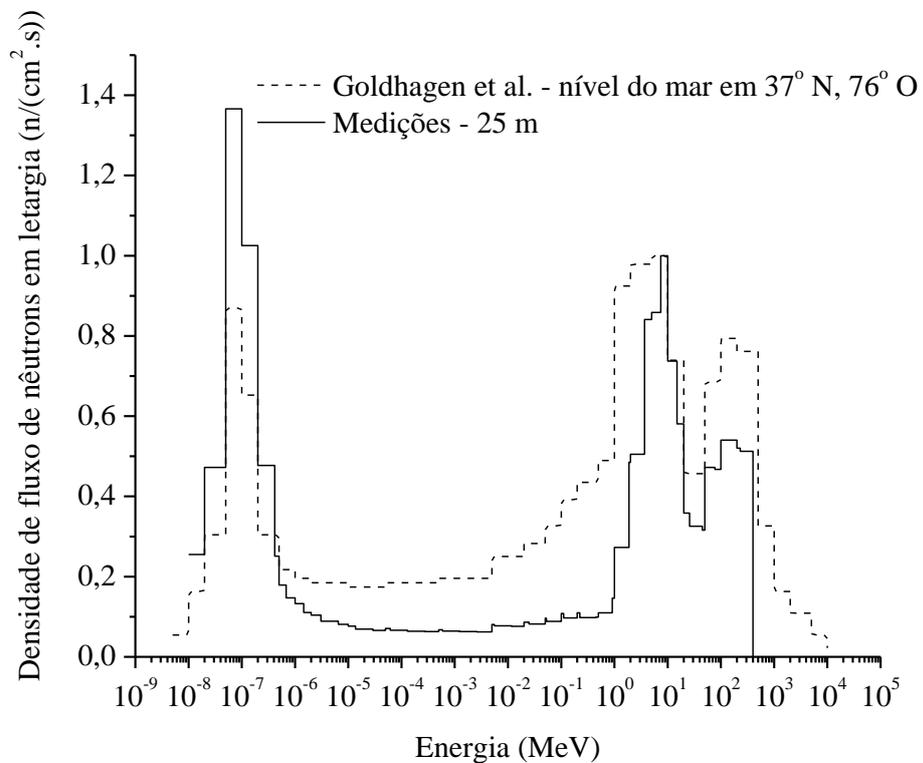


Figura 44 - Espectro de nêutrons medido a 25 m, em comparação com o medido por Goldhagen et al. (2002), no hemisfério norte, ao nível do mar. Os espectros são normalizados para uma amplitude unitária do pico de evaporação. Os fatores de normalização foram: Medições x 252,5 e Goldhagen x 813)

Para a obtenção da dose foram utilizados os fatores de conversão de fluxo para $H^*(10)$ fornecidos pela recomendação ICRP 74 (ICRP, 1997), complementados pelos valores obtidos por Pelliccioni (2000) para as regiões de energia alta inexistentes na referida recomendação, reestruturando o conjunto em uma nova grade de grupos de energia, conforme se pode observar na Figura 45, de forma a abranger todo o intervalo de energia medido.

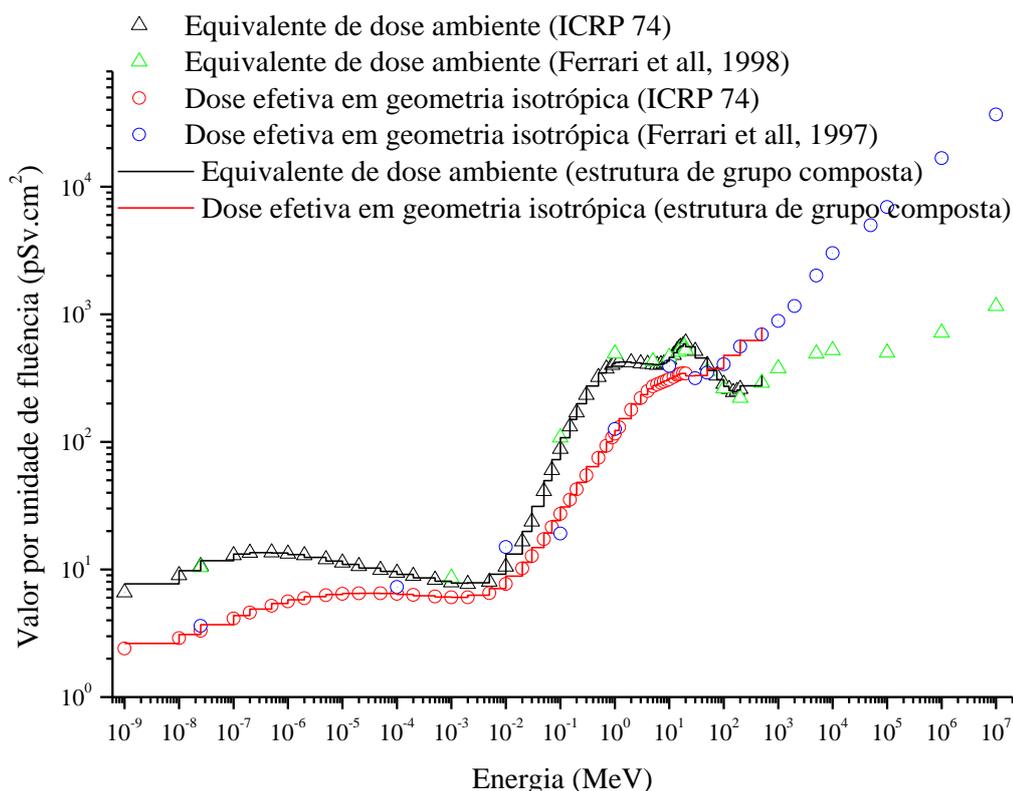


Figura 45 - Fatores de conversão de fluxo para dose oriundos da ICRP 74 (1997), Ferrari et al. (1997), Pelliccioni (2000) e combinação deles em estruturas de grupo compostas.

O equivalente de dose ambiente obtido a partir dos espectros de nêutrons pode ser comparado com o estimado por meio do programa computacional EXPACS na Figura 46. Nesta Figura pode-se observar uma boa concordância para as altitudes de 1.840 m e 2.400 m. Entretanto, para altitudes menores do que 1.840 m, os valores obtidos experimentalmente chegam a ser até cerca de 160 % superiores aos valores obtidos por meio do programa computacional EXPACS. Esta discrepância se mantém comparando-se, na mesma figura, com o resultado obtido por Kowatari et al. (2005), em local com rigidez de corte semelhante. As possíveis origens dessa discrepância podem estar nas condições ambientais de medição, principalmente devido a espalhamento em estruturas próximas

(FEDERICO et al., 2010b) ou na interferência de hádrons carregados na instrumentação experimental, principalmente prótons e píons (GOLDHAGEN et al., 2002).

Na Figura 46 é ainda apresentada a composição do equivalente de dose ambiente em termos de contribuição por faixa de energia. As regiões de energia foram divididas entre nêutrons térmicos (de 0,023 eV a 0,2 eV), nêutrons epitérmicos (de 0,2 eV a 5 keV), nêutrons oriundos de processos de evaporação nuclear (de 5 keV a 20 MeV) e nêutrons oriundos de processo de espalação (acima de 20 MeV). Pode-se observar que a contribuição dos nêutrons térmicos e epitérmicos no equivalente de dose ambiente é pequena em todas as altitudes, preponderando os nêutrons oriundos de evaporação e espalação.

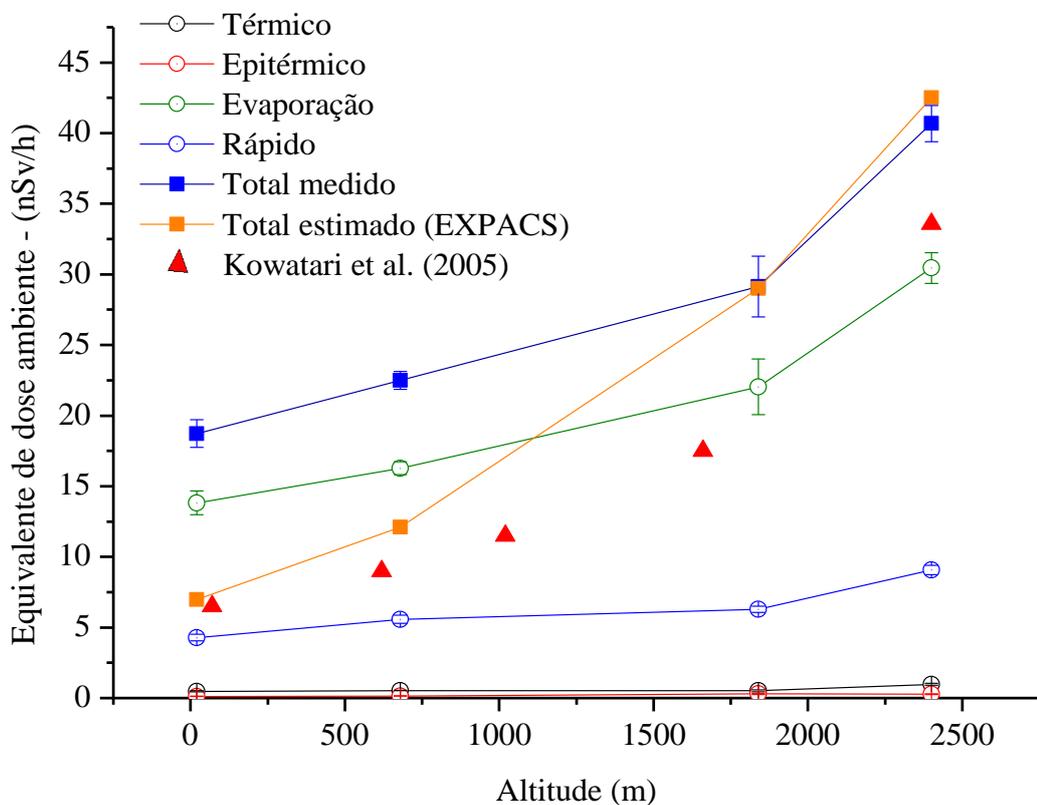


Figura 46 - Comparação dos resultados experimentais com a estimativa teórica e com o obtido por Kowatari, et al. (2005), em local com rigidez de corte semelhante.

4.3 Ensaios de medição de dose em solo

Para complementar os dados de taxa de dose em altitudes reduzidas, foram realizadas medições da taxa de dose total (componente neutrônico + componente não

neutrônico) em solo, em localidades próximas às descritas na Tabela 16 e sujeitas à mesma rigidez de corte vertical.

Estas medições foram realizadas utilizando os sistemas THERMO FH e QDos e, sempre que possível, foram realizadas no topo de estruturas tais como torres ou elevações, de forma a evitar ao máximo a influência do espalhamento de radiação em estruturas e no solo. As informações sobre estas medições são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Localização dos ensaios de mensuração de dose em solo.

Localização	Tipo de ensaio	Coordenadas geográficas	Data do ensaio	Horário	Altitude
				(UT)	(m)
São Sebastião – SP	Solo	23,84 S, 45,42 O	27 Jan 2011 - 28 Jan 2011	13:00 - 15:00	38
São José dos Campos – SP	Solo	23,15 S, 45,51 O	25 Feb 2011	11:00 -16:30	680
Itajubá – SP	Solo	22,50 S, 45,50 O	22 Dez 2010	11:30 -17:30	1867
Itatiaia - RJ	Solo	22,20 S, 44,40 O	04 Feb 2011	13:00 - 16:00	2400

Os resultados das medições são apresentados na Figura 47, juntamente com a estimativa computacional efetuada com o programa EXPACS.

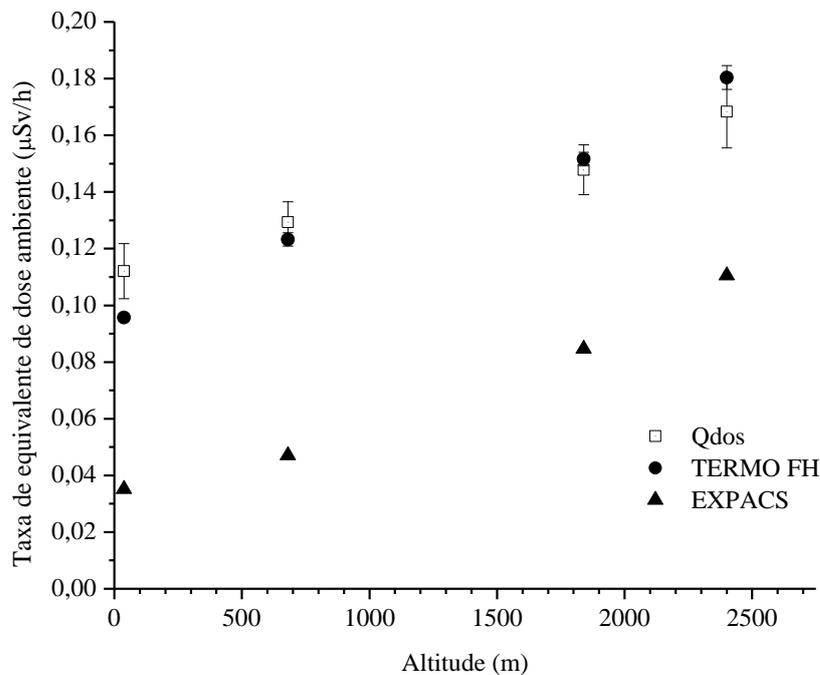


Figura 47 - Taxas de equivalente de dose ambiente medidas em solo.

Pode-se observar na Figura 47 que os valores medidos são sistematicamente superiores à estimativa computacional, porque ela não considera os efeitos de emissões oriundas de materiais radioativos naturais presentes no solo e em estruturas.

4.4 Medições de nêutrons no CERN

Devido à grande contribuição do componente neutrônico no equivalente de dose ambiente, faz-se necessário verificar a resposta da instrumentação utilizada com relação ao campo de nêutrons presente em altitudes de voo.

O campo de radiação neutrônica produzido pela RC abrange energias da ordem de até centenas de MeV, possuindo picos mais pronunciados na região de nêutrons térmicos (cerca de 0,023 eV), nêutrons de evaporação (em torno de 1 MeV) e nêutrons provenientes de processos de *espalação* nos constituintes atmosféricos (pico em torno de 100 MeV). As características destes tipos de campos são muito diversas daquelas obtidas em campos neutrônicos emitidos por fontes convencionais de radionuclídeos, aceleradores ou reatores, obrigando a se utilizar campos conhecidos e caracterizados de espectro largo, criados especificamente para simular aqueles obtidos nos locais de medição (SCHUHMACHER, 2004), para a verificação ou para a calibração dos instrumentos de medição.

Existe um arranjo especial nos laboratórios do CERN denominado Campo de Referência de Radiação Cósmica (*Cosmic Ray Reference Field - CERF*), localizado na cidade de *Prevessin*, França, projetado para reproduzir com razoável proximidade o campo existente em altitudes de voo de aeronaves. Embora este campo não possa ser tratado como um padrão metrológico, ele é reconhecido como “o melhor esforço” em nível mundial, de reprodução desse tipo de campo neutrônico, sendo amplamente utilizado para verificação da instrumentação utilizada para fins de dosimetria aeronáutica.

O campo é produzido na linha de feixe H6 da área experimental norte do CERN, situada na cidade de *Prevessin* (França), no anel de aceleração de 6,8 km de circunferência do *Super Proton Synchrotron* (Figura 48) e é formado por um feixe de hádrons, composto por 34,8 % de prótons, 60,7 % de píons e 4,5 % de káons, acelerado a uma energia de 120 GeV. O feixe de hádrons obtido é direcionado para uma área experimental, apresentada esquematicamente na Figura 49, e incide em um alvo de cobre, que pode ser visto na Figura 50. A aceleração do feixe até a energia de extração ocorre no anel de aceleração de 6,8 km de circunferência, possuindo um ciclo de 48s entre cada pulso

de partículas a serem aceleradas. Devido à dispersão ocorrida no processo de aceleração, o feixe extraído possui uma duração média de 9 s, com a forma de pulso apresentada na Figura 51 para taxas de equivalente de dose ambiente média variando de 11 $\mu\text{Sv/h}$ a 1.300 $\mu\text{Sv/h}$, onde a intensidade do pulso pode ser controlada pelo usuário principal a partir da sala de controle, por intermédio de um conjunto de colimadores ajustáveis remotamente.



Figura 48 - Representação ilustrativa de vista aérea do CERN, mostrando a posição do anel do *Super Proton Synchrotron* (subterrâneo) e a posição da área experimental Norte.

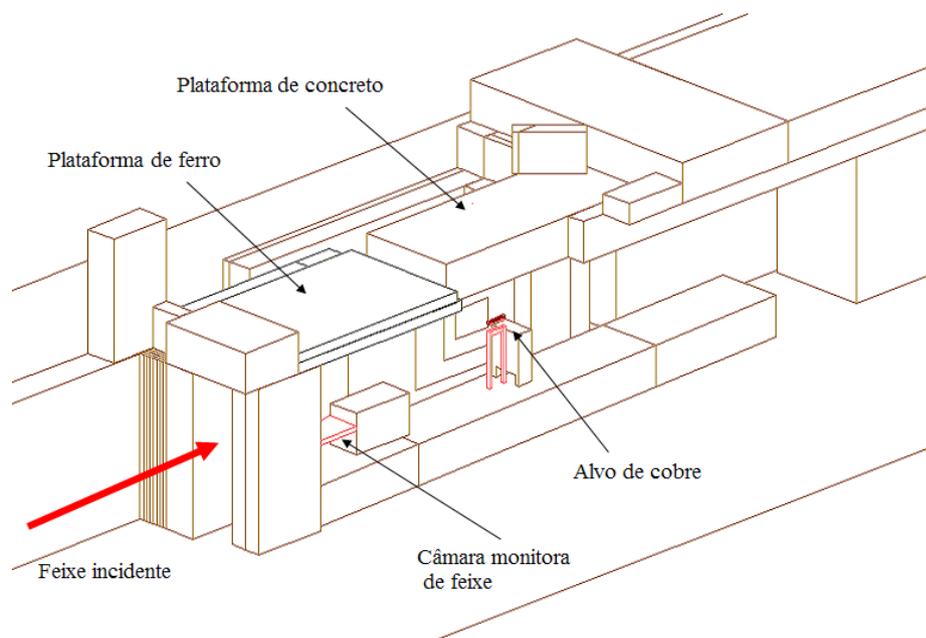


Figura 49 - Desenho esquemático do arranjo de irradiação na linha de feixe H6, com as posições do feixe, alvo e locais de medição experimental (extraído e adaptado de Mitaroff and Silari, (2002)).



Figura 50 - Sala de alvos, onde se pode observar a câmara monitora, posicionada na saída do feixe de hádrons, e o alvo conversor, constituído de cobre.

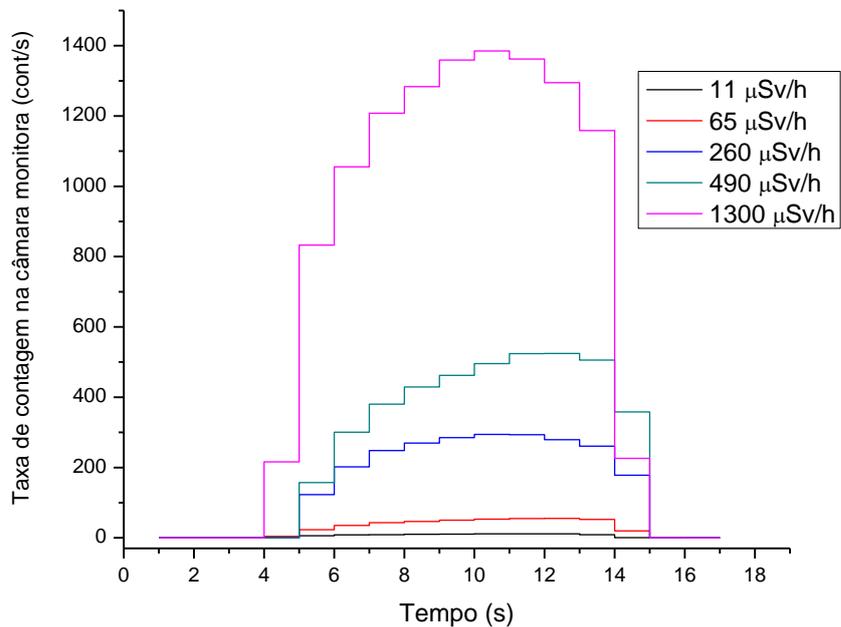


Figura 51 - Formas do pulso de hádrons para as taxas de equivalente de dose ambiente utilizadas.

São disponíveis dois campos neutrônicos com características diferentes. O primeiro utiliza os nêutrons gerados no alvo e que atravessam uma plataforma de ferro, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 49, cuja distribuição de fluência de

nêutrons em função da energia é apresentada na Figura 52, onde se pode observar que predominam os nêutrons com energia na faixa de 0,1 MeV a 1 MeV (MITAROFF and SILARI, 2002).

O segundo campo, de maior interesse para o presente trabalho, utiliza nêutrons gerados no alvo e que atravessam duas plataformas de concreto, uma no topo da instalação e outra em posição lateral, cujos espectros são apresentados na Figura 52, onde se pode observar uma maior contribuição de nêutrons com energia de 10 MeV a 100 MeV (MITAROFF and SILARI, 2002). Na Figura 53 é apresentado o espectro do campo nessa mesma posição, comparado com o espectro de nêutrons típico em altitudes de voo de aeronaves, onde se pode observar a similaridade na forma do espectro e a presença pronunciada dos picos característicos de processos de evaporação (pico em torno de 1 MeV) e de processos de espalção (pico em torno de 80 MeV).

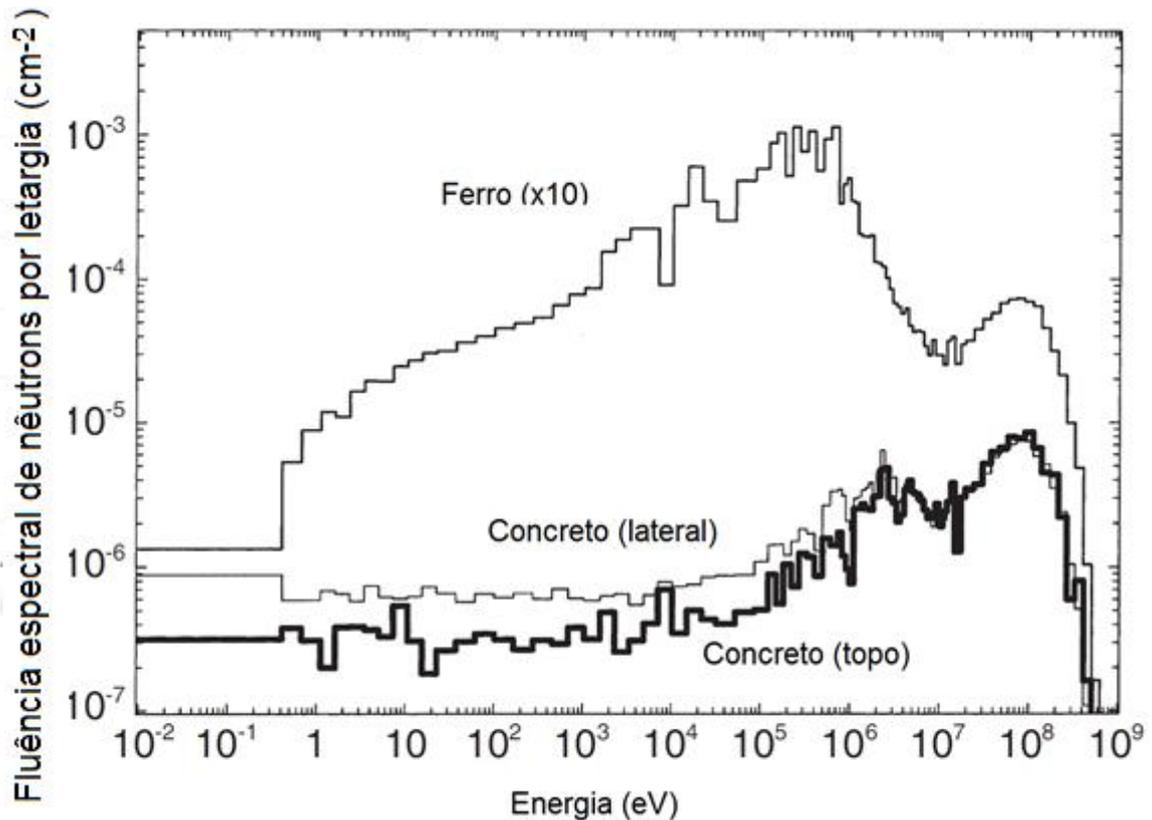


Figura 52 - Distribuição de fluência de nêutrons, em letargia, para o campo sobre a plataforma de ferro e sobre as plataformas de concreto superior e lateral (extraído e adaptado de Mitaroff and Silari, (2002)).

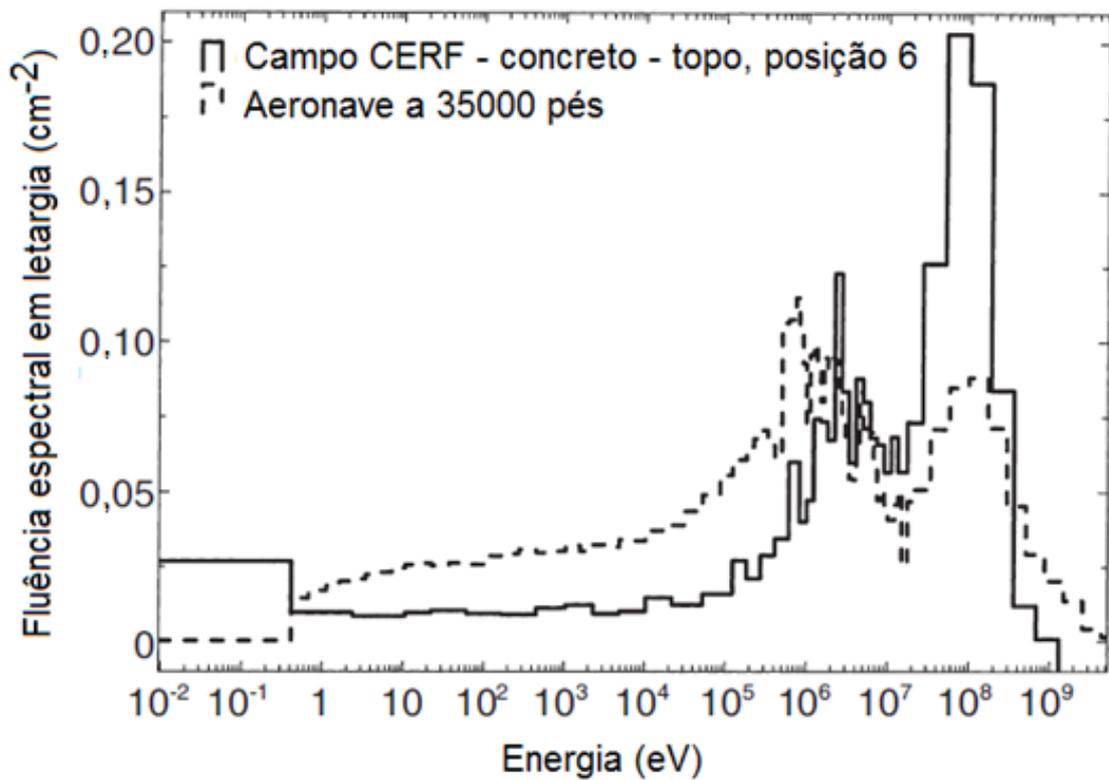


Figura 53 - Distribuição de fluência de nêutrons, em letargia, para o campo sobre a plataforma de concreto, comparado com espectro na altitude de 10,6 km em aeronaves (extraído e adaptado de Mitaroff e Silari (2002)). Em ambos os espectros, a fluência total foi normalizada à unidade.

Os detectores foram irradiados em posições pré-determinadas sobre as plataformas de ferro (Figura 54) e concreto (Figura 55), onde os espectros e fluxos de partículas podem ser calculados a partir do número de contagens obtido em uma câmara monitora de feixe, situada na saída do canal de extração de hádrons (Figura 50). Cada posição consiste em um quadrado de 50 cm de lado e o equivalente de dose ambiente é calculado para um ponto central na altura de 25 cm, em cada posição. A relação entre o número de contagens na câmara monitora de feixe e o equivalente de dose ambiente é dado por Mitaroff e Silari (2002), para cada uma das posições existentes sobre as lajes de concreto e de ferro.



Figura 54 - Parte dos equipamentos, em irradiação sobre a plataforma de ferro.



Figura 55 - Parte dos equipamentos, em irradiação sobre a plataforma de concreto.

No referido campo foram irradiados os seguintes tipo de detectores, que foram posteriormente utilizados nas medições em voo:

- Monitor FH40-G(10) com sonda proporcional interna e sonda de nêutrons externa, modelo FHT-762 (monitor ativo de referência).
- Esfera de polimetilmetacrilato (PMMA) (detector passivo).

- Esfera composta de polietileno de alta densidade e chumbo (PEAD/Pb) (detector passivo).

No decorrer do experimento observou-se que a radiação de fundo (BG) no local é dependente da abertura dos colimadores que são utilizados para controlar a taxa de dose desejada. Mitaroff e Silari (2002) também relataram interferência de múons, produzidos por decaimento de píons oriundos da linha de feixe, bem como interferências de partículas oriundas de linhas de feixe próximas. Por meio do detector FH40-G(10) e sua sonda de nêutrons, foi obtido o BG de fótons e nêutrons em algumas configurações de campo e foram ajustadas funções empíricas para expressar o BG a ser subtraído das medidas experimentais, em função da abertura dos colimadores (Figuras 56 e 57) em cada medição. No caso do componente fotônico (raios X e gama), a radiação de fundo é independente da abertura do colimador e seu valor médio é de $(9,22 \pm 0,21) \mu\text{Sv/h}$. No caso do componente neutrônico a radiação de fundo é dependente da abertura do colimador de acordo com uma função empírica do tipo $Y = A \cdot \exp(-X / B) + C$. Foi realizado um ajuste considerando as incertezas experimentais como fator de ponderação e os valores obtidos no processo de ajuste para as constantes A, B e C foram, respectivamente, $(0,62 \pm 0,57) \mu\text{Sv/h}$, $(39 \pm 142) \text{mm}^2$ e $(0,58 \pm 0,04) \mu\text{Sv/h}$.

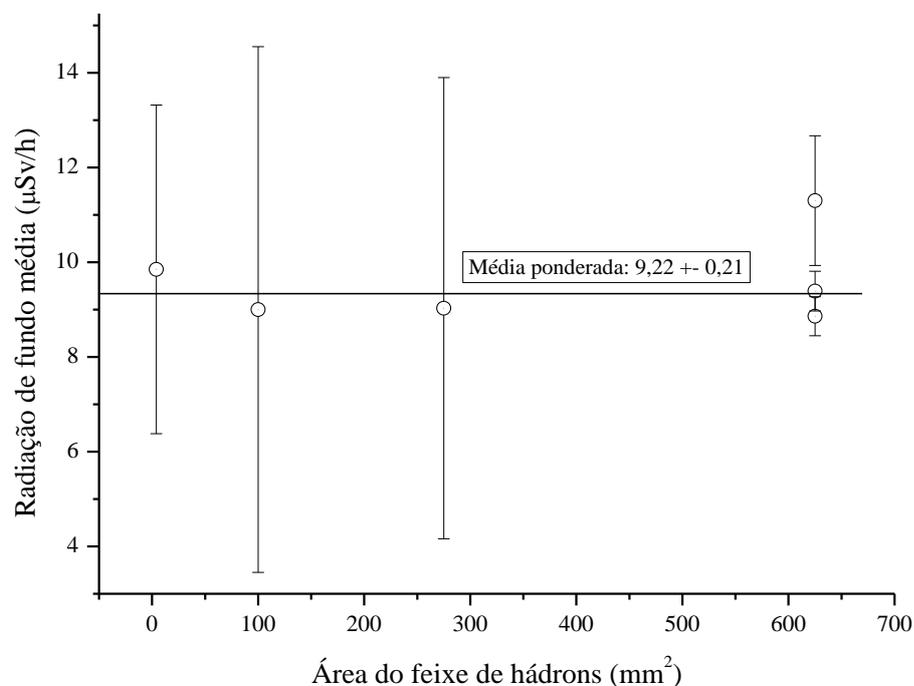


Figura 56 - Avaliação da radiação de fundo do componente fotônico no campo CERF.

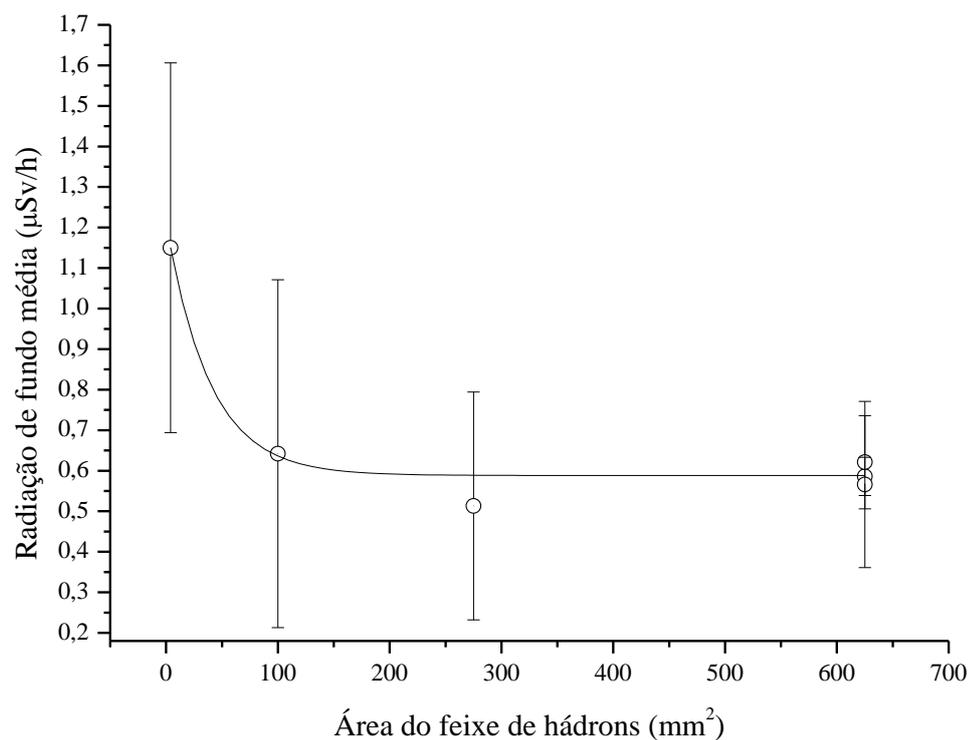


Figura 57 - Avaliação da radiação de fundo do componente neutrônico no campo CERF.

4.4.1 Sistema detector THERMO FH

As respostas do detector FH40-G(10) com a sonda de nêutrons (FHT-762) em comparação com o valor nominal do equivalente de dose ambiente do campo neutrônico, para os campos de concreto e de ferro do CERF são apresentadas nas Figuras 58 e 59, onde podem ser observadas também as retas resultantes dos ajustes lineares aos dados experimentais, onde as incertezas nas medidas foram consideradas como fatores de ponderação no processo de ajuste.

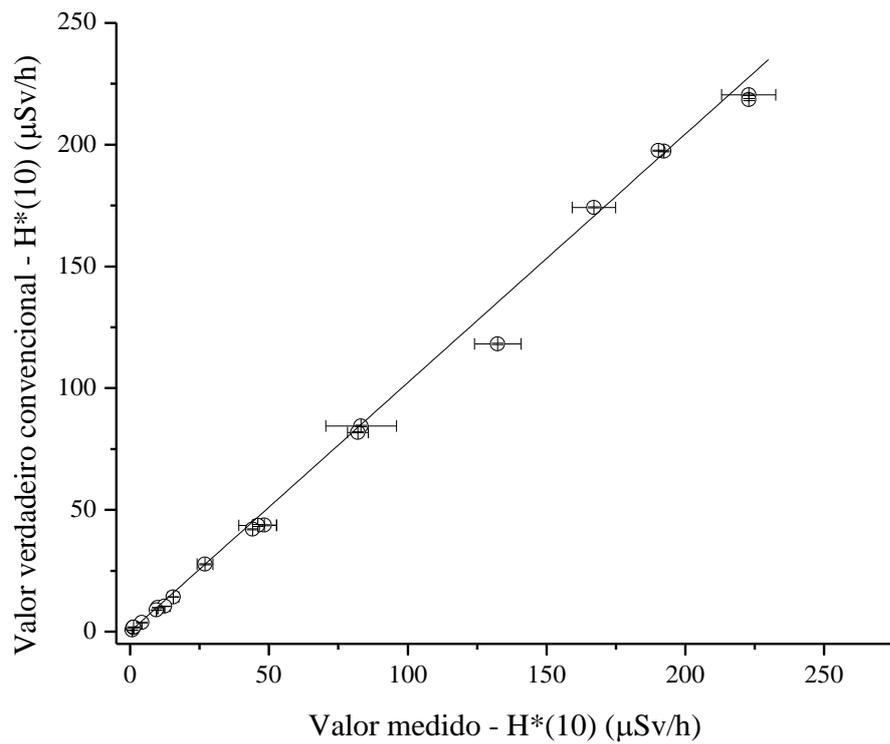


Figura 58 - Curva de resposta em função da taxa de equivalente de dose ambiente para a sonda FHT-762, no campo de concreto do CERF, com a reta ajustada aos dados experimentais.

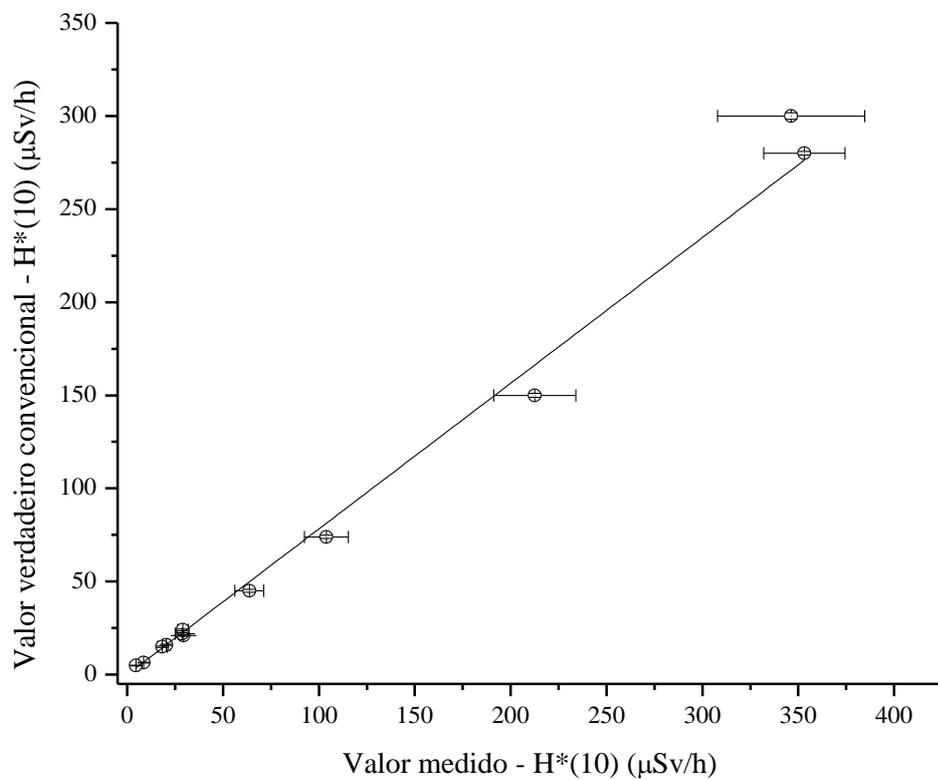


Figura 59 - Curva de resposta em função da taxa de equivalente de dose ambiente para a sonda FHT-762, no campo de ferro do CERF, com a reta ajustada aos dados experimentais.

Complementarmente às medições no CERN, foram efetuadas calibrações com as fontes de $^{241}\text{Am/Be}$ e ^{252}Cf do LNMRI, cujos resultados são apresentados nas Figuras 60 e 61, respectivamente, juntamente com as retas resultantes de um ajuste linear aos dados experimentais, onde as incertezas nas medidas foram consideradas como fatores de ponderação no processo de ajuste.

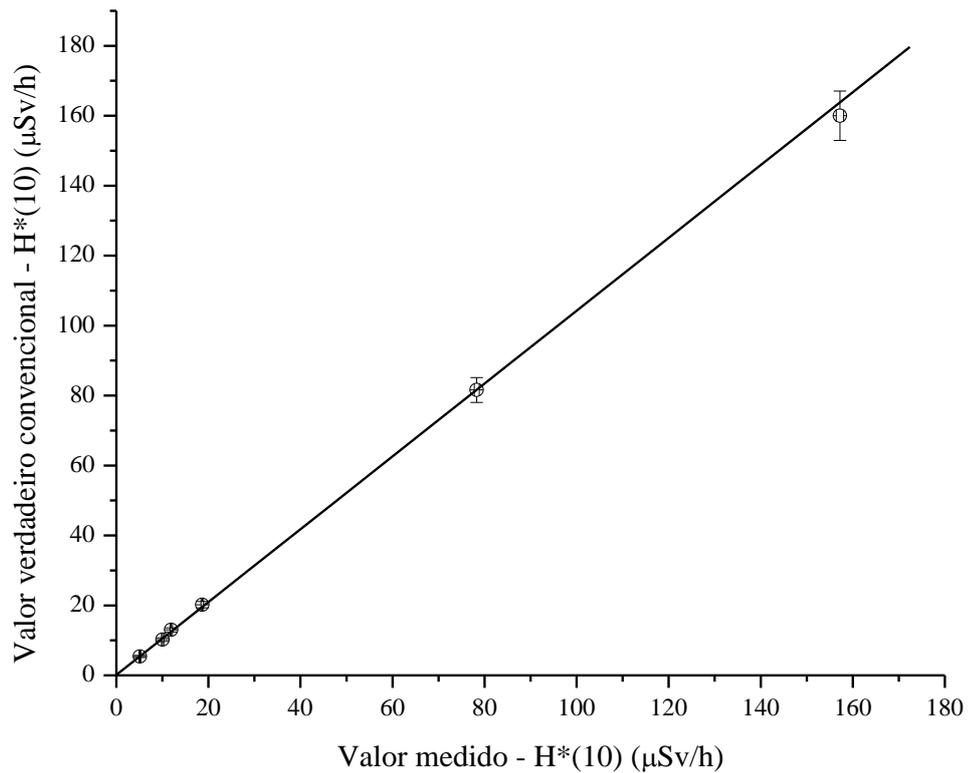


Figura 60 - Medidas obtidas com a fonte de $^{241}\text{Am/Be}$ do LNMRI, com a reta ajustada aos dados experimentais.

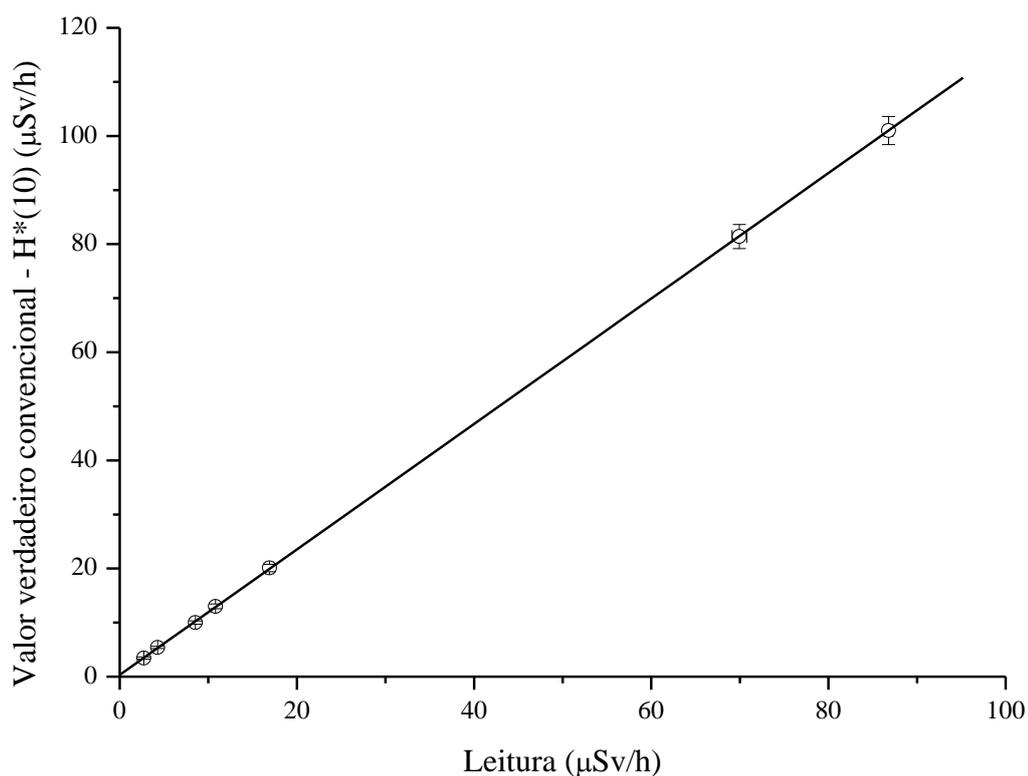


Figura 61 - Medidas obtidas com a fonte de ^{252}Cf , com a reta ajustada aos dados experimentais.

Para verificar a linearidade da leitura do instrumento e a eventual existência de um desvio do zero (*off-set*) foi feito um ajuste linear ($y = A + B.x$), onde o coeficiente linear "A" é o "*off-set*" e o coeficiente angular "B" é o fator de correção da leitura.

Na Tabela 19 são apresentados os coeficientes obtidos em cada ajuste linear efetuado pelo método dos mínimos quadrados, onde se pode observar que o valor do termo constante para os quatro campos de radiação neutrônica utilizados são compatíveis com zero, num intervalo de confiança de até dois desvios-padrão. Observa-se na mesma tabela uma subestimação de 4 % no valor indicado pelo instrumento para o campo de $^{241}\text{Am/Be}$ e de 16 % para o campo de ^{252}Cf . Esta subestimação na leitura do valor real pode ser explicada pela dependência da resposta com a energia dos nêutrons relatada pelo fabricante do equipamento, considerando que a energia média dos nêutrons do $^{241}\text{Am/Be}$ é de aproximadamente 4,5 MeV e do ^{252}Cf é de aproximadamente 1 MeV.

Tabela 19 - Resultados dos ajustes das funções lineares aos dados experimentais do equivalente de dose ambiente para nêutrons.

Fonte	Coeficiente linear ($\mu\text{Sv/h}$)		Coeficiente angular		Coeficiente de determinação
	A	σ_A	B	σ_B	R^2
$^{241}\text{Am/Be}$	0,14	0,25	1,040	0,020	0,998
^{252}Cf	0,33	0,21	1,160	0,022	0,999
CERF (ferro)	0,05	0,91	0,782	0,018	0,994
CERF (concreto)	0,12	0,39	1,021	0,006	0,999

Para o campo CERF no concreto, de especial interesse neste trabalho, o resultado do coeficiente linear obtido no ajuste é compatível com zero, o que mostra não haver um desvio sistemático de leitura nos valores medidos pelo instrumento em relação aos valores de referência do campo neutrônico. Como a relação entre os valores medidos e os valores de referência é linear, para ter melhor precisão no valor do coeficiente angular da reta de calibração e na sua incerteza, pode-se efetuar um novo ajuste destes dados, fixando-se o coeficiente linear em zero. A incerteza σ_A anteriormente obtida neste termo, que agora por hipótese é nulo, no novo ajuste é transportada como incerteza no fator de calibração. Neste novo ajuste obtém-se para o coeficiente angular o valor de $1,022 \pm 0,005$, com R^2 de 0,998, indicando que as leituras do instrumento devem ser corrigidas em + 2,2 % com uma incerteza estatística neste coeficiente de 0,5 %.

Além da incerteza estatística associada à indicação do instrumento obtida no ajuste com o campo padrão do CERN, deve-se acrescentar a incerteza no valor do campo utilizado na calibração, o qual é reportado em 2 % (Mitaroff and Silari, 2002) e que é uma covariância para todos os dados da calibração. Considerando que a função calibração é linear e que na obtenção do coeficiente de calibração só foram consideradas as variações de natureza estatística, a incerteza do campo deve ser somada quadraticamente à incerteza estatística do coeficiente de calibração, obtendo-se a variância total do coeficiente de calibração a ser utilizado na correção das leituras do instrumento empregado em campo. Dessa forma, o coeficiente de calibração para o sistema detector THERMO FH, para o componente neutrônico, é: $1,022 \pm 0,021$.

Foi também avaliada a dependência da resposta com a direção de incidência da radiação para as direções de incidência superior, inferior e lateral no campo CERF no

concreto, onde se observou diferenças inferiores a 1 % para o equipamento em questão, conforme pode ser observado na Figura 62.

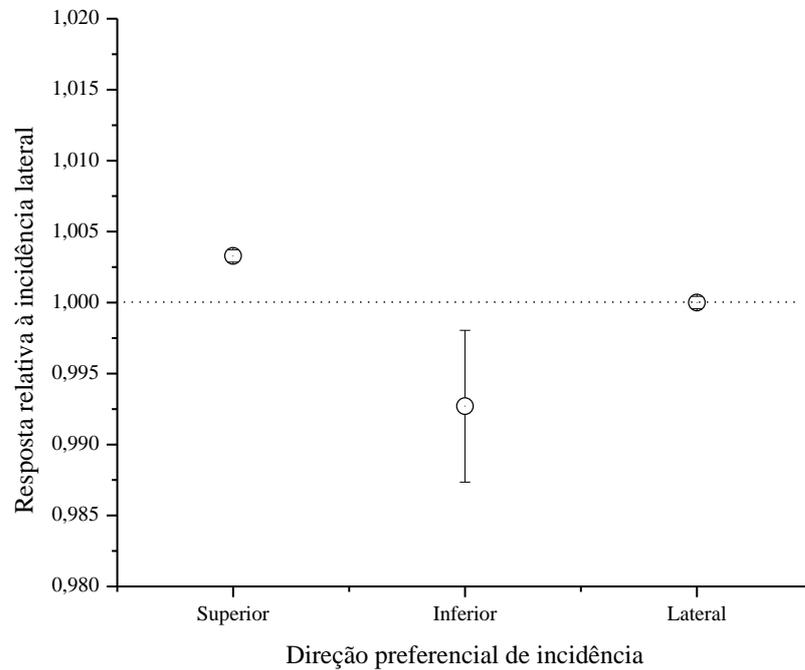


Figura 62 - Curva de resposta em função da direção preferencial de incidência da radiação para a sonda FHT-762.

4.4.2 Dosímetros baseados em pastilhas termoluminescentes

Para irradiação, os monitores passivos (esferas) desenvolvidos neste trabalho foram preenchidos com DTL nas posições previamente especificadas, sempre de forma a se obter um ou mais pares de TLD-600 e TLD-700 em cada posição de medição. As posições em cada esfera foram apresentadas na Figuras 26 e 28, aqui reproduzidas (Figuras 63 e 64).

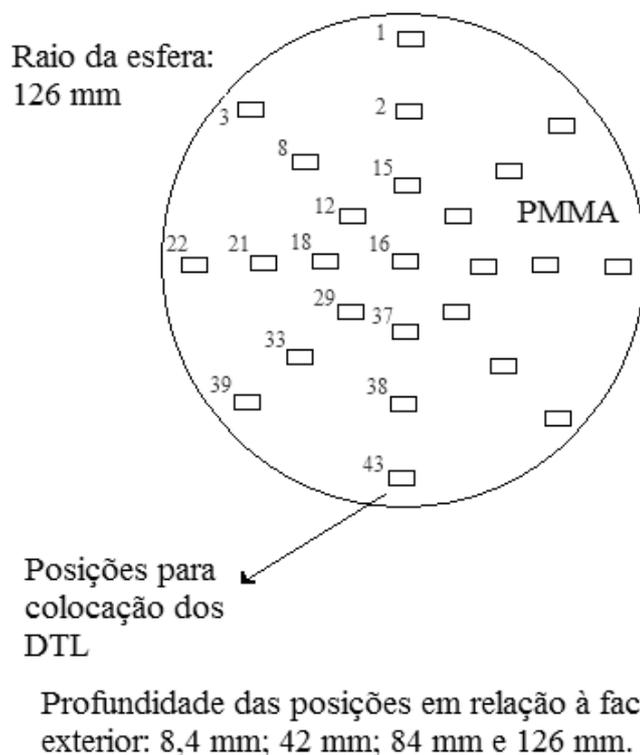


Figura 63 - Desenho esquemático da esfera de PMMA com as posições de DTL utilizadas.

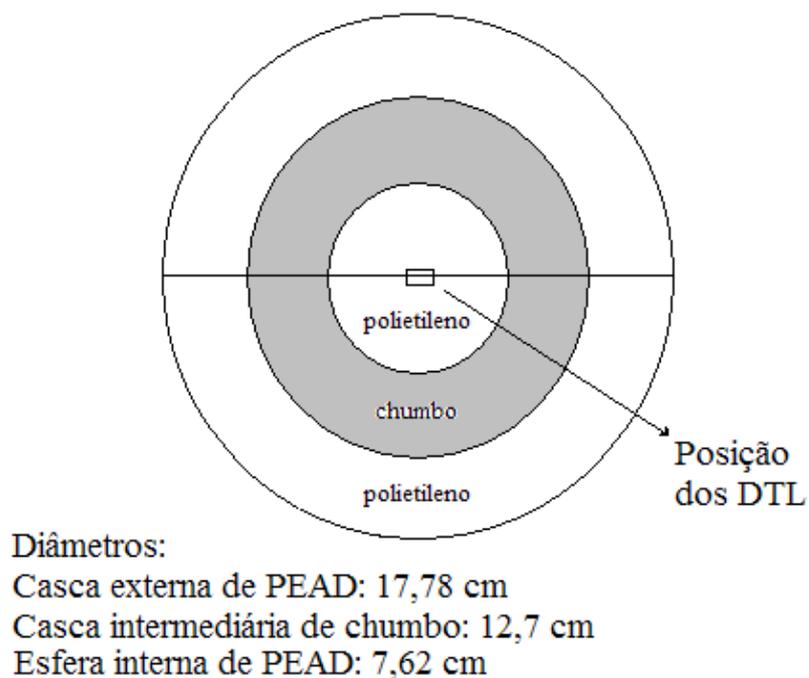


Figura 64 - Desenho esquemático da esfera de PEAD/Pb com a posição de DTL utilizada.

As respostas obtidas, após subtraídos o BG e o sinal referente ao conjunto de dosímetros de transporte, são convertidas diretamente em dose absorvida no material do dosímetro, no caso dos dosímetros TLD-700.

No cálculo efetuado para a esfera de PMMA submetida ao campo CERF na plataforma de concreto, a dose média depositada nas pastilhas de TLD-700 das posições 1, 3, 22, 39 e 43 (correspondentes à profundidade de 10 mm na esfera ICRU), convertidas para dose equivalente, foi de $(4,04 \times 10^{-5} \pm 0,20 \times 10^{-5}) \mu\text{Sv/PIC}$, enquanto o valor estimado por meio do monitor THERMO FH foi de $(5,98 \times 10^{-5} \pm 0,89 \times 10^{-5}) \mu\text{Sv/PIC}$ para os componentes não neutrônicos do campo. Para fins práticos de utilização da esfera de PMMA em campos de energias altas, considera-se como monitor de referência o THERMO FH, uma vez que não se dispõe de campos não neutrônicos de radiação cósmica calibrados. Dessa forma, o fator de calibração da esfera de PMMA fica $1,48 \pm 0,23$, sendo que esta discrepância deverá ser investigada em trabalhos futuros.

Os resultados das medições do componente neutrônico realizadas no campo CERF na plataforma de concreto, obtidos por meio da metodologia descrita na seção 4.1 são apresentados na Figura 65. Na mesma figura é apresentada a reta de ajuste de uma função linear aos dados experimentais, de onde é obtido o fator de calibração (F_c) para a esfera de PEAD/Pb, que é de $(2,84 \pm 0,13) \times 10^{-3} \mu\text{Sv/pC}$. Cabe observar que o TLD-600 é um medidor de fluxo térmico e portanto deve ser calibrado para equivalente de dose ambiente em relação a um campo conhecido cuja distribuição em energia seja similar àquela encontrada no campo a ser medido.

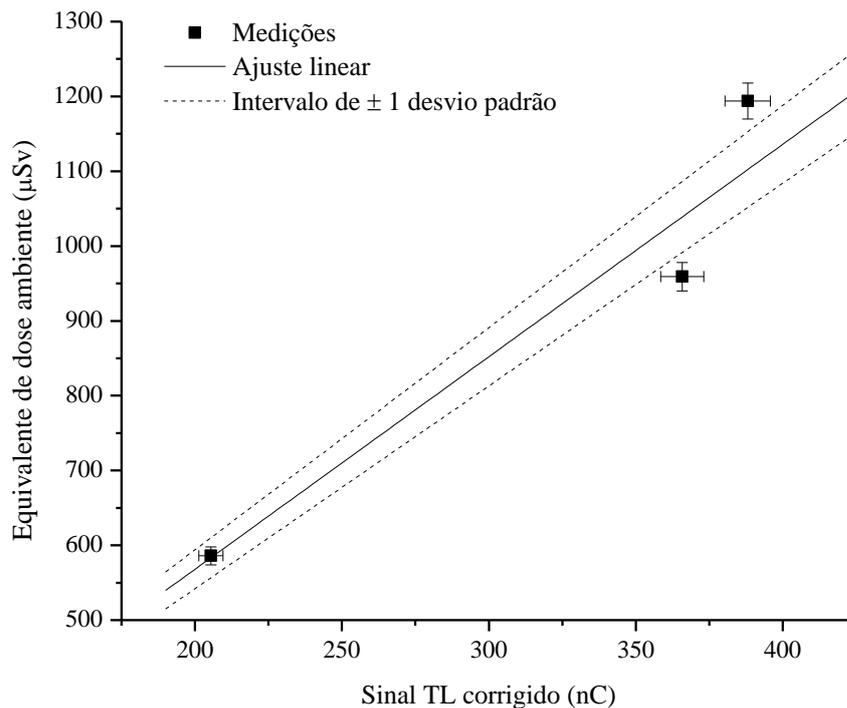


Figura 65 - Calibração da esfera de PEAD/Pb para o componente neutrônico no campo CERF, na plataforma de concreto de topo. As linhas pontilhadas representam o intervalo de confiança de um desvio padrão.

Pode ser observado na Figura 65 que o ajuste apresenta uma confiabilidade pequena devido à falta de linearidade dos pontos experimentais, o que indica a necessidade de novas irradiações. Uma alternativa possível de abordagem é a simulação computacional, de forma a permitir uma análise prévia do sistema antes de submetê-lo a uma nova calibração em campos de energias altas, entretanto, este processo de simulação carece de maiores desenvolvimentos, pois deverá abranger simulações em energias altas e de subpartículas não convencionais, tais como píons, múons, etc. Considerando-se que o objetivo do trabalho se restringe à demonstração da viabilidade de um monitor, a sua calibração detalhada extrapola este objetivo. Os dados do presente trabalho devem ser utilizados como um indicador da viabilidade das esferas de PMMA e PEAD/Pb como detectores passivos para dosimetria de campos mistos de altas energias.

4.5 Calibração do sistema THERMO FH para radiação gama

A calibração do sistema THERMO FH para radiação gama foi realizada no LCI do IPEN, utilizando as fontes de radiação previamente listadas na Tabela 11. Na Figura 66 podem ser observados os dados coletados, juntamente com as retas resultantes do ajuste linear aos dados experimentais, onde as incertezas nas medições experimentais

foram consideradas como fator de ponderação no processo de ajuste. Os resultados desta calibração são apresentados na Tabela 20.

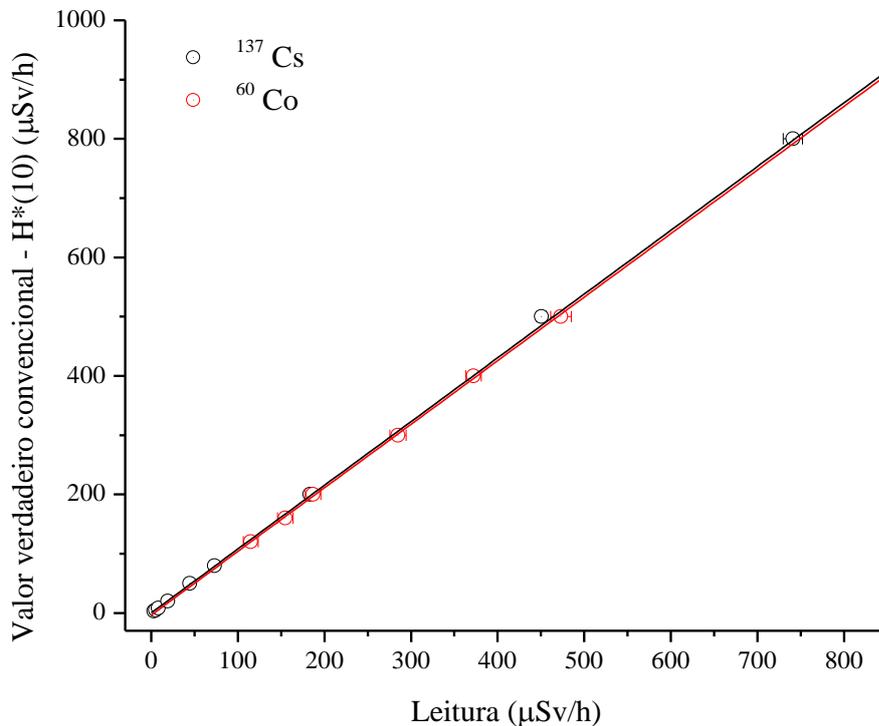


Figura 66 - Calibração do sistema THERMO FH para radiação gama.

Tabela 20 - Resultados dos ajustes de funções lineares aos dados experimentais do equivalente de dose ambiente para radiação gama.

Fonte	Coeficiente linear (µSv/h)		Coeficiente angular		Coeficiente de determinação
	A	σ_A	B	σ_B	R^2
	^{137}Cs	0,16	0,76	1,076	0,016
^{60}Co	-3,5	3,4	1,073	0,013	0,999

O resultado dos coeficientes lineares obtidos nos ajustes são ambos compatíveis com zero, considerando as respectivas incertezas, o que mostra não haver um desvio sistemático de leitura nos valores medidos pelo instrumento em relação aos valores de referência. Como a relação entre os valores medidos e os valores de referência é linear, para ter melhor precisão no valor do coeficiente angular da reta de calibração e na sua incerteza, pode-se efetuar um novo ajuste destes dados, fixando-se o coeficiente linear em zero. A incerteza σ_A anteriormente obtida neste termo, que agora por hipótese é nulo, no novo ajuste é transportada como incerteza no fator de calibração.

Neste novo ajuste obtém-se para o coeficiente angular o valor de $1,077 \pm 0,010$, com R^2 de 0,998, para o campo de ^{137}Cs e o valor de $1,061 \pm 0,005$, com R^2 de 0,999, para o campo de ^{60}Co . Como não foi possível obter campos calibrados com energias mais altas e taxas de dose baixas, optou-se por utilizar a calibração obtida no campo gama do ^{60}Co , por este possuir a maior energia média (1,23 MeV). Da mesma forma que foi feito no caso do campo neutrônico, a incerteza decorrente da calibração do campo, tratada como incerteza sistemática (no caso, estimada em 1,41 %), é somada quadraticamente à incerteza no fator de calibração, resultando em um fator de calibração final de $1,061 \pm 0,015$, a ser utilizado para as medições em voo.

4.6 Testes de compatibilidade e interferência eletromagnética

Para utilização de sistemas ativos em aeronaves, é necessário garantir que eles não emitam campos eletromagnéticos que possam interferir nos sistemas aviônicos, de forma a garantir a segurança da aeronave. Além disso, é necessário assegurar que o sistema não sofra interferência de campos magnéticos e de radiofrequência (RF) que possam adulterar os resultados obtidos.

Para atender a estes requisitos, o sistema THERMO FH foi testado no Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos do IEAv, com relação à emissão eletromagnética, de acordo com a norma FCC, parte 15 (FCC, 2003), não apresentando emissões superiores aos limites aplicáveis de nível de potência de radiação, na faixa de radiofrequência de 30 a 2.000 MHz, conforme pode ser comprovado pelo certificado constante do Anexo C.

Para avaliar a susceptibilidade do sistema a campos magnéticos existentes na aeronave, foram efetuadas medições da densidade de fluxo magnético dentro da aeronave estacionada e em funcionamento, por meio de um gaussímetro marca LAKESHORE, modelo 460, previamente calibrado, que resultaram em uma densidade de fluxo magnético máxima de $(0,77 \pm 0,10)$ gauss. O sistema foi então testado no Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos do IEAv, tendo sido submetido a um campo de $(5,7 \pm 0,3)$ gauss em diversas direções de incidência, enquanto simultaneamente foi irradiado com nêutrons de uma fonte de $^{241}\text{Am/Be}$. Os valores médios das medições são apresentados na Tabela 21 e, dentro de um nível de significância de 5 %, o resultado de um teste t de *student* para avaliar a diferença entre as médias não indica variações entre as medições efetuadas com e

sem a presença do campo magnético, indicando que o instrumento não sofre alterações de leitura devido ao campo magnético da aeronave.

O teste de susceptibilidade à radiofrequência (RF) foi executado com a aeronave no solo e teve por objetivo verificar a interferência eletromagnética dos instrumentos de navegação, radar e comunicação da aeronave no sistema THERMO FH (IPEV, 2011). O detector foi submetido a uma fonte de nêutrons de $^{241}\text{Am/Be}$ de atividade pequena e todos os sistemas de emissão de RF da aeronave foram ligados. No decorrer do teste os sistemas foram sendo desligados gradativamente acompanhando-se a taxa de dose medida pelo sistema THERMO FH e, após o desligamento completo, foram religados novamente. Realizado esse procedimento, efetuou-se uma avaliação da influência do sistema de comunicação da aeronave (VHF1/VHF2). Para tanto, mantendo-se a configuração final do ensaio anterior, foram realizadas transmissões, por no mínimo 10 s, nas seguintes frequências: 118,00 MHz; 122,50 MHz; 125,00 MHz; 127,25 MHz; 131,30 MHz e 135,00 MHz, utilizando-se o VHF primário da aeronave. Essas frequências foram definidas com o objetivo de representar a faixa de VHF utilizada nas comunicações realizadas nos voos de ensaio.

Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 21 e não indicam susceptibilidade do detector à RF ou ao campo magnético emitidos pela aeronave.

Tabela 21 - Resultados dos testes de susceptibilidade do sistema THERMO FH à influência de campos magnéticos e de radiofrequência (RF).

Local	Sistemas em operação	Tipo de emissão	Valor medido $\dot{H} * (10)$ (nSv/h)
Laboratório	Nenhum	Nenhuma	1650 ± 50
	Bobina de campo padrão	Campo magnético ($5,7 \pm 0,3$) gauss	1671 ± 50
Aeronave	Nenhum	Nenhuma	1600 ± 80
	Radar meteorológico, rádio-altímetro, rádio de comunicação VHF, transponder primário e secundário, sistemas de navegação	RF	1540 ± 80

4.7 Mensurações do equivalente de dose ambiente em voo

As mensurações em voo foram realizadas utilizando os detectores ativos apresentados nas subseções 3.1.1 e 3.1.2. Os detectores passivos, devido ao seu maior limiar de detecção, só foram utilizados nas missões cuja dose acumulada prevista era superior ao limiar de detecção do sistema dosimétrico.

Os instrumentos foram posicionados na aeronave conforme apresentado na Figura 67, mais de 1,2 m distantes entre si e de pessoas, de forma a minimizar a possibilidade de interferência devido ao espalhamento de nêutrons. Na mesma figura são apresentadas também as posições dos compartimentos de combustível da aeronave, pois eles podem causar espalhamento e atenuação dos nêutrons e influenciar as doses medidas, conforme será discutido na subseção 4.8.

A aeronave utilizada nos ensaios foi um VU-35 (Learjet), prefixo 2715, pertencente ao Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) do Comando da Aeronáutica, mostrado na Figura 68.

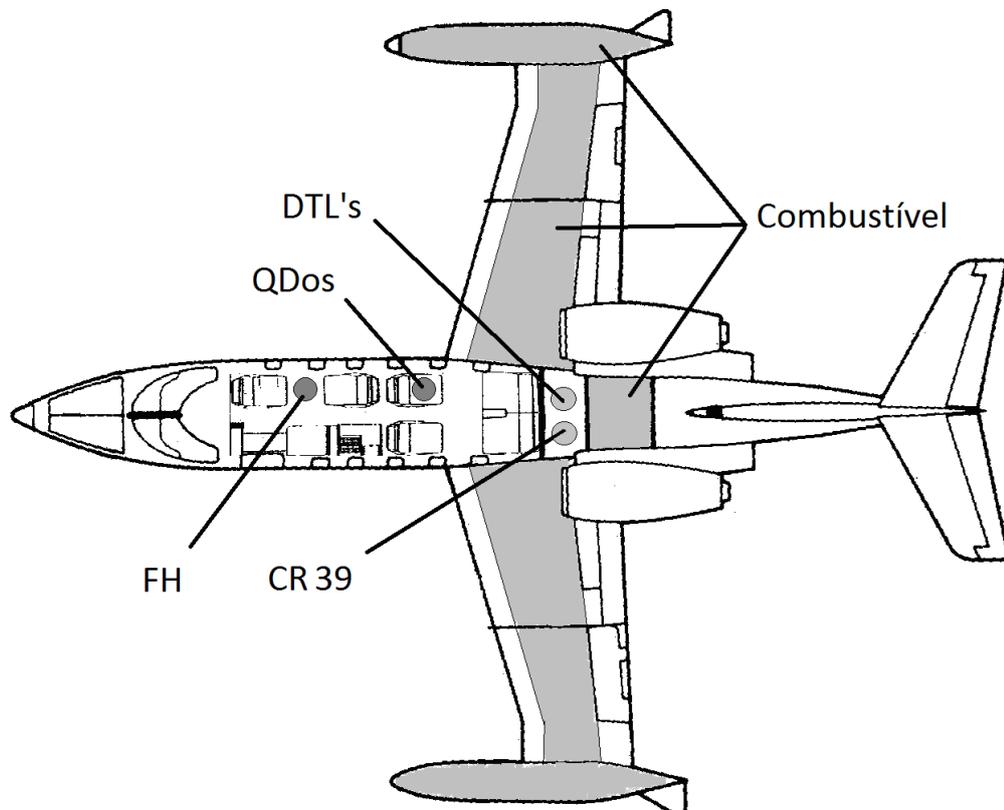


Figura 67 - Representação esquemática das posições dos instrumentos de medição ativos e passivos (quando instalados) e dos compartimentos de combustível da aeronave.



Figura 68 - A aeronave VU-35, do IPEV, sendo aparelhada para um dos ensaios experimentais.

As missões de ensaio em voo ocorreram no período de dezembro de 2010 a junho de 2011 e foram divididas entre ensaios em ponto fixo, onde a aeronave desenvolve uma trajetória fechada em torno de um ponto de referência e ensaios de rota entre dois pontos. Todas as missões em voo foram rastreadas por meio de um sistema de GPS dedicado, referenciado ao DATUM WGS84, permitindo o registro e o acompanhamento em tempo real das coordenadas geográficas e da altitude real da aeronave. A Tabela 22 apresenta um resumo de todos os ensaios realizados em voo.

Tabela 22 - Informações dos ensaios em voo.

Ensaio	Localização	Tipo de ensaio	Coordenadas geográficas	Data do Ensaio	Horário (UT)	Altitude (m)
1	S. J. Campos, SP	Ponto fixo	22,73 S; 45,46 O	08 Dez 2010	17:00 - 18:00	4.876 (FL 160)
2	S. J. Campos, SP	Ponto fixo	22,73 S; 45,46 O	11 Mar 2011	11:00 - 12:00	7.010 (FL 230)
3	S. J. Campos, SP	Ponto fixo	22,73 S; 45,46 O	30 Dez 2010	14:00 - 15:00	9.448 (FL 310)
4	S. J. Campos, SP	Ponto fixo	22,73 S; 45,46 O	30 Dez 2010	15:00 - 16:00	10.668 (FL 350)
5	S. J. Campos, SP	Ponto fixo	22,73 S; 45,46 O	11 Mar 2011	12:00 - 13:00	13.106 (FL 430)
6	S.J.C.- Recife	Rota	23,13 S; 45,51 O a 08,07 S; 34,55 O	23 Mar 2011	08:30 - 12:16	10.058 (média)
7	Recife - S.J.C.	Rota	08,07 S; 34,55 O a 23,13 S; 45,51 O	24 Mar 2011	20:34 - 23:36	10.180 (média)
8	S.J.C.- Foz do Iguaçú	Rota	23,13 S; 45,51 O a 26,00 S; 53,30 O	29 Jun 2011	11:46 - 13:33	13.157 (média)
9	Foz do Iguaçú	Ponto fixo	26,00 S; 53,30 O	29 Jun 2011	13:33 - 14:33	12.496 (FL 410)
10	Foz do Iguaçú - Canoas	Rota	23,00 S; 53,30 O a 29,95 S; 51,15 O	29 Jun 2011	14:33 - 15:13	11.887 (média)
11	decolagem de Canoas	Rota	29,94 S; 51,15 O a 31,33 S; 50,79 O	29 Jun 2011	17:38 - 18:17	até 12.497
12	Canoas	Ponto fixo	31,25 S; 50,75 O	29 Jun 2011	18:17 - 19:36	12192 (FL 400)
13	Canoas - S.J.C.	Rota	31,25 S; 50,75 O a 23,13 S; 45,51 O	29 Jun 2011	19:36 - 21:01	12.496 (FL 410)

Os ensaios em ponto fixo possuem a característica de permitir um maior controle das incertezas nas medidas, pois não há variação sensível nos parâmetros de altitude, latitude e longitude além de maximizar o tempo de medição em um mesmo ponto, sendo portanto, ideais para intercomparação entre leituras de instrumentos diferentes. Estes ensaios foram realizados em patamares de altitude bem definidos, não se desviando mais de 50 m da altitude de referência e não se afastando mais de 50 km da coordenada de referência. A Figura 69 apresenta o registro do percurso realizado nos ensaios em ponto fixo situados nas áreas de ensaio existentes, denominadas Xavante 1 e Xavante 2, próximas ao aeroporto de São José dos Campos, SP. Os percursos dos ensaios em ponto fixo realizados nas áreas de Foz do Iguaçú (PR) e Canoas (RS) podem ser visualizados na Figura 83.

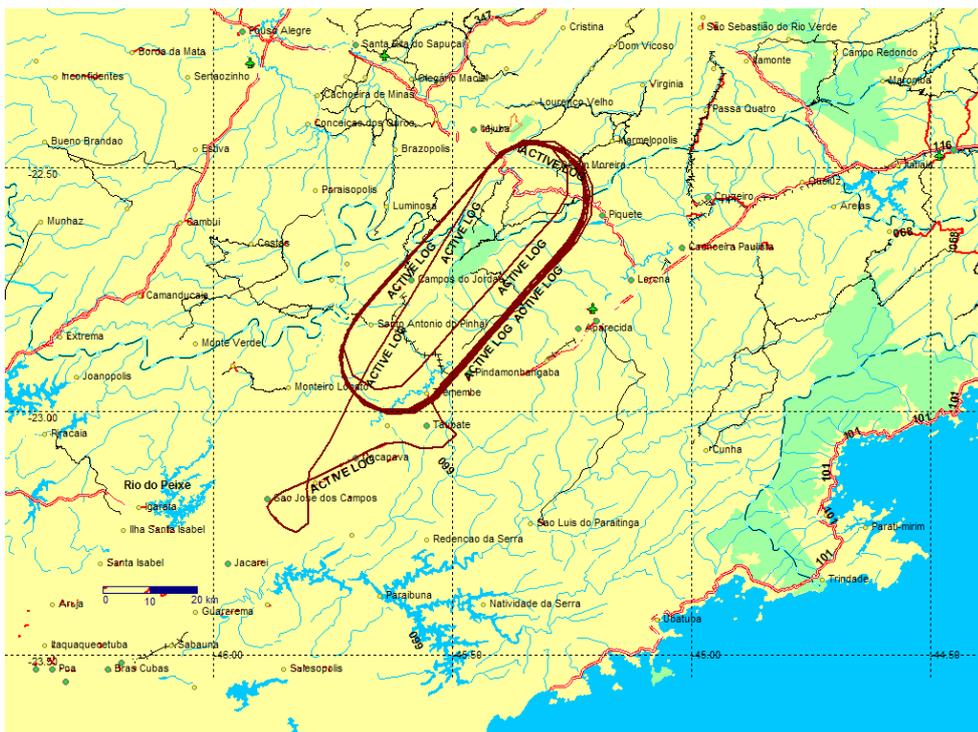


Figura 69 - Rota dos ensaios de ponto fixo, realizados na região próxima ao aeroporto de São José dos Campos, SP.

O resultado final da taxa de equivalente de dose ambiente é calculado por meio do produto da leitura (L) pelo fator de calibração (F_c). No caso de ensaios em ponto fixo são feitas "n" leituras do instrumento no mesmo campo de radiação, de modo que, para melhor precisão no cálculo da taxa de equivalente de dose ambiente neste patamar de altitude, utiliza-se o valor médio das "n" leituras (M_L). A incerteza estatística associada ao valor médio da leitura é o desvio padrão da média (σ_{mL}).

Para o cálculo da incerteza (σ_{Rfinal}) associada ao resultado final da taxa de equivalente de dose ambiente (R_{final}), a incerteza estatística do valor médio das leituras (σ_{mL}) é somada quadraticamente à incerteza associada ao fator de calibração (σ_{Fc}), o qual é tratado como uma covariância para estas "n" medidas:

$$\sigma_{Rfinal} = R_{final} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{mL}}{M_L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Fc}}{F_c}\right)^2}, \quad (16)$$

onde F_c é o fator de calibração.

Na Tabela 23 são apresentados os parâmetros geofísicos preponderantes durante a realização dos ensaios, os quais são utilizados como parâmetros de entrada para os programas computacionais de cálculo de dose. A rigidez de corte foi calculada por meio do código QARM, o potencial heliocêntrico foi obtido por solicitação ao FAA (FAA,

2011b) e o índice geomagnético Kp foi obtido do GFZ *Adolf-Schmidt-Observatory Niemegek* (GFZ, 2011).

Os resultados das medições obtidas nos ensaios 1, 2, 3, 4, 5, 9 e 12 são apresentados nas Figuras 70 a 76, comparativamente aos valores obtidos por meio dos programas computacionais EXPACS, QARM, EPCARD e CARI-6, já descritos na seção 2.10. No caso dos programas EPCARD e CARI-6, que apresentam os resultados na grandeza de proteção dose efetiva, os resultados foram convertidos para a grandeza operacional equivalente de dose ambiente por meio de interpolação e extrapolação linear aos fatores de conversão apresentados na ICRU 84 (ICRU, 2010), cujos resultados são também apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Parâmetros preponderantes nas datas e locais dos ensaios.

Ensaio	Rigidez de corte (GV)	Potencial heliocêntrico (MV)	Índice Kp	E/H*(10) (Sv/Sv)
1	9,6	382	3	0,85
2	9,6	411	2	0,88
3	9,6	374	1	0,90
4	9,6	397	2	0,92
5	9,6	411	2	0,94
6	De 9,6 a 11,7	384	3	0,91
7	De 11,7 a 9,6	364	1	0,92
8	De 9,6 a 9,5	502	0	0,94
9	9,5	502	0	0,93
10	De 9,5 a 8,6	502	1	0,93
11	De 8,6 a 8,3	502	1	0,93
12	8,3	502	1	0,93
13	De 8,3 a 9,6	502	1	0,93

Adicionalmente, nas Figuras 72 e 73 são apresentados também os valores de referência para estes respectivos níveis de voo, interpolados a partir dos valores de referência sugeridos pela recomendação ICRU 84 (ICRU, 2010).

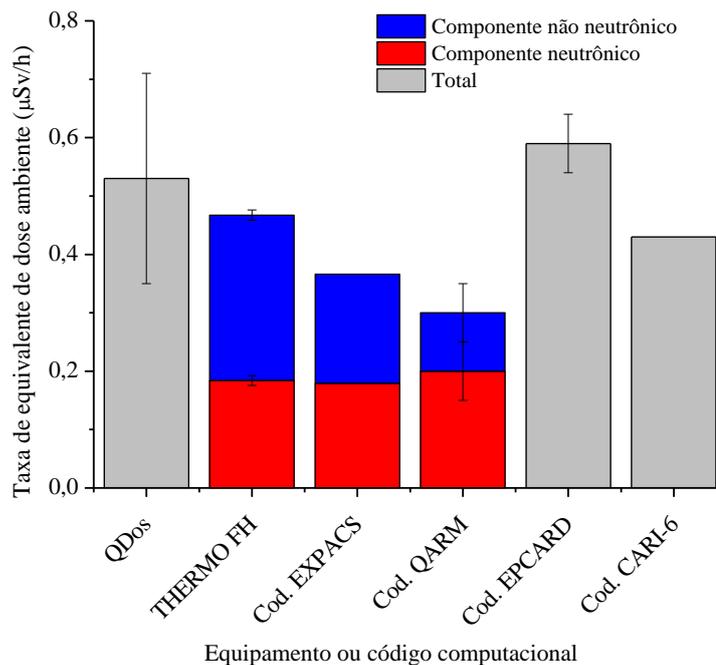


Figura 70 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 4.876 m (FL160), referentes ao ensaio 1.

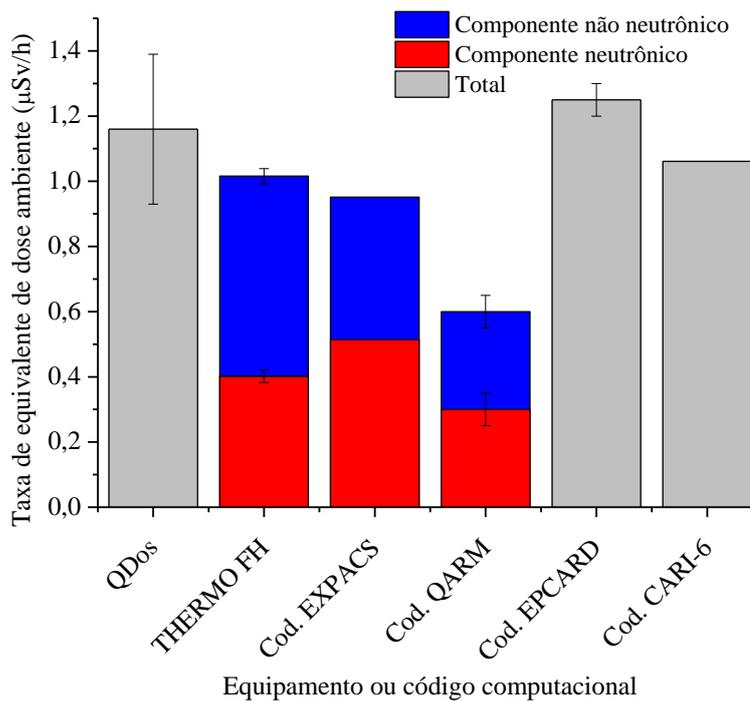


Figura 71 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 7.010 m (FL230), referentes ao ensaio 2.

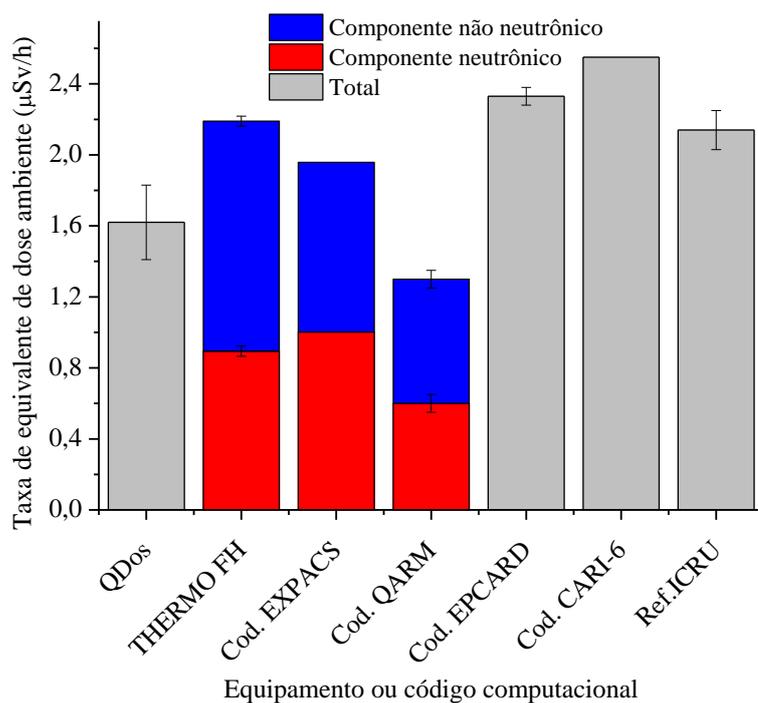


Figura 72 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 9.448 m (FL310), referentes ao ensaio 3.

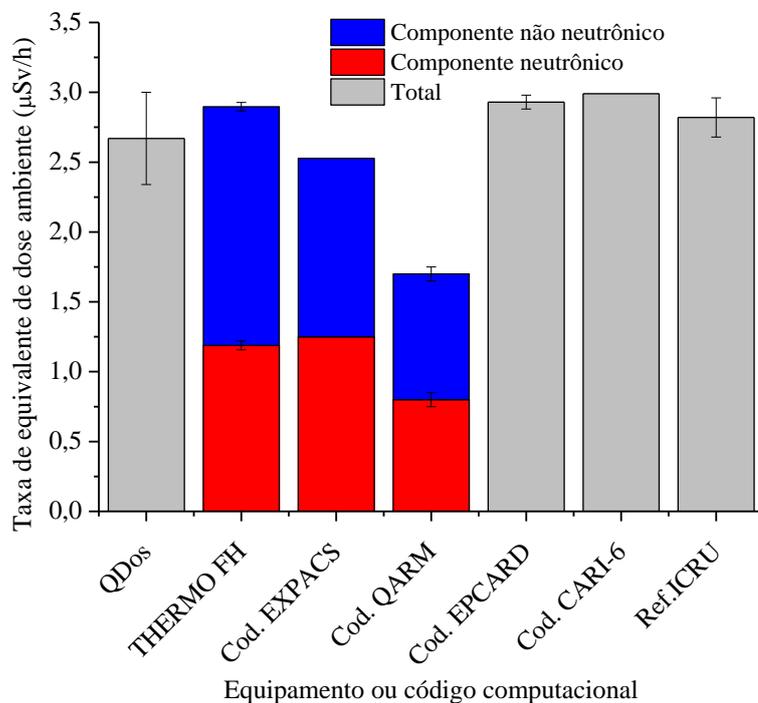


Figura 73 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 10.668 m (FL350), referentes ao ensaio 4.

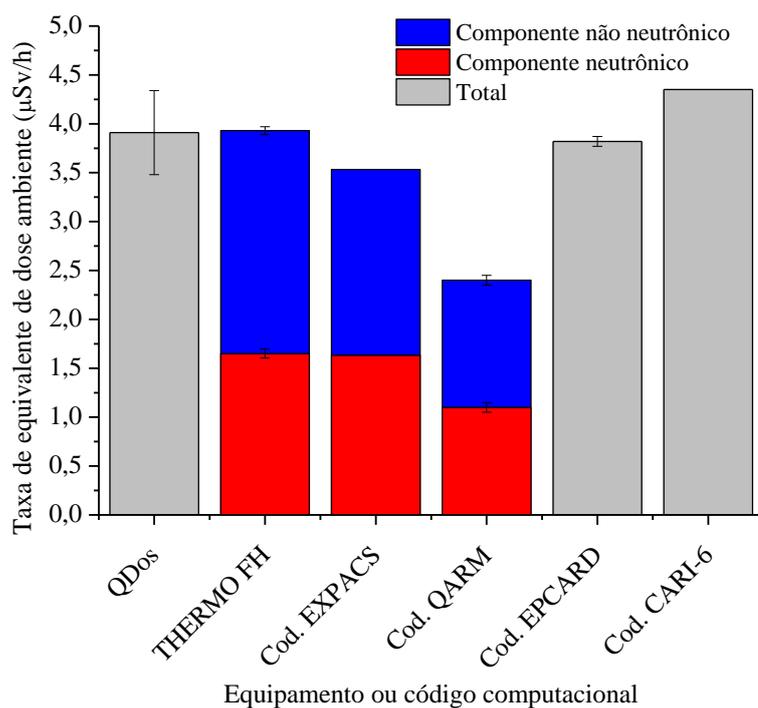


Figura 74 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 13.106 m (FL430), referentes ao ensaio 5.

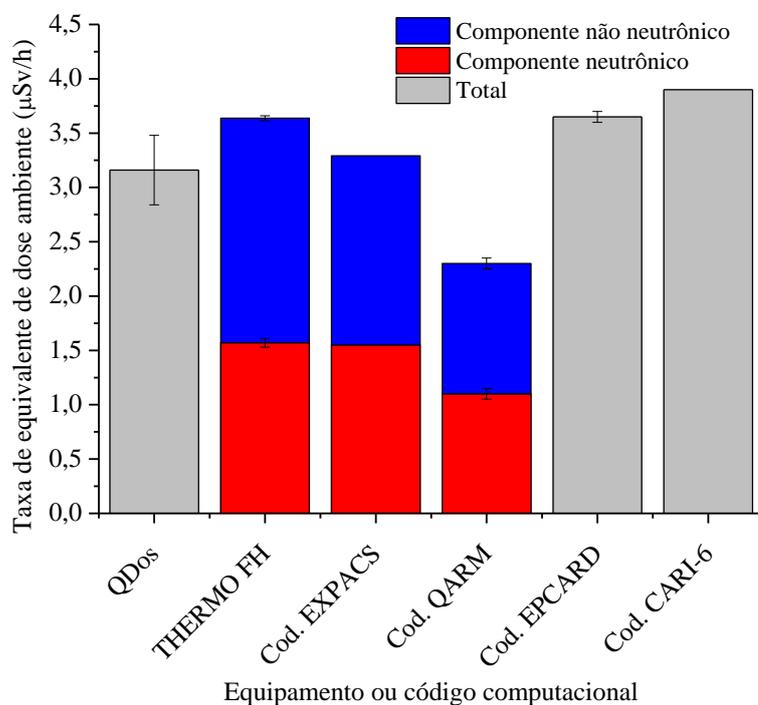


Figura 75 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 12.496 m (FL410), referentes ao ensaio 9.

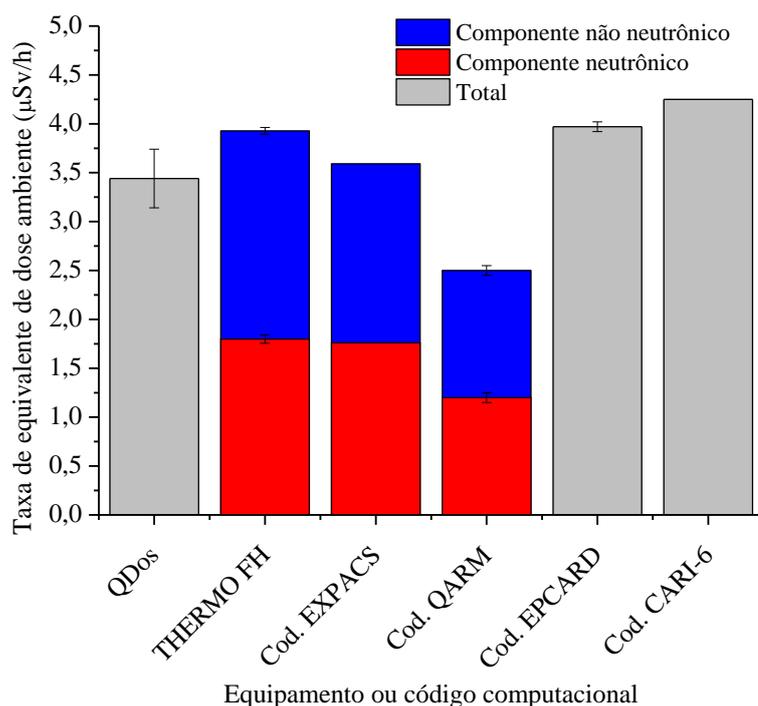


Figura 76 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a altitude de 12.192 m (FL400), referentes ao ensaio 12.

Na Figura 77 são apresentados comparativamente os resultados das medições e simulações em voo realizadas na área de ensaio de São José dos Campos, onde se pode observar o aumento da taxa de equivalente de dose ambiente em função da altitude, bem como pode ser observada uma concordância entre os resultados medidos e simulados dentro do intervalo de $\pm 12,5\%$ ($k=1$), relatado como aceitável pela literatura (EURADOS, 2004 e ICRU, 2010). O código computacional QARM não foi considerado para o cálculo desse intervalo, pois é sabido que ele apresenta uma subestimação sistemática, principalmente para avaliações em latitudes baixas, devido a uma deficiência na simulação do transporte de partículas carregadas, que está sendo corrigida na nova versão do código a ser disponibilizada em breve (FEDERICO et al., 2011).

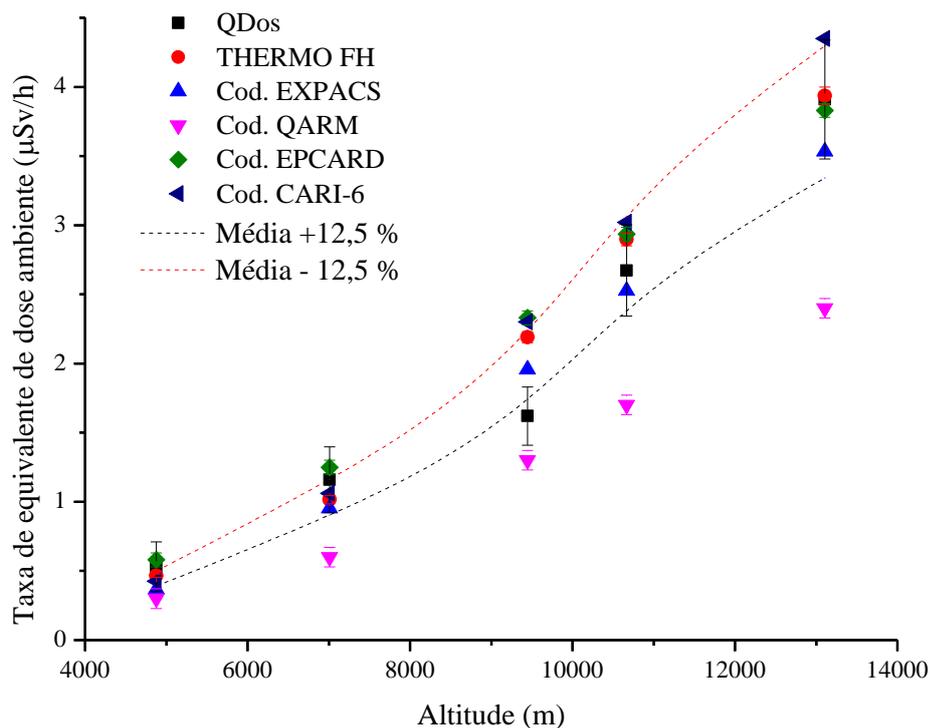


Figura 77 - Valores das taxas de equivalente de dose ambiente medidas e calculadas em função da altitude. As curvas tracejadas indicam o intervalo de $\pm 12,5\%$ do valor médio, desconsiderando-se o código QARM.

De forma análoga, são apresentados na Figura 78 os resultados das medições e simulações em voo realizadas nas áreas de ensaio de Foz do Iguaçu (PR) e Canoas (RS) em função da altitude, onde se pode observar a influência da rigidez de corte do campo magnético nos valores da taxa de equivalente de dose ambiente. Na Figura 79, é apresentado o conjunto completo de medições, normalizadas pelo valor médio em cada ponto fixo, onde foi acrescentado um ponto retirado de uma amostragem de um trecho de um voo entre São José dos Campos e Recife, submetido a uma maior rigidez de corte (11,2 GV). Pode-se observar na Figura 79 uma concordância entre os resultados, mesmo considerando as diferentes localizações geográficas e diferentes valores de rigidez de corte. O código EPCARD apresenta resultados bastante consistentes com os obtidos experimentalmente, seguido dos resultados dos códigos CARI-6 e EXPACS.

Observa-se, também, uma maior dispersão dos resultados para menores altitudes, o que pode ser atribuído à baixa estatística de medida devido às menores taxas de equivalente de dose ambiente.

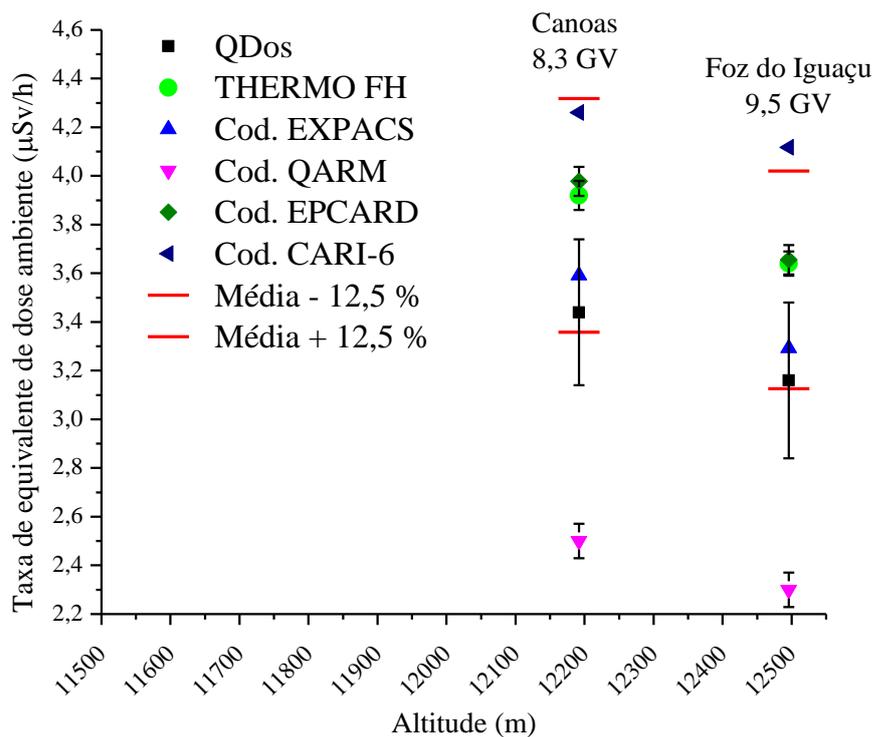


Figura 78 - Valores das taxas de equivalente de dose ambiente medidas e calculadas em função da altitude para os ensaios 9 e 12. Os traços indicam o intervalo de $\pm 12,5\%$ do valor médio, desconsiderando o código QARM.

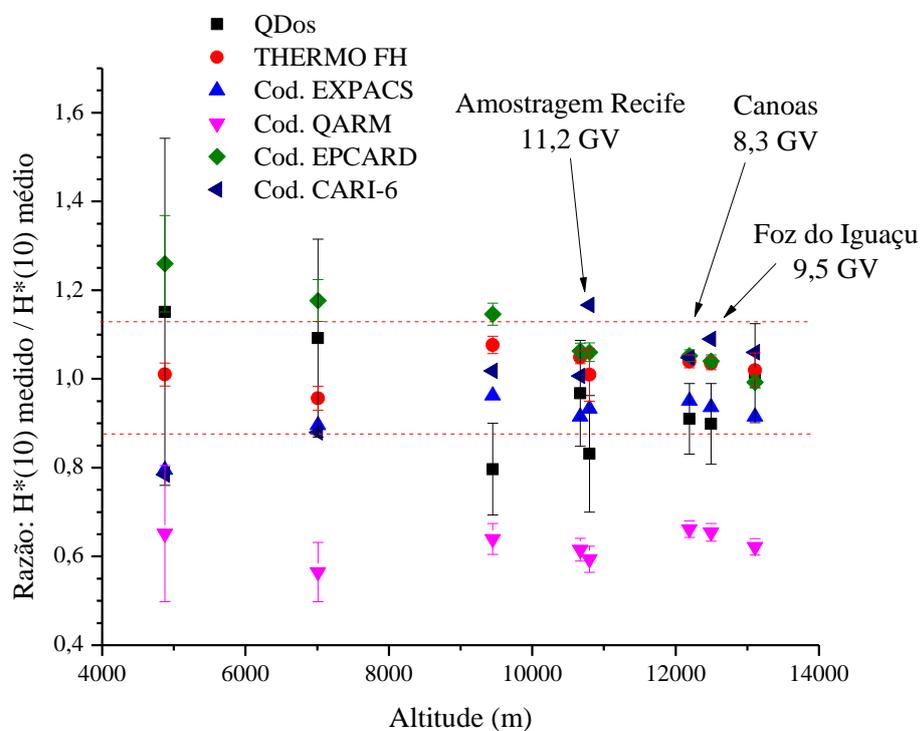


Figura 79 - Conjunto completo de dados das medições de equivalente de dose ambiente em pontos fixos, normalizados pela média.

Na Figura 80 são apresentadas as razões entre o componente não neutrônico em relação ao componente neutrônico, tanto para as medidas experimentais como para as estimativas computacionais, onde pode ser observada a influência da rigidez de corte nessa razão. Na mesma figura os dados obtidos podem ser comparados com os valores reportados por Romero et al. (2004), para altitude e rigidez de corte similares.

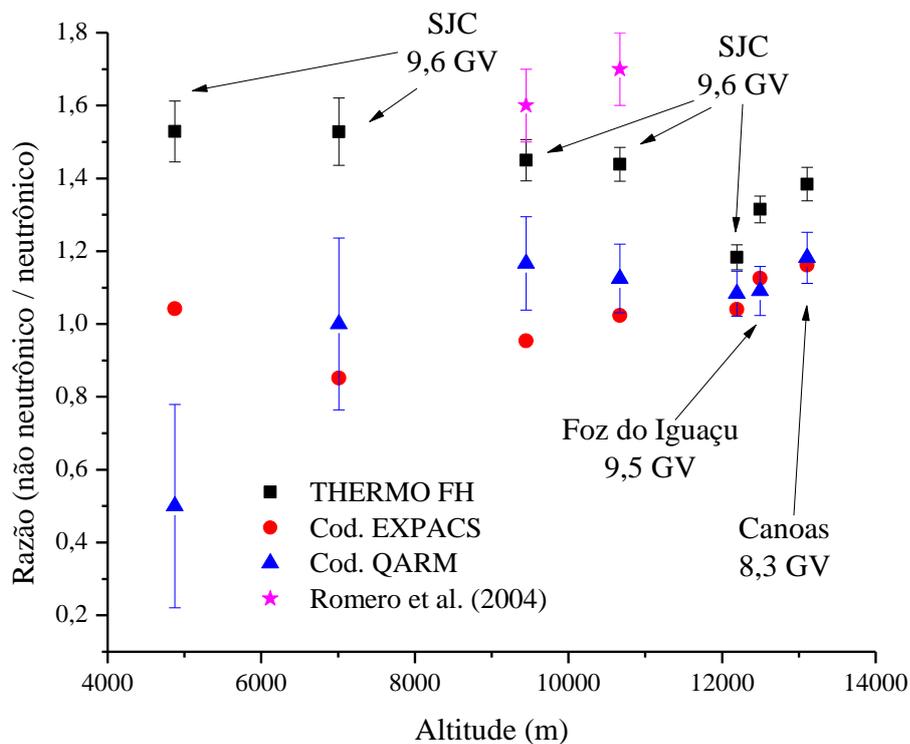


Figura 80 - Razão entre os componentes não neutrônico e neutrônico em função da altitude, para as medidas com o sistema THERMO FH, para as estimativas feitas com os códigos computacionais EXPACS e QARM e comparação com dados obtidos por Romero et al. (2004).

Com base nas medições obtidas nos ensaios em ponto fixo, que correspondem a uma série estatística de medidas (amostra) realizadas em campo nas mesmas condições, pode-se também avaliar a incerteza estatística típica relacionada ao processo de leitura com o sistema THERMO FH em voo, considerando que cada série de medidas obedece uma distribuição de probabilidades gaussianas. Dessa forma, pode-se estimar a incerteza estatística associada a uma única medição, como sendo igual ao desvio padrão da distribuição, conforme será mostrado mais adiante. Nas medições realizadas em ponto fixo observou-se que a incerteza estatística, expressa na forma de desvio padrão de cada amostra, varia com a taxa de equivalente de dose ambiente do campo de radiação que está sendo medido. Na Figura 81 é apresentado o resultado do desvio padrão das medições efetuadas em ponto fixo, onde se observa que a incerteza estatística é maior para menores

taxas de equivalente de dose ambiente e é diferente para cada componente do campo (neutrônico e não neutrônico). A partir dessas observações, para fins de interpolação, foi ajustada uma função empírica para cada componente do campo que representa a incerteza estatística típica, inerente à precisão do equipamento. Optou-se por uma polinomial de segunda ordem. Por meio dessas funções ajustadas, são estabelecidas *a priori* as incertezas a serem utilizadas como desvio-padrão nas medidas únicas que são realizadas ponto a ponto para os ensaios em rota que, por sua natureza, não permitem uma avaliação estatística direta da precisão das medições efetuadas como a que foi feita nos ensaios em ponto fixo, onde foi possível obter uma série de "n" medidas repetitivas na mesma condição de ensaio.

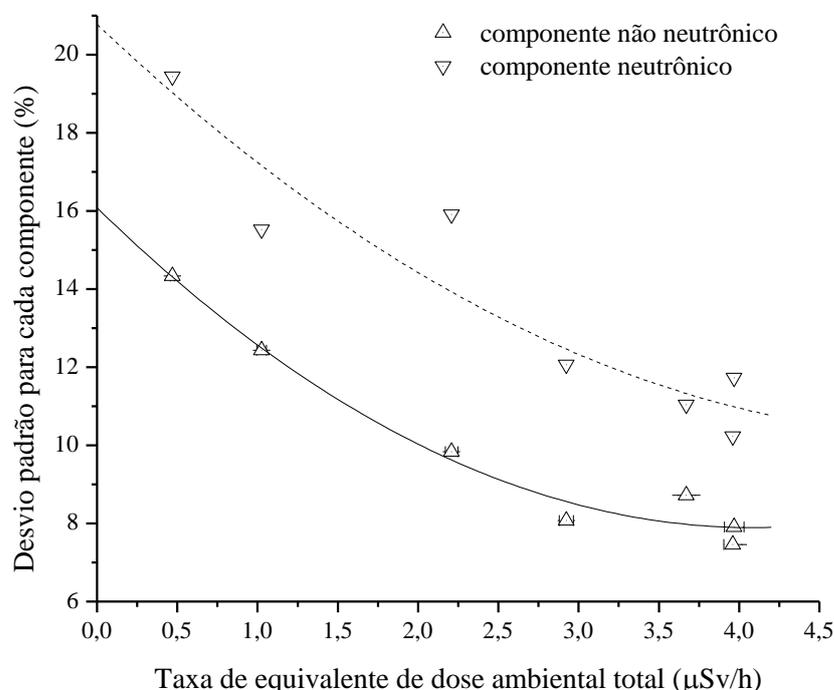


Figura 81 - Avaliação da imprecisão estatística do sistema THERMO FH para cada componente do campo, em função da taxa de equivalente de dose ambiente. As curvas ajustadas são polinomiais de segunda ordem que não possuem significado físico e servem apenas como guia visual para indicar o comportamento geral de cada componente no intervalo das taxas de equivalente de dose ambiente medidas.

As medições em rota são expressas em termos da dose acumulada durante o ensaio. Esta dose é obtida pela somatória dos produtos da taxa de equivalente de dose ambiente medida em cada ponto distinto da rota pelo intervalo de tempo de cada medida. Como as medidas foram realizadas em intervalos fixos de tempo ($\Delta t = 60$ segundos), a dose acumulada em rota (M_{soma}) será o produto deste intervalo de tempo pela somatória de todas as medidas de taxa de dose (M_i) indicadas no instrumento. A incerteza na dose

acumulada em rota (σ_{soma}) será obtida pela soma quadrática das incertezas nas "n" distintas taxas de equivalente de dose ambiente indicadas no instrumento (σ_i), multiplicada pelo fator comum (Δt):

$$\sigma_{soma} = \Delta t \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i)^2}, \quad (17)$$

O resultado final do equivalente de dose ambiente acumulado na rota é obtido pelo produto do equivalente de dose ambiente acumulado em rota " M_{comp} " (obtida a partir das indicações do instrumento) pelo fator de calibração do instrumento (F_C). A incerteza no resultado final do equivalente de dose ambiente acumulado em rota para cada componente do campo de RC em vôo ($\sigma_{componente}$) será:

$$\sigma_{componente} = M_{comp} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{soma}}{M_{soma}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{fc}}{f_c}\right)^2}, \quad (18)$$

O equivalente de dose ambiente total na rota considerada é dado pela soma do equivalente de dose ambiente devido à cada componente do campo (neutrônico e não neutrônico). A variância do equivalente de dose ambiente final é dada pela soma quadrática das incertezas de cada componente do campo, uma vez que estas grandezas são independentes.

Os ensaios em rota se aproximam mais da condição usual de medição na avaliação da dose em tripulações, estando sujeitos a grandes variações de rigidez de corte e também a mudanças de altitude, em função de determinações dos centros de controle de tráfego aéreo. Na Figura 82 é apresentada a rota realizada entre São José dos Campos (SP) e Recife (PE) e na Figura 83 é apresentada a rota efetuada para a realização dos ensaios 8 a 12, que abrangem ensaios de rota e ensaios em ponto fixo entre as cidades de São José dos Campos (SP), Foz do Iguaçu (PR) e Canoas (RS).



Figura 82 - Rota do ensaio realizado entre São José dos Campos (SP) e Recife (PE).



Figura 83 - Rota dos ensaios realizados entre São José dos Campos (SP), Foz do Iguaçu (PR) e Canoas (RS).

Nas Figuras 84 a 89 são apresentados os resultados do equivalente de dose ambiente acumulado nos ensaios 6, 7, 8, 10, 11 e 13, que correspondem a ensaios em rota, comparativamente com os códigos computacionais aplicáveis a esse tipo de avaliação. Não foi possível obter o resultado do código PCAIRE nos ensaios 10, 11 e 13, bem como do código AVIDOS no ensaio 11. O código EPCARD não foi utilizado nas análises de dose em rota devido a não possuir os aeroportos utilizados registrados em sua base de dados.

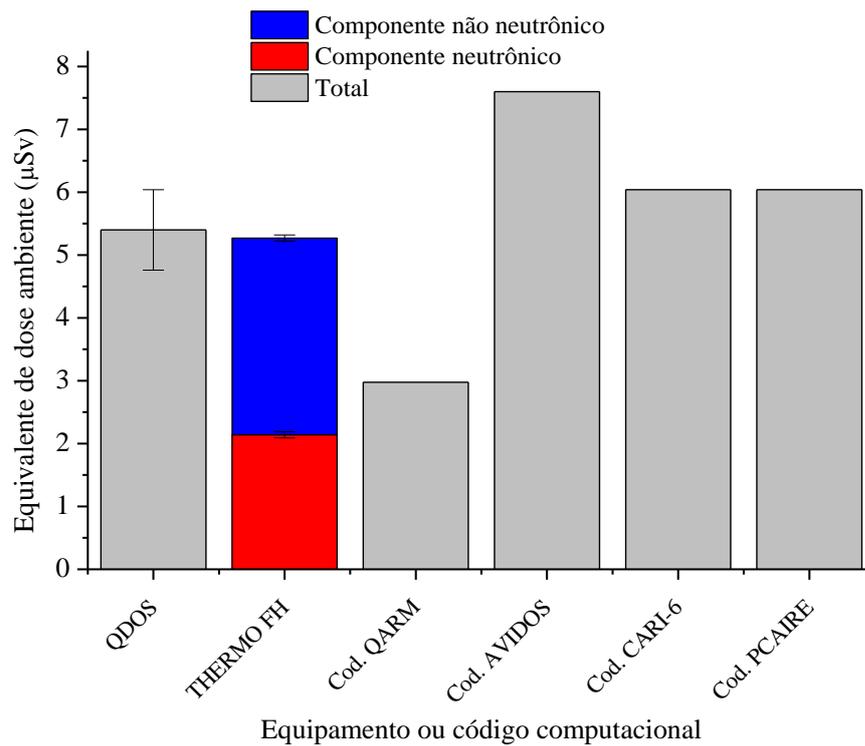


Figura 84 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota SJC-Recife (ensaio 6).

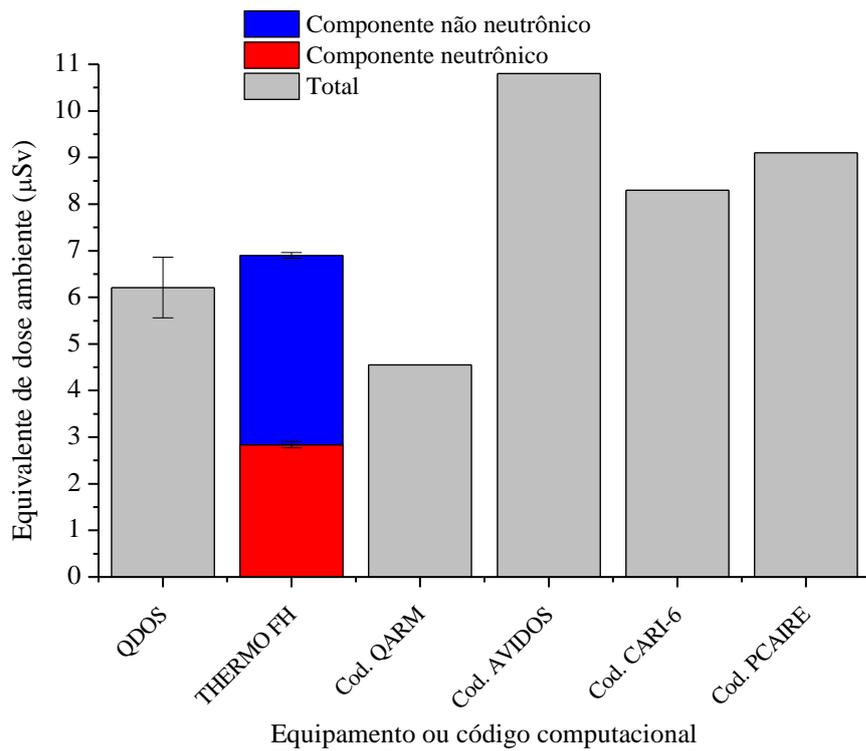


Figura 85 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota Recife-SJC (ensaio 7).

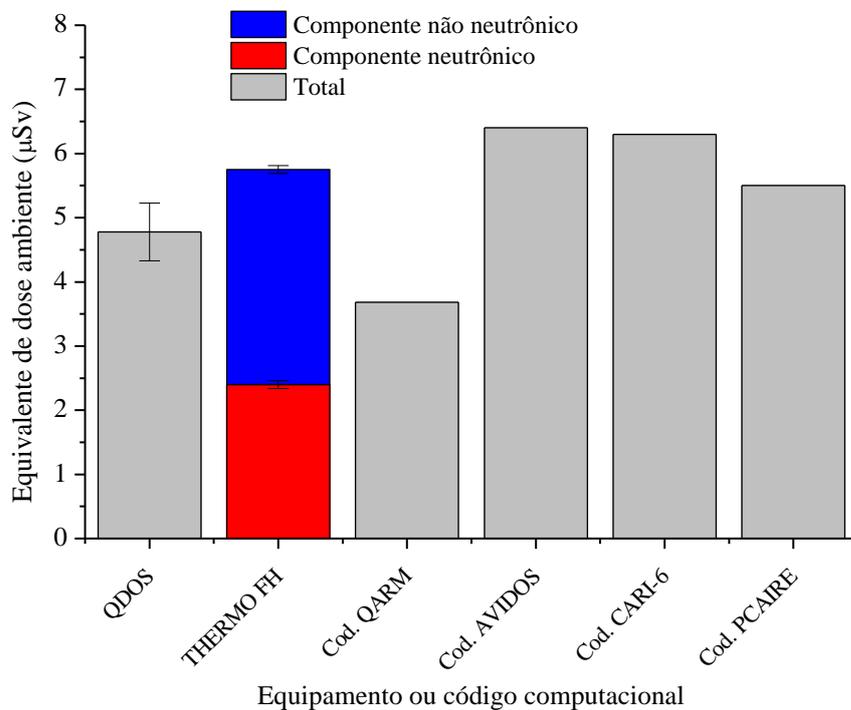


Figura 86 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota SJC-Foz do Iguaçu (ensaio 8).

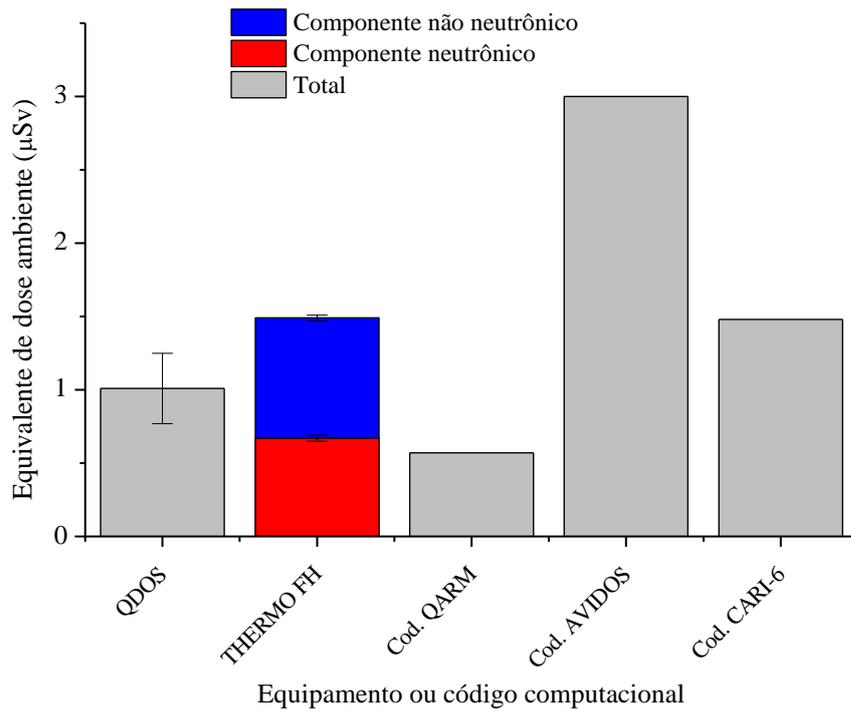


Figura 87 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota Foz do Iguaçu-Canoas (ensaio 10).

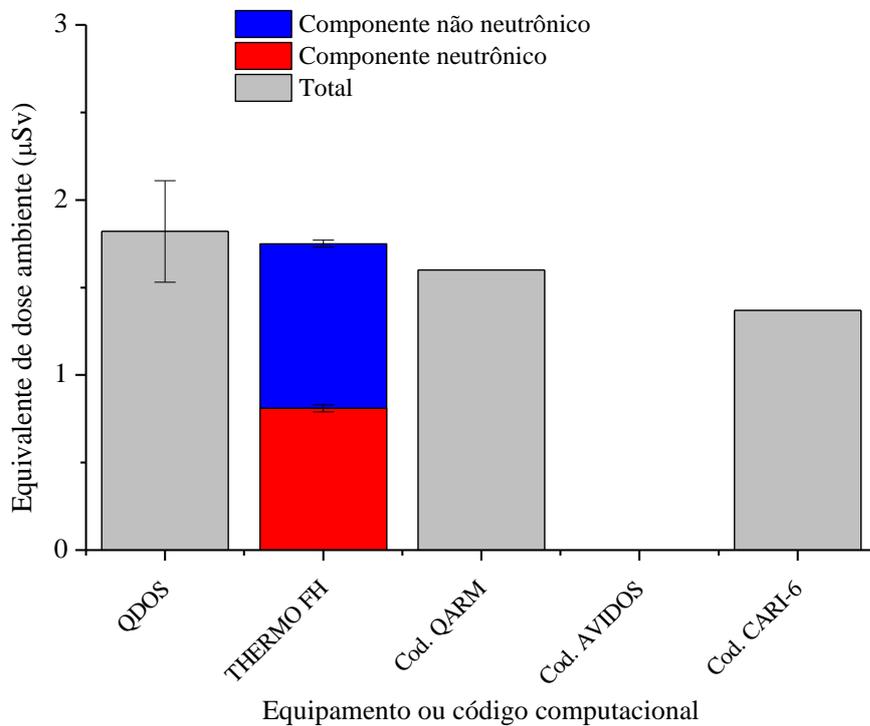


Figura 88 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota Canoas-ponto fixo de Canoas (ensaio 11).

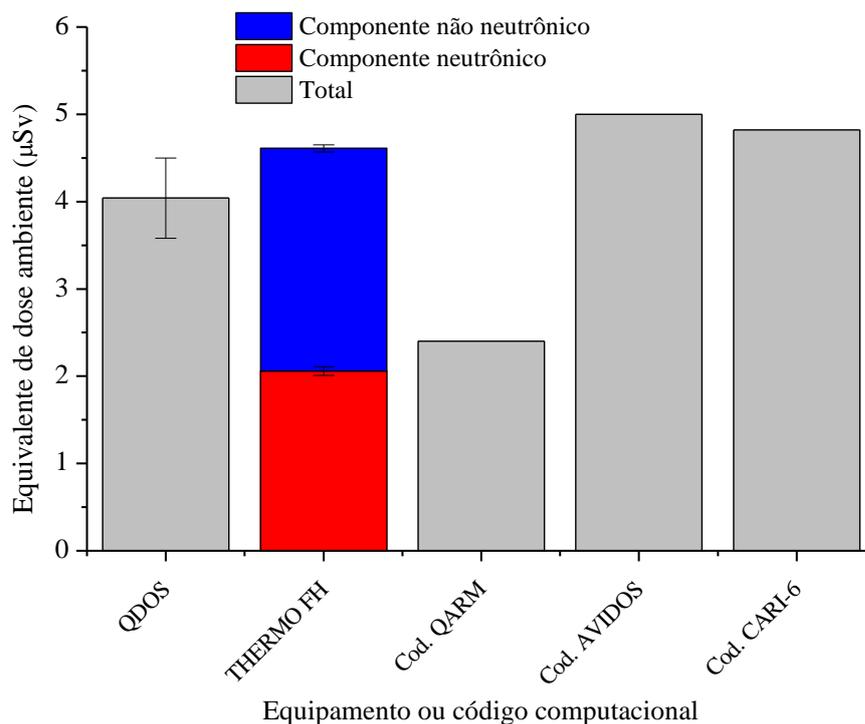


Figura 89 - Comparação entre os valores medidos e calculados para a rota ponto fixo de Canoas-SJC (ensaio 13).

Por meio do detector baseado em CR39, cedido pelo Instituto Politécnico de Milão, citado na seção 3.2.2, foi avaliado o componente neutrônico do equivalente de dose ambiente total acumulado durante as missões 6 e 7, resultando em $(4,10 \pm 0,98) \mu\text{Sv}$. Este valor está em conformidade, dentro do intervalo de confiança de 1 desvio padrão, com o valor obtido por meio do sistema THERMO FH para estas mesmas missões, que foi de $(4,98 \pm 0,07) \mu\text{Sv}$ (FEDERICO et al., 2011).

Nas Figuras 90 a 95 são apresentados os dados coletados pelo monitor THERMO FH nos ensaios em rota, juntamente com as informações de altitude, evidenciando os perfis de voo em cada ensaio e a correlação entre a taxa de equivalente de dose ambiente e a altitude.

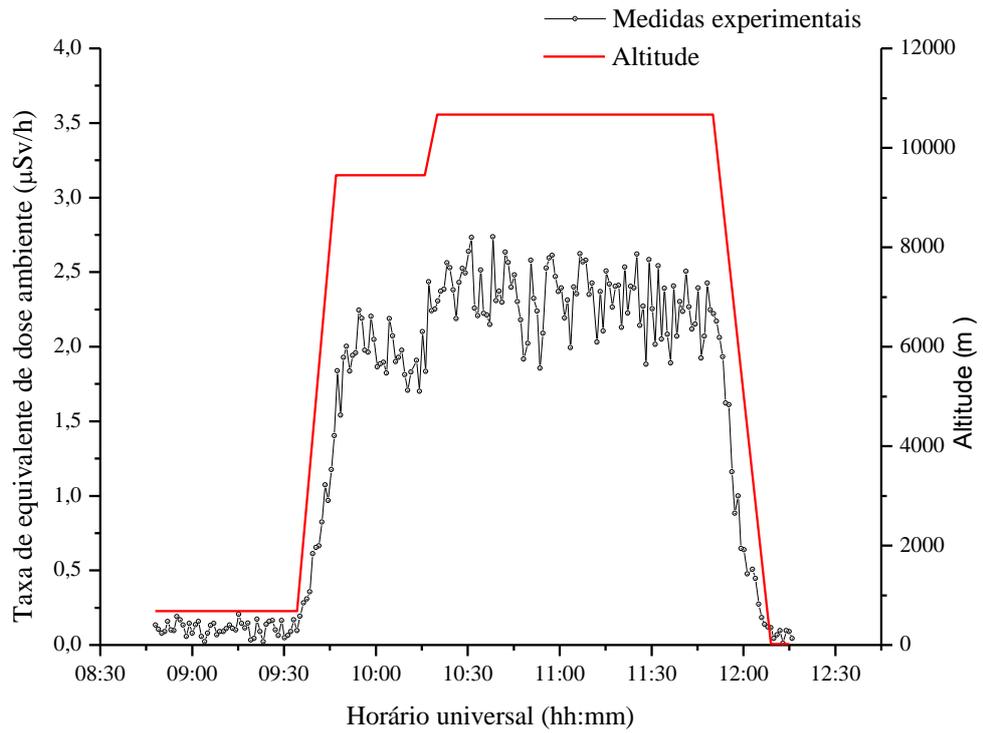


Figura 90 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 6.

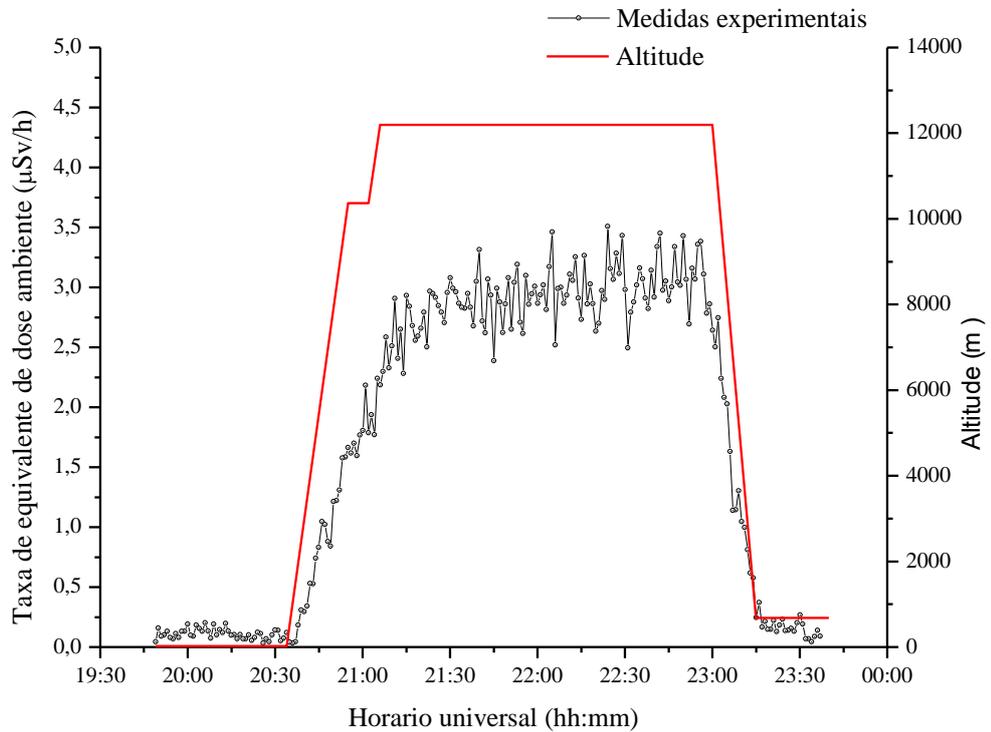


Figura 91 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 7.

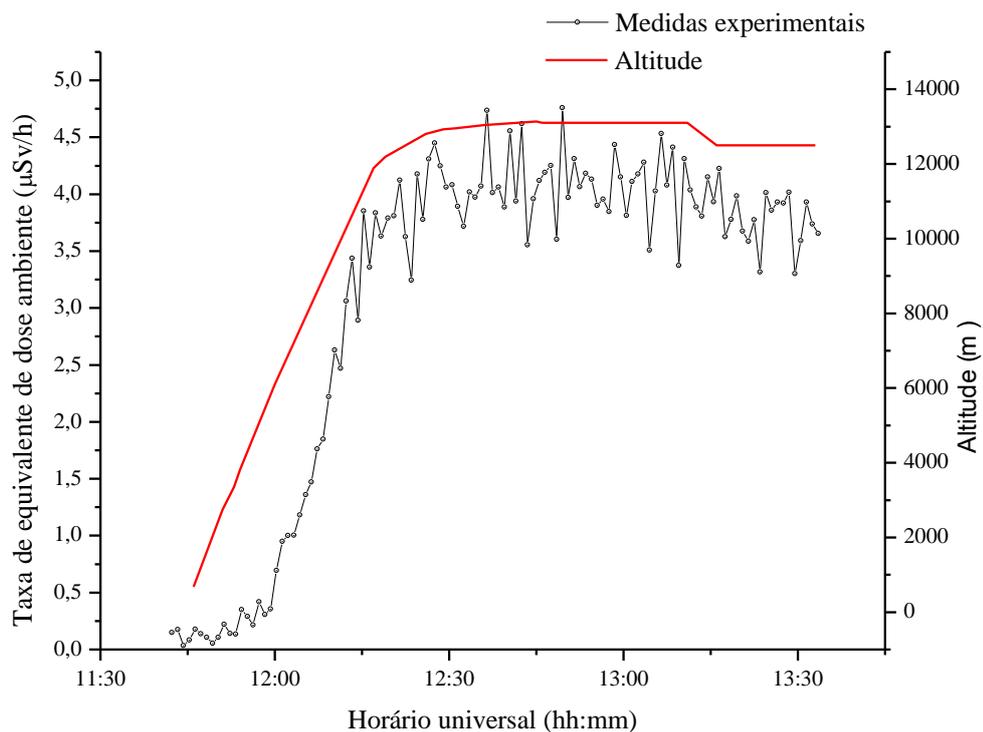


Figura 92 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 8.

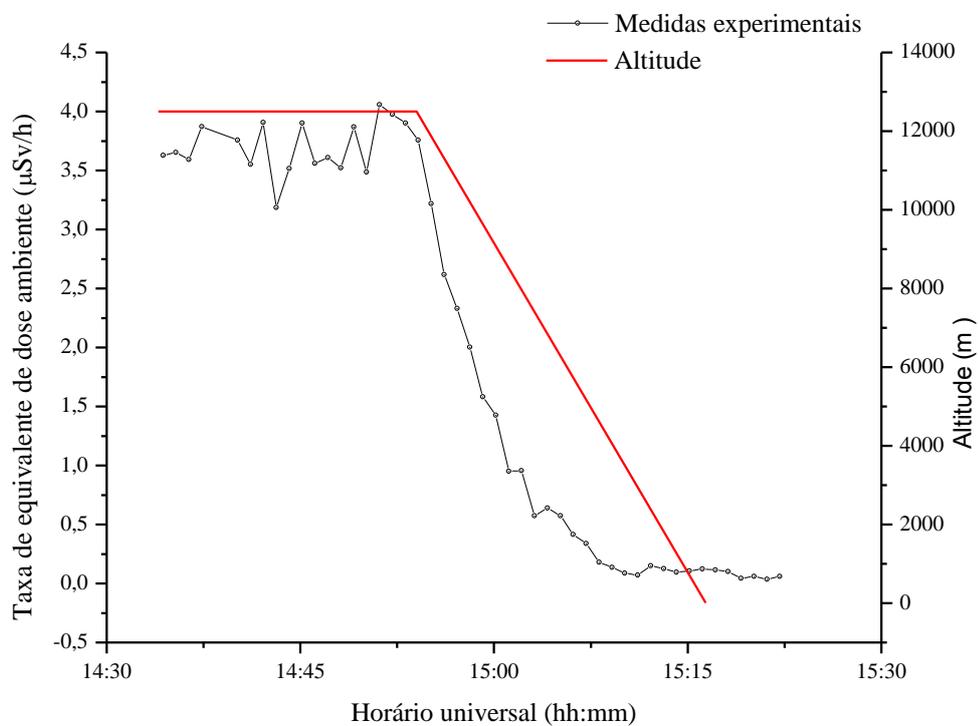


Figura 93 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 10.

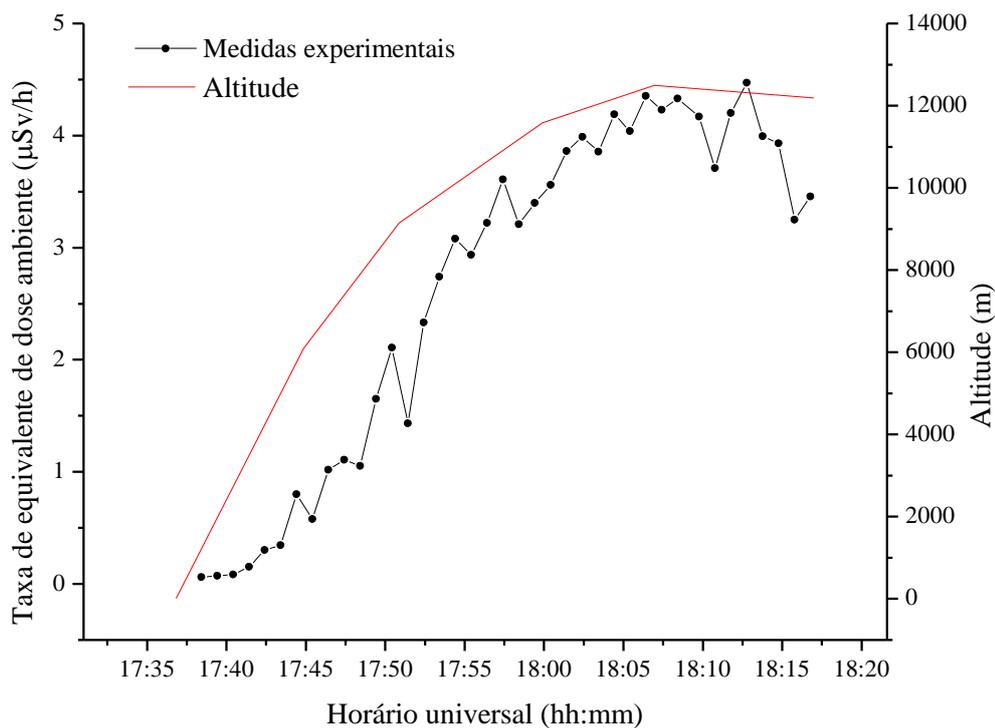


Figura 94 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 11.

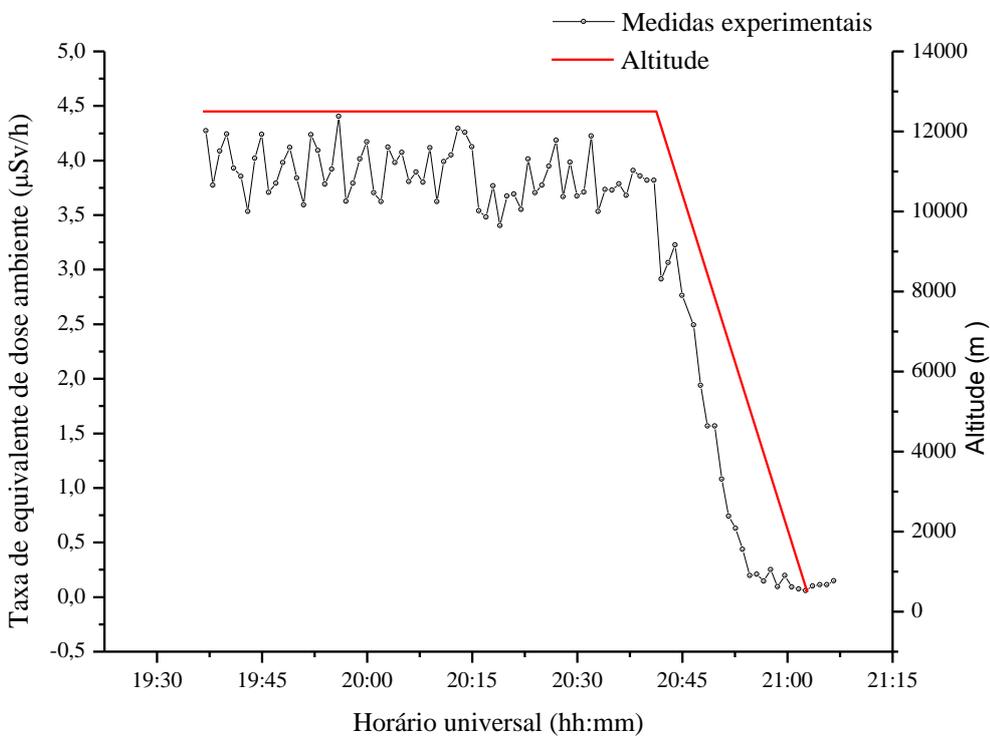


Figura 95 - Perfil da taxa de dose equivalente ambiente, medida pelo sistema THERMO FH, durante o ensaio de número 13.

4.8 Influência do posicionamento dentro da aeronave

Ferrari et al. (2005) citam atenuações de cerca de 8 % na dose efetiva em posições próximas aos compartimentos de combustível, para uma aeronave do tipo AIRBUS 340.

Para avaliar a possível influência de espalhamentos ou atenuações causadas por estruturas da aeronave nas medidas obtidas, foi efetuado um teste em voo, deslocando o sistema THERMO FH dentro da aeronave. A aeronave foi estabilizada em 12.192 m (40.000 pés) em uma órbita circular em torno de uma mesma coordenada (31,25 S; 50,75 O) e o detector foi fixado nas posições de 1 a 5, apresentadas na Figura 96, permanecendo cerca de 10 minutos em cada uma das posições.

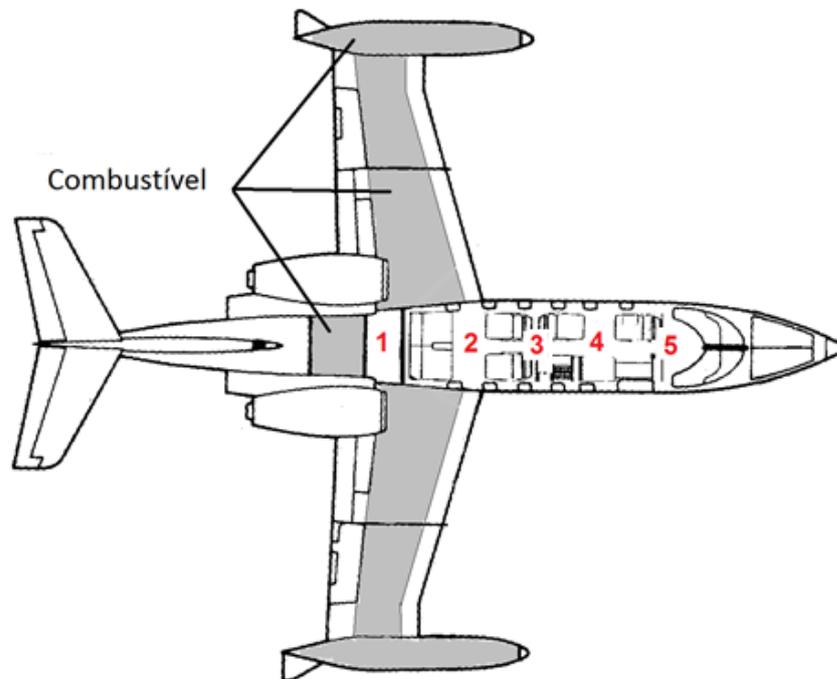


Figura 96 - Avaliação do efeito de estruturas da aeronave na taxa de dose.

Os resultados das medições em cada posição são apresentados na Figura 97 onde se pode observar uma diminuição do componente neutrônico nas posições próximas ao compartimento de combustível e um comportamento inverso para o componente não neutrônico. Esta diminuição do componente neutrônico pode ser explicada em termos da moderação e absorção de nêutrons da radiação cósmica pelos elementos químicos do combustível, que oferece uma blindagem parcial, uma vez que a radiação cósmica é suposta ser isotrópica. O aumento da componente ionizante próxima ao compartimento de combustível também pode ser explicado em termos da emissão de radiação gama por

processos de espalhamento e absorção neutrônica e, eventualmente, por prótons espalhados por partículas de energias altas.

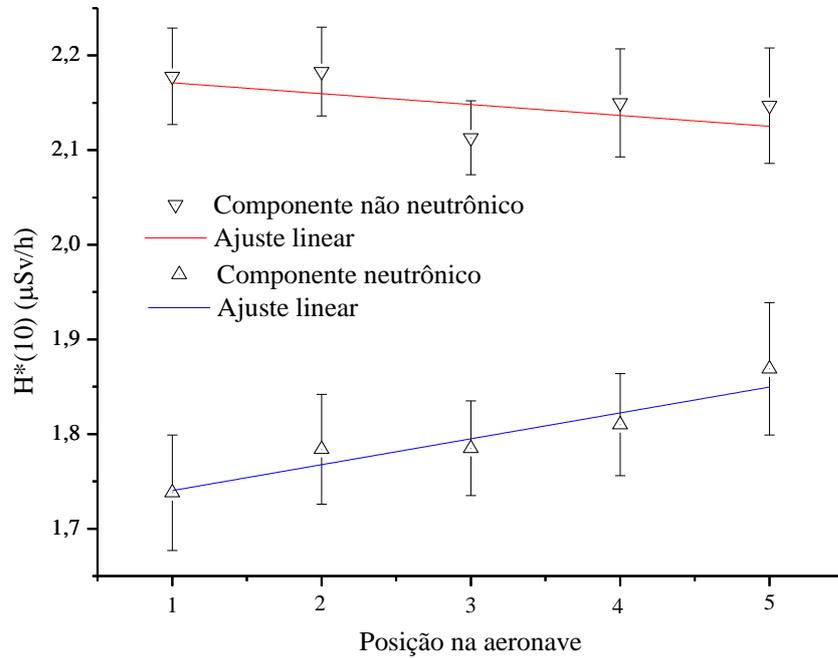


Figura 97 - Comportamento dos componentes neutrônico e não neutrônico em função da posição do sistema THERMO FH dentro da aeronave.

Apesar dos comportamentos observados em cada componente separadamente, a taxa de equivalente de dose ambiente total, resultado da soma do componente neutrônico e do componente não neutrônico, que pode ser observada na Figura 98, varia em torno do valor médio com um desvio padrão de cerca de 1 %, podendo, portanto, ser desprezado esse efeito nas comparações entre as medições de equivalente de dose ambiente total (nêutron + não nêutron) entre equipamentos colocados em diferentes posições dentro da aeronave.

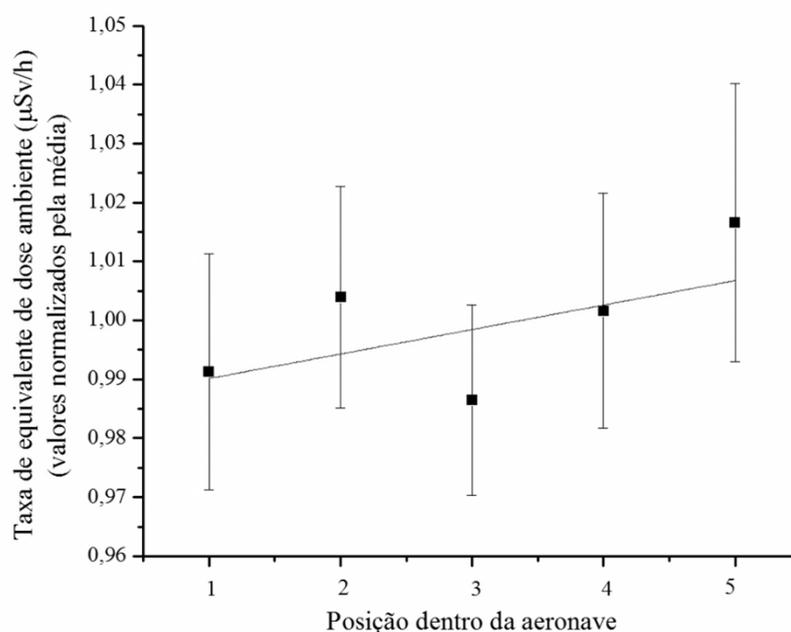


Figura 98 - Comportamento da taxa de equivalente de dose ambiente total em função da posição dentro da aeronave, com reta ajustada aos dados.

4.9 Estimativa do perfil de dose nas regiões da América do Sul e Caribe

Nesta seção são estimadas as doses típicas recebidas por tripulações que operam nas regiões da América do Sul e Caribe, baseadas nas distribuições estatísticas de taxa de dose efetiva neste espaço aéreo e nas distribuições de horas de voo. Para o cálculo dos valores de taxa de dose efetiva da amostra estatística foi utilizado o código computacional CARI-6, cuja adequabilidade para estimativas de dose foi demonstrada nas subseções anteriores.

4.9.1 Características da amostragem

O tráfego aéreo nas regiões do Caribe e América do Sul é controlado a partir de diversos centros de controle de tráfego aéreo que compõem a assim denominada região CAR/SAM. Os dados que compõem a amostra a ser utilizada para o cálculo da distribuição da taxa de dose são oriundos de registros dos voos realizados no espaço aéreo RVSM¹ nesta região no período de 07 a 20 de março de 2009, coletados pelos centros de controle de tráfego aéreo integrantes do espaço aéreo CAR/SAM (DIAS, 2011).

¹ O espaço aéreo RVSM (Mínimo de Separação Vertical Reduzido, do Inglês, *Reduced Vertical Separation Minimum*) é a parte do espaço aéreo superior que se estende a partir de 29.000 pés até 41.000 pés, cujo registro de voo é repassado aos centros de controle de tráfego aéreo.

Os registros originais avaliados neste trabalho englobam 53.163,4 h de voo, distribuídas em treze níveis de voo, variando de 29.000 pés (FL290) a 41.000 pés (FL410) e registradas separadamente por tramo¹ entre fixos de rota². Dos dados disponibilizados, foi possível localizar as coordenadas de somente 2.058 dos 2.203 fixos de rota registrados, de forma que foi possível contabilizar 3.098 de 3.331 tramos registrados, totalizando 93 % dos dados reais. A distribuição dos fixos de rota na região CAR/SAM, cujas coordenadas foram localizadas é apresentada na Figura 99.

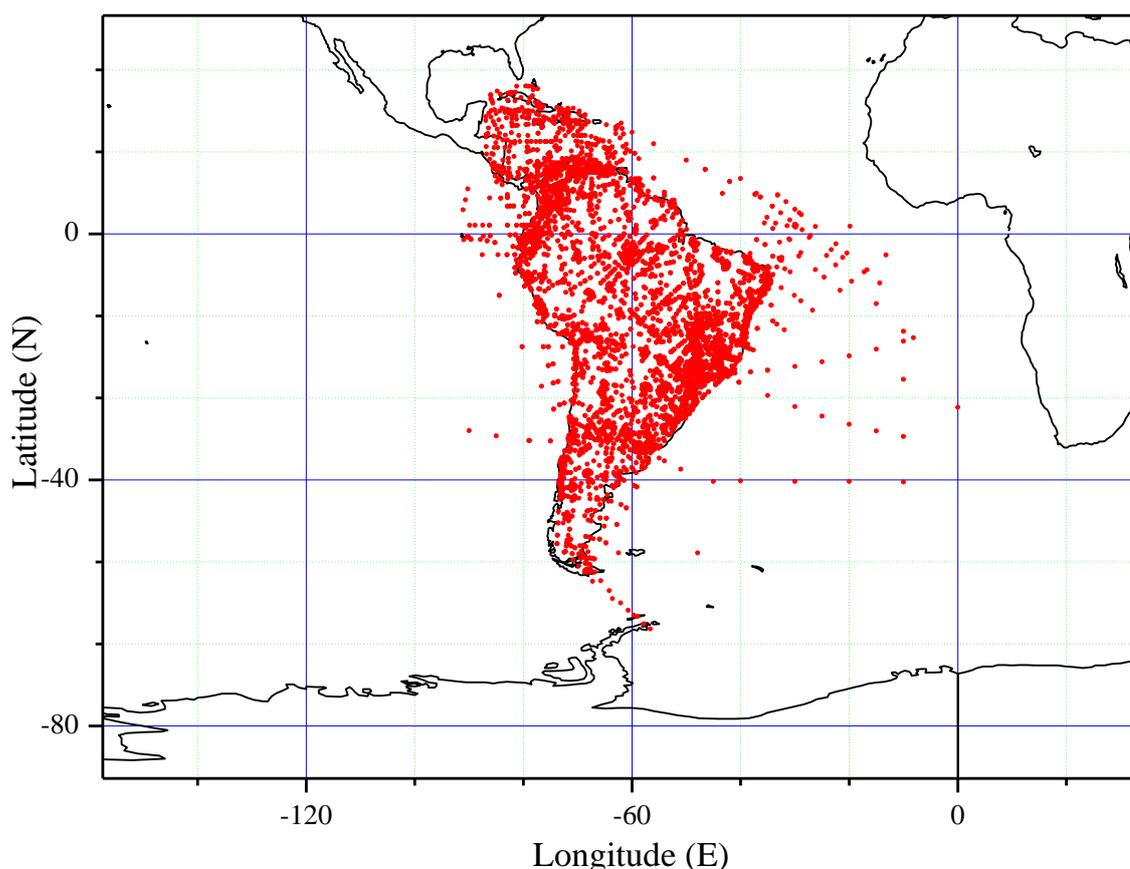


Figura 99 - Mapa dos fixos de rota localizados na região CAR/SAM.

Por meio do código computacional CARI-6 (EURADOS, 2004) foram efetuados os cálculos da dose efetiva recebida pelas tripulações das aeronaves em cada um dos tramos, para cada nível de voo, nas situações de máximo solar e de mínimo solar, totalizando 80.548 cálculos efetuados.

¹ A denominação tramo é dada a cada trecho de rota entre dois fixos de rota consecutivos.

² No meio aeronáutico são denominados fixos de rota aos pontos utilizados para navegação cujas coordenadas são fixas e estabelecidas nas cartas aeronáuticas, de forma que uma rota é composta da sequência de dois ou mais fixos de rota.

A opção de efetuar os cálculos para um máximo e um mínimo solar permite a avaliação das situações extremas onde a taxa de dose efetiva atinge o seu menor e o seu maior valor, respectivamente. Foi selecionado o potencial solar de 220 MV, ocorrido em outubro de 2009, como mínimo solar e como máximo solar foi selecionado o potencial solar de 1.376 MV, ocorrido em junho de 1990. Os valores médios mensais de máximo e mínimo solar foram obtidos da FAA (FAA, 2011a) e são apresentados na Figura 100.

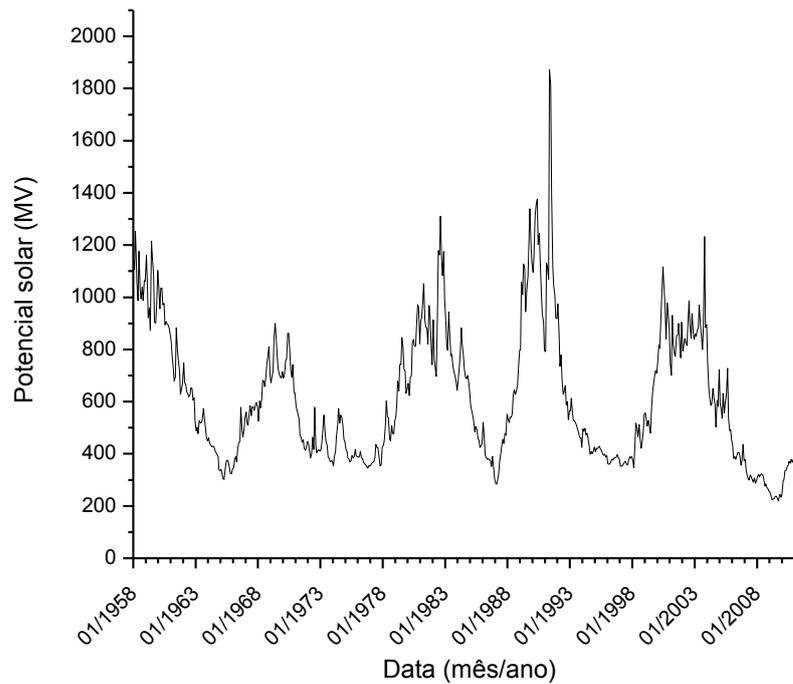


Figura 100 - Potencial solar mensal médio no período de janeiro de 1958 a março de 2011.

A distribuição global de horas de voo em função da altitude é apresentada no histograma da Figura 101, onde pode ser observado que o maior volume de tráfego dessa região do espaço aéreo situa-se nas altitudes em torno de 36.000 pés a 38.000 pés.

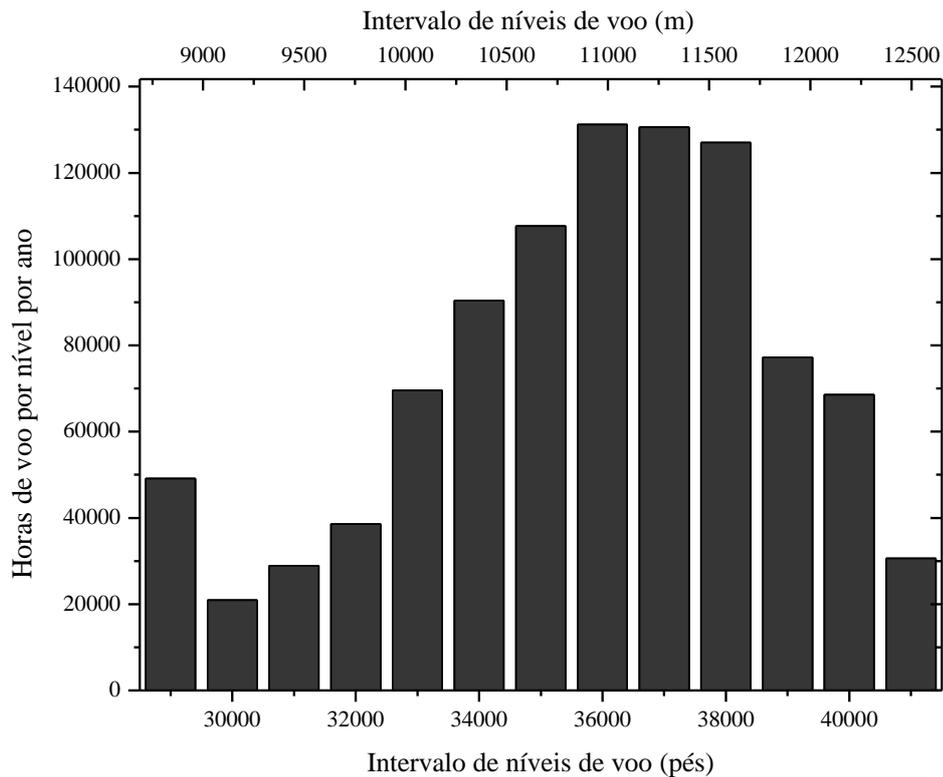


Figura 101 - Total de horas de voo por intervalo de altitude, para todo o tráfego aéreo da região CAR/SAM, projetada para o ano de 2009.

A amostra destinada ao cálculo da distribuição das horas de voo provém de dados relativos a tripulantes e respectivas horas de voo, obtidos da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2009) e englobam 4.717 pilotos e copilotos, que foram agrupados em 2.358 tripulações pertencentes a 23 diferentes empresas, cuja carga de trabalho está distribuída conforme apresentado em forma de histograma na Figura 102. Na mesma figura se observa que a maior parte das tripulações estão submetidas a cargas de trabalho entre 500 h e 600 h ao ano.

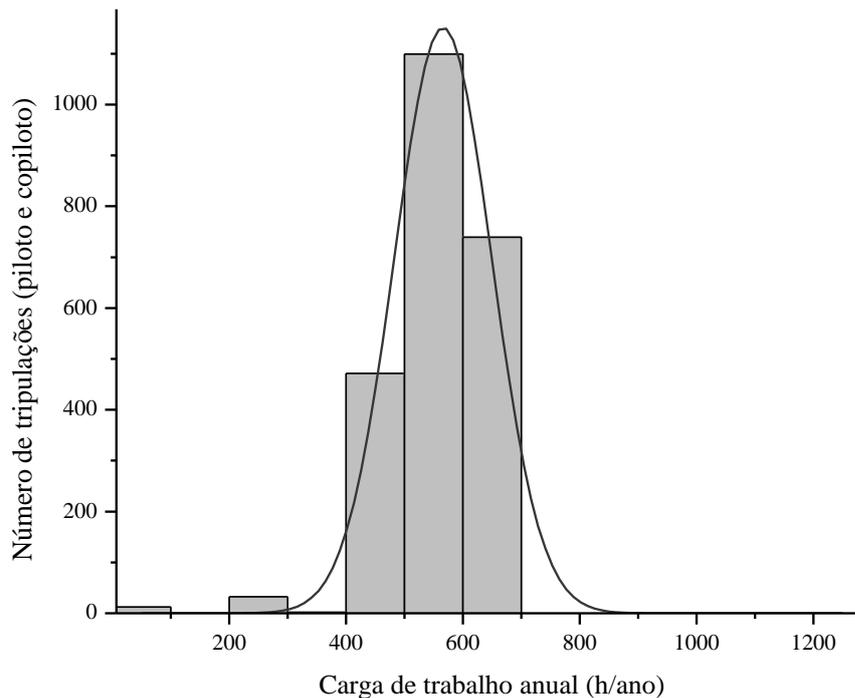


Figura 102 - Histograma de distribuição da carga de trabalho entre as tripulações de empresas brasileiras com gaussiana ajustada aos dados.

Aos dados da distribuição absoluta de frequências foi ajustada uma distribuição gaussiana do tipo:

$$f(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (19)$$

onde A é a área sob a curva (neste caso representa o número de tripulações), x_0 é o valor médio da carga de trabalho e σ_x^2 é a variância da distribuição. Os parâmetros ajustados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Parâmetros ajustados à distribuição da carga de trabalho.

Parâmetro	Valor	Incerteza	Unidade
Número de tripulações - A	2.407	88	tripulações
Carga de trabalho média - x_0	566,0	3,5	h/ano
Desvio padrão da distribuição - σ_x	83,4	3,4	h/ano

4.9.2 Avaliação da distribuição de dose na região CAR/SAM

Os dados originais, que são as taxas de dose para cada um dos 13 níveis de voo para cada tramo, foram reduzidos de forma a se obter a taxa de dose média em cada tramo de rota. O cálculo da dose média de cada tramo foi efetuado ponderando-se a taxa de dose

em cada nível do tramo pelo número de horas voadas no respectivo nível. Desta forma, os dados reduziram-se de 40.261 para 3.097 registros de taxa de dose média por tramo, para cada potencial solar.

Para a construção da distribuição de frequência da taxa de dose em todo o espaço aéreo coberto pela malha de tramos foi atribuído a cada tramo um fator de ponderação estatístico proporcional ao total de horas voadas no respectivo tramo. Então, a frequência relativa de cada tramo é:

$$f_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^{3097} h_i}, \quad (20)$$

onde h_i é o número de horas voadas no tramo "i".

A distribuição de frequências relativas das taxas de dose na malha de tramos investigada neste trabalho é apresentada nas Figuras 103 e 104 para as épocas de máximo e mínimo solar, respectivamente. A esta distribuição foi ajustada uma curva gaussiana normalizada:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (21)$$

onde y_0 é o valor médio da taxa de dose e σ_y^2 é a variância da distribuição.

Os valores destes parâmetros ajustados à distribuição de frequência da amostra são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Parâmetros ajustados à distribuição de frequências relativas das taxas de dose.

Época solar	Parâmetro	Valor ($\mu\text{Sv/h}$)	Incerteza ($\mu\text{Sv/h}$)
Máximo	y_0	2,554	0,009
	σ_y	0,241	0,005
Mínimo	y_0	2,946	0,013
	σ_y	0,321	0,010

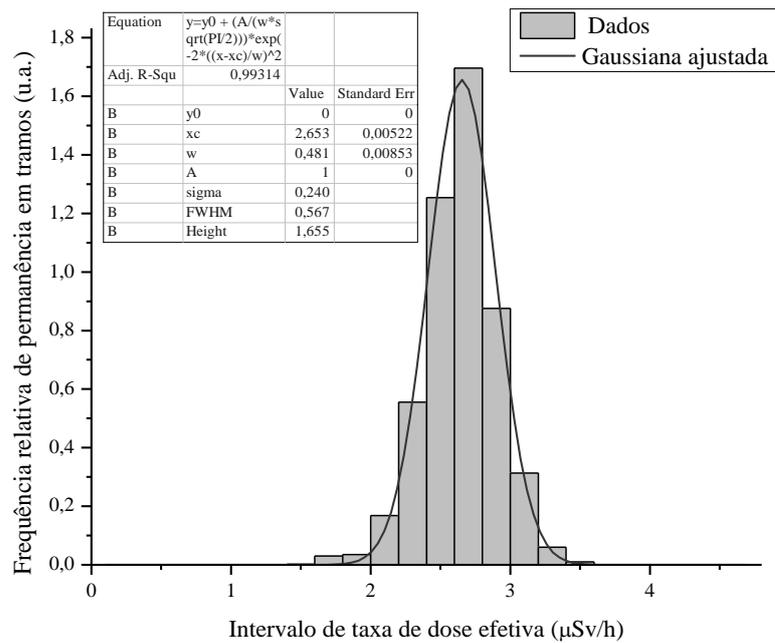


Figura 103 - Histograma da frequência relativa de permanência de aeronaves em tramos da região CAR/SAM em função da taxa de dose média, para época de máximo solar.

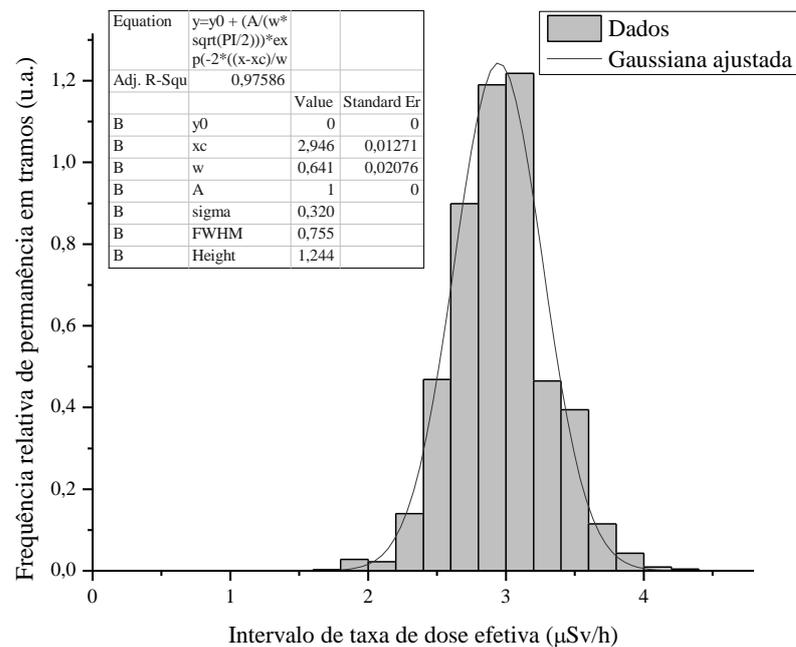


Figura 104 - Histograma da frequência relativa de permanência de aeronaves em tramos da região CAR/SAM em função da taxa de dose média, para época de mínimo solar.

Por meio das Figuras 103 e 104 observa-se que a média das taxas de dose incidentes nas aeronaves operando nesta região variam de 2,65 µSv/h a 2,95 µSv/h, para um máximo e um mínimo solar, respectivamente. Observa-se também que o desvio padrão

da distribuição aumenta de 0,24 $\mu\text{Sv/h}$ para 0,32 $\mu\text{Sv/h}$, efeito este resultante do aumento do diferencial de dose em decorrência da diminuição do potencial solar.

Nas Figuras 105 e 106 são apresentadas as taxas de dose média por tramo, ponderadas pelos tempos de permanência em cada nível do tramo, para as situações de máximo e mínimo solar, onde se pode observar que as regiões onde se obtém as maiores taxas de dose são as regiões do extremo Sul da América do Sul e a região do Caribe. Observa-se também, comparando as duas figuras, que a amplitude das taxas de dose aumenta do máximo para o mínimo solar.

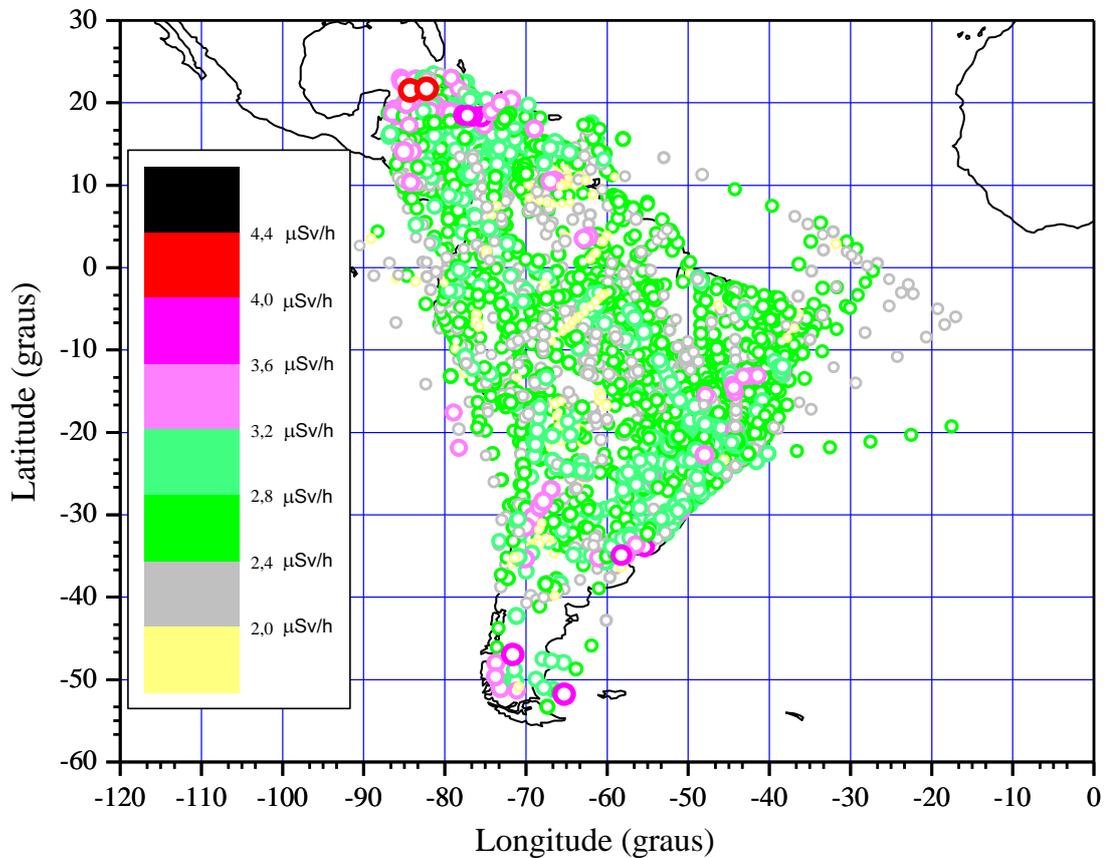


Figura 105 - Mapa da taxa de dose média em cada tramo, para o máximo solar de 1.376 MV.

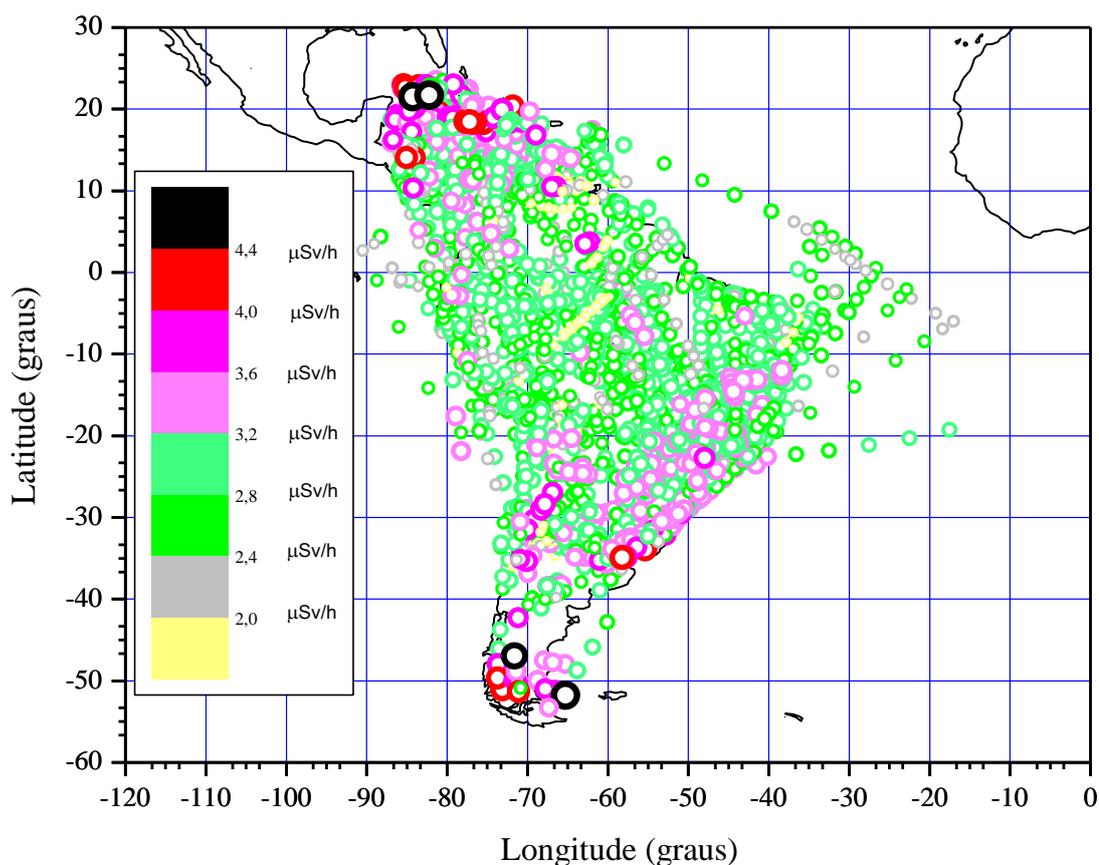


Figura 106 - Mapa da taxa de dose média em cada tramo, para o mínimo solar de 220 MV.

4.9.3 Distribuição de dose anual nas tripulações

Admitindo, por hipótese, que o grupo mais exposto das tripulações de empresas aéreas brasileiras têm sua rotina de voo concordante com a distribuição de voo observada na região CAR/SAM, pode-se inferir os cálculos a seguir.

A dose efetiva anual recebida por cada tripulação (z) corresponde ao produto do número de horas voadas no ano (x) pela taxa de dose efetiva (y):

$$z = x \cdot y . \quad (22)$$

Como estabelecido na subseção anterior, as variáveis x e y apresentam uma distribuição de probabilidade gaussiana, com médias x_0 e y_0 e desvios-padrão σ_x e σ_y . Além disso, x e y são grandezas independentes (não correlacionadas) de modo que a covariância entre elas é nula: $cov(x,y) = 0$ e o coeficiente de correlação $\rho = 0$. A distribuição normal padrão (média zero e variância unitária) correspondente é obtida fazendo-se a mudança de variáveis:

$$x' = \frac{x - x_0}{\sigma_x} \text{ e} \quad (23)$$

$$y' = \frac{y - y_0}{\sigma_y}. \quad (24)$$

A nova variável z' ($z = x'.y'$) terá uma distribuição de probabilidades $f(z')$, denominada produto normal, a qual, na forma normalizada (média nula e variância unitária) é dada por Craig (1936):

$$f(z') = \frac{1}{\pi} K_0(z'), \quad (25)$$

onde $K_0(z')$ é a função modificada de Bessel de segundo tipo e ordem zero.

A integral desta distribuição normalizada de probabilidades expressa na forma tabular permite calcular a probabilidade de um determinado valor da variável aleatória z' ser maior ou menor do que um determinado valor z_{crit} , ou seja:

a) A fração α da população que apresenta valores de z menores que z_{crit} :

$$\alpha = \int_{-\infty}^{z_{crit}} f(z') dz' \text{ e} \quad (26)$$

b) A fração da população que apresenta valores de z maiores que z_{crit}

$$\beta = 1 - \alpha, \quad (27)$$

A tabulação da integral da distribuição de probabilidades normalizada $f(z')$ por Meeker Jr. et al. (1981) é realizada para diversos pares de valores dos parâmetros das distribuições $f(x)$ e $f(y)$:

$$\rho_x = \frac{x_0}{\sigma_x} \text{ e} \quad (28)$$

$$\rho_y = \frac{y_0}{\sigma_y}. \quad (29)$$

Na Tabela 26 são apresentados os valores da integral da distribuição de probabilidades normalizada $f(z')$ para os valores de ρ_x e ρ_y correspondentes aos valores da média e desvio padrão das distribuições ajustadas à taxa de dose efetiva e tempo de voo do presente trabalho (Tabela 27), obtidos por interpolação linear às tabulações de Meeker Jr. et al. (1981).

Tabela 26 - Integral da distribuição de probabilidade produto normal em função do valor z_{crit} para valores específicos de ρ_x e ρ_y , obtida por interpolação dos valores tabelados por Meeker Jr. et al. (1981) e comparação com a distribuição normal.

Alfa	z_{crit} Distr produto normal		z_{crit} Distr normal	$P(z < z_{crit})$	$P(z > z_{crit})$
	$\rho_x = 6,79$ $\rho_y = 9,18^*$	$\rho_x = 6,79$ $\rho_y = 10,60^{**}$	$\rho_x \rightarrow \infty$ e $\rho_y \rightarrow \infty$	%	%
0,0005	-2,880468	-2,955099	-3,290510	0,05	99,95
0,0010	-2,730933	-2,795287	-3,090240	0,10	99,90
0,0025	-2,514988	-2,566137	-2,807030	0,25	99,75
0,0050	-2,334573	-2,376063	-2,575830	0,50	99,50
0,0075	-2,220710	-2,256702	-2,432380	0,75	99,25
0,0100	-2,135573	-2,167741	-2,326350	1,00	99,00
0,0175	-1,957901	-1,982825	-2,108360	1,75	98,25
0,0250	-1,835002	-1,855398	-1,959960	2,50	97,50
0,0375	-1,683791	-1,699337	-1,780460	3,75	96,25
0,0500	-1,567968	-1,580154	-1,644850	5,00	95,00
0,0750	-1,389807	-1,397461	-1,439530	7,50	92,50
0,1000	-1,250410	-1,255025	-1,281550	10,00	90,00
0,1500	-1,030092	-1,030736	-1,036430	15,00	85,00
0,2000	-0,851446	-0,849570	-0,841620	20,00	80,00
0,2500	-0,695662	-0,692055	-0,674490	25,00	75,00
0,3000	-0,553759	-0,548933	-0,524400	30,00	70,00
0,3500	-0,420561	-0,414885	-0,385320	35,00	65,00
0,4000	-0,292646	-0,286412	-0,253350	40,00	60,00
0,4500	-0,167476	-0,160923	-0,125660	45,00	55,00
0,5000	-0,042920	-0,036265	0,000000	50,00	50,00
0,5500	0,082999	0,089548	0,125660	55,00	45,00
0,6000	0,212346	0,218575	0,253350	60,00	40,00
0,6500	0,347519	0,496150	0,385320	65,00	35,00
0,7000	0,491294	0,496150	0,524400	70,00	30,00
0,7500	0,649006	0,652702	0,674490	75,00	25,00
0,8000	0,826598	0,828671	0,841620	80,00	20,00
0,8500	1,036701	1,036447	1,036430	85,00	15,00
0,9000	1,305814	1,301973	1,281550	90,00	10,00
0,9250	1,482082	1,475547	1,439530	92,50	7,50
0,9500	1,714475	1,703993	1,644850	95,00	5,00
0,9625	1,870028	1,856666	1,780460	96,25	3,75
0,9750	2,078449	2,060940	1,959960	97,50	2,50

Continua na próxima página.

Continuação da Tabela 26.

Alfa	z_{crit} Distr produto normal		z_{crit} Distr normal	$P(z < z_{crit})$	$P(z > z_{crit})$
	$\rho_x = 6,79$ $\rho_y = 9,18^*$	$\rho_x = 6,79$ $\rho_y = 10,60^{**}$	$\rho_x \rightarrow \infty$ e $\rho_y \rightarrow \infty$	%	%
0,9825	2,252918	2,231699	2,108360	98,25	1,75
0,9900	2,512795	2,485666	2,326350	99,00	1,00
0,9925	2,640740	2,610539	2,432380	99,25	0,75
0,9950	2,815445	2,780882	2,575830	99,50	0,50
0,9975	3,100920	3,058834	2,807030	99,75	0,25
0,9990	3,457153	3,405032	3,090240	99,90	0,10
0,9995	3,713472	3,653712	3,290510	99,95	0,05

* correspondente ao mínimo solar.

** correspondente ao máximo solar.

Para utilização desta tabela o valor de z_{crit} correspondente à variável normalizada z'_{crit} é:

$$z'_{crit} = \frac{z_{crit} - z_0}{\sigma_z} \quad (30)$$

Craig (1936) demonstrou que a média z_0 e o desvio-padrão σ_z da distribuição $f(z)$ são:

$$z_0 = x_0 y_0 \quad e \quad (31)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 x_0^2 + \sigma_y^2 y_0^2 + \sigma_x^2 \sigma_y^2}, \quad (32)$$

Os valores dos parâmetros das distribuições de probabilidades obtidas no presente trabalho são apresentados na Tabela 27.

Aroian (1947) mostrou que, para valores grandes de ρ_x e ρ_y ($\rho_x \rightarrow \infty$ e $\rho_y \rightarrow \infty$) a integral da distribuição produto normal tende à integral da distribuição normal. Para fins de comparação na Tabela 26 são também apresentados os valores de z_{crit} para a distribuição normal.

Tabela 27 - Parâmetros das distribuições de taxa de dose, número de horas de voo por ano e dose efetiva anual de tripulações de aeronaves no espaço aéreo brasileiro.

Parâmetro	Símbolo	Valor	
		Máximo solar	Mínimo solar
Valor médio de horas de voo por ano (h)	x_0	566	566
Desvio padrão da distribuição de horas de voo por ano (h)	σ_x	83,4	83,4
Valor médio da taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$)	y_0	2,554	2,946
Desvio padrão da distribuição de taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$)	σ_y	0,241	0,321
Razão entre a média e o desvio padrão da distribuição de horas de voo por ano	ρ_x	6,79	6,79
Razão entre a média e o desvio padrão da distribuição de taxa de dose	ρ_y	10,60	9,18
Valor médio da dose anual (μSv)	z_0	1.445,56	1.667,44
Desvio padrão da distribuição de dose anual (μSv)	σ_z	253,73	306,75

A partir da integral da distribuição de probabilidade produto normal $f(z)$ em função do valor z_{crit} (Tabela 26) pode-se calcular a fração de população de tripulações (pilotos, copilotos e demais tripulantes) que estão expostos a uma dose efetiva anual superior ao máximo admissível para indivíduos do público ($z = 1000 \mu\text{Sv} = 1\text{m Sv}$) e a dose anual máxima abaixo da qual 99,9 % desta tripulação estará exposta ($\alpha = 0,9990$).

Então, para $z_{crit} = 1000$, o valor normalizado de z_{crit} , de acordo com a Equação 26, é $z'_{crit} = -1,7560$ para a condição de máximo solar e $z'_{crit} = -2,1759$ para a situação de mínimo solar. Os valores interpolados de α obtidos a partir da Tabela 26 são: $\alpha = 0,0315$ para a situação de máximo solar e $\alpha = 0,0088$ para a situação de mínimo solar. Disto resulta, portanto, que entre 96,85 % e 99,12 % das tripulações estará sujeita a uma dose efetiva anual superior ao máximo admissível para indivíduos do público.

Por outro lado, tomando-se $\alpha = 0,9990$, de acordo com a Tabela 26, os valores de z'_{crit} correspondentes são: $z'_{crit} = 3,4050$ para a situação de máximo solar e $z'_{crit} = 3,4572$ para o mínimo solar. De acordo com a Equação 30, isto corresponde aos seguintes valores de dose efetiva anual: $z = 2.309,54 \mu\text{Sv}$ e $z = 2.727,90 \mu\text{Sv}$ para a situação de máximo e

mínimo solar, respectivamente. Isto significa que 99,9 % das tripulações estará exposta a uma dose efetiva anual máxima entre 2,31 mSv e 2,73 mSv. Lembrando que o máximo admissível para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOEs) é de 20 mSv, 99,9% das tripulações receberão doses abaixo de, aproximadamente, 15% do máximo admissível para IOEs.

Estes valores de dose efetiva anual estimados são também inferiores ao nível de registro recomendado pela ICRP (ICRP, 2007), que é de 5 mSv por ano, o que significa que estas doses devem ser registradas como dose nula de radiação. O efeito deletério na saúde das tripulações para estes níveis de dose efetiva não é considerado observável ou significativo, entretanto, fica claro que as tripulações sujeitas a estes valores de dose anual devem ser controladas, pois extrapolam os limites aplicáveis para público.

Atenção especial deve ser dada ao caso de tripulações gestantes, pois existe a possibilidade de elas superarem o limite de dose no feto, que é de 1 mSv, caso a dose, nestes casos, não seja devidamente controlada. A ocorrência esporádica de eventos solares também pode contribuir significativamente com a dose acumulada neste caso e deve ser considerada em um programa de controle de dose nas tripulações.

É importante observar que a hipótese adotada no início desta subseção implica que as frações calculadas se aplicam somente à região CAR/SAM. Mas parte das tripulações de empresas nacionais realiza voos internacionais que extrapolam a região CAR/SAM e, neste caso, podem estar sujeitas a taxas de dose efetiva superiores às encontradas nesta região, as quais podem chegar até cerca de 17 μ Sv/h em altas latitudes (SULLIVAN et al., 2002), implicando que os valores aqui apresentados são os limites inferiores àqueles que seriam obtidos em uma amostragem mais global.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando, nas medidas em voo, um monitor especialmente construído para responder às altas energias presentes no campo a ser medido, na grandeza de equivalente de dose ambiente, que é recomendada pela literatura como sendo a mais apropriada para este tipo de medição.

O referido equipamento foi calibrado com fontes convencionais de radiação em laboratórios nacionais metrologicamente rastreados. A resposta do equipamento com relação ao campo existente em altitudes de voo foi verificada por meio de testes em um campo especial do laboratório europeu CERN, denominado CERF, que representa aproximadamente o campo de radiação cósmica em altitudes de voo, obtendo-se o fator de calibração do equipamento para este tipo de campo.

Além disso, o sistema THERMO FH foi testado com relação à compatibilidade magnética e eletromagnética, mostrando que ele pode ser utilizado dentro da aeronave de ensaio sem sofrer nem causar interferência nos instrumentos da aeronave. Estes resultados qualificam o referido monitor para realizar medidas do equivalente de dose ambiente a bordo de aeronaves.

O instrumento foi comparado em ensaios em voo com o monitor QDos (*QINETIQ Labs.*), o qual foi desenvolvido e validado especificamente para medidas de equivalente de dose ambiente no interior de aeronaves. A compatibilidade entre as medidas mostrou que não houve alteração no desempenho do sistema THERMO FH em voo e que a dispersão das medições realizadas está dentro do intervalo de aceitação, de acordo com as referências internacionais.

Foram realizados ensaios em voo cobrindo grande parte do intervalo de latitude abrangido pelo território brasileiro, incluindo medições realizadas próximas ao ponto de mínimo do campo magnético terrestre, decorrente da influência da AMAS. Os resultados destas medições mostram consistência entre os resultados obtidos pelos diferentes equipamentos e também com as estimativas computacionais, comprovando a viabilidade de uso dos códigos computacionais de cálculo de dose, mesmo na região próxima ao centro da AMAS.

As medidas realizadas em ensaios em rota no espaço aéreo brasileiro indicaram os programas computacionais CARI-6, PCAIRE e AVIDOS como os que resultaram em estimativas de dose mais próximas aos valores medidos experimentalmente. Destes

programas, o CARI-6 foi selecionado para uso em rotina por suas características de portabilidade e possibilidade de uso para cálculos em lote.

Utilizando o programa CARI-6 foram calculadas as doses efetivas médias na malha de rotas existente na região da América do Sul e Caribe, sobre a qual todas as rotas do espaço aéreo brasileiro são traçadas. Os resultados destes cálculos, combinados com as estatísticas de horas de voo nos trechos desta malha e nos diversos níveis de voo, permitiram estimar a distribuição estatística de taxa de dose efetiva no espaço aéreo brasileiro como um todo.

Esta distribuição, combinada com a distribuição de horas anuais de voo para as tripulações das aeronaves das principais empresas brasileiras que operam nesta região, permitiu estimar a distribuição de dose efetiva anual esperada para as tripulações brasileiras.

Por meio de tais estimativas, obteve-se que a dose efetiva média recebida pela pessoa representativa do grupo mais exposto de tripulações que operam no espaço aéreo RVSM (altitudes entre 29.000 e 41.000 pés) na região da América do Sul e Caribe varia entre 1,45 mSv e 1,67 mSv, dependendo da fase do ciclo solar, e que de 96,85 % a 99,12 % destas tripulações ultrapassam o máximo admissível anual para indivíduos do público, que é de 1 mSv ao ano. Considerando a distribuição de probabilidades da dose anual para um máximo e um mínimo solar, estima-se que, 99,9 % das tripulações não ultrapassará as doses de 2,73 mSv a 2,31 mSv ao ano, o que corresponde a cerca de 13,7 % a 10,5 % do máximo permissível para trabalhadores. Este resultado indica que praticamente a totalidade do grupo exposto de aeronavegantes enquadra-se em uma condição de trabalho cuja dose efetiva anual é inferior a 3/10 da dose efetiva anual admissível para indivíduos ocupacionalmente expostos.

Além disso, foi proposto um sistema de dosímetros passivos para uso em aeronaves, baseado em pastilhas termoluminescentes, para as quais existe capacitação no país para processamento e leitura. As técnicas de processamento e leitura foram desenvolvidas e implementadas, com ênfase especial na otimização do sistema TL para a medição de campos de baixíssimas doses, com baixos limites inferiores de detecção. Os testes preliminares indicaram que o sistema pode ser utilizado para dosimetria de rotina a bordo de aeronaves, por períodos de tempo determinados, atendendo às recomendações da ICRP 103 no que se refere à verificação das estimativas das doses acumuladas efetuadas por meio de códigos computacionais. Entretanto, ele necessita de aperfeiçoamentos em

relação à sua portabilidade para adequá-lo aos requisitos das aeronaves comerciais, bem como necessita de novos testes no campo do CERF.

O desenvolvimento e a caracterização detalhada deste sistema como produto acabado necessitam do respaldo de simulação computacional em altas energias, bem como novas calibrações em campos específicos e transcendem o escopo do presente trabalho, ficando recomendados para trabalhos futuros. Este desenvolvimento depende da disponibilidade de campos de radiação de energias altas, que não existem no país, que podem ser encontrados no CERF (Suíça/França), no JAERI (Japão) ou no iThemba Labs (África do Sul), bem como da capacitação em simulações computacionais de radiações de energias altas nos programas computacionais MCNPX, GEANT, ou FLUKA.

Os dados concretos decorrentes de medições e estudos cientificamente embasados são de grande importância para avaliações objetivas e bem fundamentadas sobre o impacto na saúde ocupacional das tripulações de aeronaves de alto teto de voo e o respectivo impacto dos efeitos neste grupo e na saúde pública (população). Este trabalho mostrou, com base em medições e inferências estatísticas, que o grupo mais exposto das tripulações de aeronaves de empresas que operam na região da América do Sul e Caribe ultrapassa o máximo admissível para indivíduos do público e se enquadra na categoria de indivíduos ocupacionalmente expostos, provendo as autoridades normatizadoras e legisladoras com dados inéditos, que podem ser utilizados como balizamento para a tomada de decisões a respeito da radioproteção de tripulações.

Com base nos resultados do presente trabalho, sugere-se que as autoridades reguladoras nacionais iniciem ações imediatas do sentido de coletar e registrar dados reais de voo de empresas brasileiras, de forma que possa ser possível efetuar o cálculo preciso das doses nas tripulações brasileiras, individualizando as doses recebidas pelas tripulações, desde que os indicadores apresentados neste trabalho são de natureza estatística. Estes registros devem ser acompanhados com medições de taxa de dose e dose a bordo de aeronaves, por amostragem, nas principais rotas comerciais utilizando os monitores e códigos computacionais qualificados no presente trabalho para esta finalidade, conforme preconizado pela ICRP (ICRP, 2007).

6 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho é pioneiro no país neste assunto e explicita a necessidade de consolidar os conhecimentos na área de dosimetria da radiação de origem cósmica em voos de alto teto operacional, consolidando grupos de pesquisa no país e laboratórios para a qualificação e calibração de instrumentos apropriados para as medidas dosimétricas neste campo de radiação. Por ser pioneiro, não conseguiu esgotar todas as frentes de pesquisa que se mostraram necessárias para o completo conhecimento do assunto, identificando algumas vertentes de estudos e desenvolvimentos que devem ser implementados para a melhoria do conhecimento nessa área, listadas a seguir:

- a) Continuidade da avaliação dos efeitos da AMAS na taxa de dose em altitudes de voo, abrangendo situações de magnetosfera perturbada (índice Kp maior do que 5) e em eventos de partículas solares;
- b) Extensão dos estudos em aeronaves na região da AMAS por meio da espectrometria de LET das partículas da radiação cósmica incidentes nessa região, cuja aplicação poderá se estender à estimativa de danos de radiação em componentes e sistemas optoeletrônicos embarcados em aeronaves;
- c) Implantação no território brasileiro de instalações para o acompanhamento do clima espacial, em particular, uma estação de monitoramento contínuo do fluxo de nêutrons em solo integrada à rede mundial existente para a monitoração da atividade solar;
- d) Desenvolvimento da capacitação em simulação computacional no transporte de radiação de energias altas na atmosfera e em diversos meios para o cálculo dos efeitos de blindagem e espalhamento e da deposição de energia em materiais, no corpo de pessoas e em dosímetros e monitores;
- e) Desenvolvimento de um protótipo comercial de dosímetro para uso em aeronaves, por meio dos conhecimentos obtidos nesta tese e da capacitação citada no item anterior;
- f) Utilização dos dados levantados neste trabalho em conjunto com os dados de fluxo de passageiros, para estudos históricos e projeções de dose coletiva na população;
- g) Implementação de registros dosimétricos de voos e de tripulações e respectivos procedimentos de análise para fins de radioproteção, saúde e pesquisa científica;
- h) Elaboração de normas nacionais de radioproteção e dosimetria de tripulações que operam em voos de teto operacional alto.

Por fim, cabe ressaltar que a realização deste trabalho despertou o interesse de grupos e pesquisadores estrangeiros experientes nesta área, do QINETIQ *Laboratory* (Reino Unido) e do Instituto Politécnico de Milão (Itália), com os quais foram firmadas parcerias para a realização de medições em voo. Além disso, está em fase de implementação uma colaboração com pesquisadores franceses do Laboratório TIMA e da agência espacial francesa ONERA, que expressaram interesse em efetuar experimentos conjuntos na região da AMAS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTEO, S.; CARESANA, M.; FERRARINI, M.; SILARI, M. A dual-detector extended range rem-counter. **Radiat. Meas.** v. 45, pp. 1217-1219, 2010.
- AI ANID, H.; LEWIS, B. J.; BENNET, G. I.; TAKADA, M. Modelling of radiation exposure at high altitudes during solar storms. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 136, n. 4, pp. 311-316, 2009.
- ALVES, J. G.; MAIROS, J. C. In-flight dose estimates for aircraft crew and pregnant female crew members in military transport missions. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 125, n. 1-4, pp. 433-437, 2007.
- ANAC, AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Anuário do transporte aéreo - Dados estatísticos e econômicos**. ANAC. 2009. (Segunda edição, vol. único).
- AROIAN, L. A. The probability function of the product of two normally distributed variables. **Ann. of Math. Statist.**, v. 18, pp. 265-271, 1947.
- AVIDOS. Software package for European accredited aviation dosimetry. Código computacional on-line. Disponível em: <<http://avidos.ait.ac.at/avidos.asp>>. Acesso em 23 de abril de 2011.
- BARTLETT, D. T. Radiation Protection Concepts and Quantities for the Occupational Exposure to Cosmic Radiation. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 86, n. 4, pp. 263-268, 1999.
- BARTLETT, D. T. Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 109, n. 4, pp. 349-355, 2004.
- BECK, P.; BARTLETT, D.; LINDBORG, L.; MCAULAY, I.; SCHNUER, K.; SHRAUBE, H.; SPURNY, F. Aircraft crew radiation workplaces: comparison of measured and calculated ambient dose equivalent rate data using EURADOS in-flight radiation data base. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 118, n. 2, pp. 182-189, 2006.
- BOTTOLLIER-DEPOIS, J. F.; BLANCHARD, P.; CLAIRAND, I.; DESSARPS, P.; FULLER, N.; LANTOS, P.; SAINT-LÔ, D.; TROMPIER, F. An operational approach for aircraft crew dosimetry: the sievert system. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 125, n. 1-4, pp. 421-424, 2007.
- BRUM, C. G. M., *Variabilidade da absorção de ruído cósmico via riômetro e modelagem numérica dos processos associados*. 2004. Tese (doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- CARESANA, M.; AGOSTEO, S.; CAMPI, F.; FERRARINI, M.; PORTA, A.; SILARI, M. Sensitivity study of CR39 track detector in an extended range Bonner sphere spectrometer. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 126, n. 1-4, pp. 310-313, 2007.
- CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*. 2005. (Norma CNEN NN 3.01).
- COSTA, A. M.; MENDES JUNIOR, O. Anomalia magnética do Atlântico sul e a radiação cósmica sobre a costa do Brasil. **Sci. American – Brasil**, ano 2, n. 23, 2004.
- COSTA, J. M. *Particle precipitation and atmospheric x and gama rays in the south atlantic magnetic anomaly by balloon experiments*. Instituto de Pesquisas Espaciais, Report INPE-2119-RPE/343, São José dos Campos, 1981.
- COURADES, J. M. European legislation on protection against cosmic radiation. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 86, n. 4, pp. 7-24, 1999.
- CRAIG, C. C. On the frequency function of xy. **Ann. Math. Statist.**, v. 7, pp. 1-15, 1936.
- CURZIO, G.; GRILLMAIER, R. E.; O'SULLIVAN, E.; PELLICIONI, M.; PIERMATTEI, S.; TOMMASINO, L. The Italian National Survey of Aircrew Exposure: I. Characterization of Advanced Instrumentation. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 93, n. 2, pp. 115-123, 2001.

- DIAS, A. F. [mensagem pessoal]. Dados recebidos por meio eletrônico por <claudiofederico@ieav.cta.br> em 03 de março de 2011.
- DIETZE, G. Implications of the new ICRP recommendations for aircrew dosimetry. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 136, n. 4, pp. 240-243, 2009.
- DORMAN, L.I., *Cosmic rays in the earth's atmosphere and underground*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- DYER, C.; LEI F. Monte-Carlo Calculations of the Influence on Aircraft Radiation Environments of Structures and Solar Particle Events. In: NUCLEAR AND SPACE RADIATION EFFECTS CONFERENCE, julho 16-20, 2001, Vancouver, Canada. *Proceedings...*, Vancouver: 2001.
- DYER, C. Space Weather Effects on Spacecraft and Aircraft. In: Space Weather Workshop: Looking towards a European Space Weather Programme, december 17-19, 2001, Noordwijk, Holanda. *Proceedings...* Holanda: 2001.
- DYER, C.; HANDS, A.; LEI, F.; TRUSCOTT, P.; RYDEN, K.; MORRIS, P.; GETLEY, I.; BENNETT, L.; BENNETT, B.; LEWIS, B. Advances in Measuring & Modelling the Atmospheric Radiation Environment. **IEEE Trans. Nucl. Sc.**, v. 56, n. 6, 2009.
- EPCARD. European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses. Código computacional on-line. Disponível em: <<http://www.helmholtz-muenchen.de/en/epcard-portal/epcard-home/index.html>>. Acesso em 27 de abril de 2011.
- EURADOS. EUROPEAN RADIATION DOSIMETRY GROUP. *Cosmic radiation exposure of aircraft crew*. 2004. (Radiation Protection 140, Final Report of EURADOS Work Group 5).
- FAA, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Radiation Exposure of Air Carrier Crewmembers**. U.S. Department of Transportation. 1990. (FAA Advisory Circular n. 120-52).
- FAA, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Galactic Cosmic Radiation Exposure of Pregnant Aircrew Members II - Final Report**. U.S. Department of Transportation. 2000. (FAA Report DOT/FAA/AM-00/33).
- FAA, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **In-flight radiation exposure**. U.S. Department of Transportation. 2006. (FAA Advisory Circular n. 120-61A).
- FAA. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Tabela histórica de potenciais heliocêntricos. Disponível em: <http://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/heliocentric/>. Acesso em 13 de julho de 2011a.
- FAA. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <claudiofederico@ieav.cta.br> em 15 de agosto de 2011b.
- FCC. Federal Communications Commission. **FCC Rules and Regulations**, Part 15. Washington DC, FCC, 2003
- FEDERICO, C. A.; OLIVEIRA, W. A.; PEREIRA, M. A.; GONÇALEZ, O. L. Avaliação da resposta de um monitor do tipo "Long-Counter" para nêutrons do ²⁴¹Am/Be. **J. Aerosp. Tech. Man.**, v. 1, n. 2, pp. 243-246, 2009.
- FEDERICO, C. A.; PEREIRA, H. H. C.; PEREIRA, M. A.; GONÇALEZ, O. L.; CALDAS, L. V. E. Estimates of cosmic radiation dose received by aircrew of DCTA's flight test special group. **J. Aerosp. Tech. Man.**, v. 2, n. 2, pp. 137-144, 2010a.
- FEDERICO, C. A.; GONÇALEZ, O. L.; FONSECA, E. S.; MARTIN, I. M.; CALDAS, L. V. E. Neutron spectra measurements in the South Atlantic Anomaly region. **Radiat. Meas.**, v. 45, pp. 1526-1528, 2010b.
- FEDERICO, C. A.; GONÇALEZ, O. L.; DYER, C.; HANDS, A.; CARESANA, M.; PEREIRA, M. A.; PEREIRA, H. H. C.; PAZIANOTTO; CALDAS, L. V. E. Onboard

- measurements of cosmic-ray induced dose on aircraft in brazilian airspace. Submetido para: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC 2011, outubro 24-28, 2011, Belo Horizonte, Brasil. *Proceedings...*, Belo Horizonte: 2011.
- FERRARI, A.; PELLICIONI, M.; PILLON, M. Fluence to effective dose conversion coefficients for neutrons up to 100 TeV. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 71, n. 3, pp. 165–173, 1997.
- FERRARI, A.; PELLICIONI, M.; RANCATI, T. Calculation of the radiation environment caused by galactic cosmic rays for determining air crew exposure. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 93, n. 2, pp. 101–114, 2001.
- FERRARI, A.; PELLICIONI, M.; VILLARI, R. Evaluation of the Influence of Aircraft Shielding on the Aircrew Exposure Through an Aircraft Mathematical Model. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 108, n. 2, pp. 101–105, 2004.
- FERRARI, A.; PELLICIONI, M.; VILLARI, R. A Mathematical Model of Aircraft for Evaluating the Effects of Shielding Structure on Aircrew Exposure. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 116, n. 1-4, pp. 331-335, 2005.
- FURETTA, C.; WENG, P. *Operational thermoluminescence dosimetry*. Singapore: World Scientific Publishing Co. 1998.
- GFZ. Deutsches GeoForschungsZentrum. Tabelas históricas de índices geomagnéticos. Disponível em: <<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/tab/>>. Acesso em 12 de março de 2011.
- GOLDHAGEN, P.; REGINATTO, M.; KNISS, T.; WILSON, J.W.; SINGLETERRY, R.C.; JONES, I.W.; VAN STEVENINCK, W. Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons aboard an ER-2 high-altitude airplane. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A**, v. 476, pp. 42-51, 2002.
- HAJEK, M; BERGER, T; VANA, N. A TLD-based personal dosimeter system for aircrew monitoring. **Radiat. Prot. Dosim**, v. 110, n. 1-4, pp. 337-341, 2004.
- HANDS, A.; DYER, C. A. Technique for Measuring Dose Equivalent and Neutron Fluxes in Radiation Environments using Silicon Diodes. **IEEE Transac. Nuc. Sci.**, v. 56, n. 6, 2009.
- HARTMANN, G. A. *A Anomalia Magnética do Atlântico Sul: Causas e Efeitos*. 2005. Dissertação (mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- HEINRICH, W.; ROESLER, S.; SCHRAUBE H., Physics of cosmic radiation fields. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 86, n. 4, pp. 253-258, 1999.
- HOLMESS-SIEDLE, A.; ADAMS, L. *Handbook of Radiation Effects*. Segunda edição. Oxford University Press. 2002.
- IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Calibration of radiation protection monitoring instruments*. 2000. (Safety Report Series n.16).
- IAEA. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear data services. Banco de dados de seções de choque. Disponível em: <<http://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>>. Acesso em 15 de março de 2011.
- ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the international commission on radiological protection. Publication 60. **Annals of the ICRP**, v. 21, n. 1-3, 1991.
- ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. Publication 74. **Annals of the ICRP**, v. 26, n. 3, 1997.
- ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. General principles for the radiation protection of workers. Publication 75. **Annals of the ICRP**, v. 27, n. 1, 1998.

- ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. Publication 103, **Annals of the ICRP**, v. 37, n. 2-4, 2007.
- ICRU. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew. ICRU Report 84, **J. ICRU**, v. 10, n. 2, 2010.
- IGRF. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEOMAGNETISM AND AERONOMY, WORKING GROUP V-MOD. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. **Geophys. J. Int.**, Vol 183, Issue 3, pp. 1216-1230, December 2010. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x, 2010.
- IPEV. INSTITUTO DE PESQUISAS E ENSAIOS EM VOO. **Medidas de Radiação Cósmica em Aeronaves**. Relatório de ensaio GEEV-100416-RV-5510-6. 2011.
- ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircrafts - Part 1: conceptual basis for measurements**. 2006. (ISO 20785-1).
- JAA. JOINT AVIATION AUTHORITIES. **Cosmic radiation**. Joint Aviation Requirements, Operational Procedure Standards 1390, amendment 3. 2001. (JAR-OPS-1390).
- KOWATARI, M.; NAGAOKA, K.; SATOH, S.; OHTA, Y.; ABUKAWA, J.; TACHIMORI, S.; NAKAMURA, T. Evaluation of the altitude variation of the cosmic-ray induced environmental neutrons in the Mt. Fuji area. **J. Nuc. Sci. Tech.**, v. 42, n. 6, pp. 495-502, 2005.
- LATOCHA, M.; BECK, P.; ROLLET, S. AVIDOS - A software package for european accredited aviation dosimetry. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 136, n. 4, pp. 286-290, 2009.
- LAURIENTE, M.; VAMPOLA, A.L.; GOSIER, K. Experimental validation of south Atlantic anomaly motion using a two-dimensional cross-relation technique. In: **Workshop of Radiation Belts: Models and Standards**. Belgian Institute for Space Aeronomy, october, 1995, Brussels, Belgium.
- LEMOS Jr., R. M., **Medidas de Espectros de Referência de Nêutrons com o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner**. 2004. Dissertação (mestrado) - Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro.
- LEWIS, B. J.; MACCALL, M. J.; GREEN, A. R.; BENNETT, L. G. I.; PIERRE, M.; SCHREWE, U. J.; O'BRIEN, K.; FELSBERGER, E., Aircrew exposure from cosmic radiation on commercial airline routes. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 93, n. 4, pp. 293-314, 2001.
- LEWIS, B. J.; BENNETT, L. G. I.; GREEN, A. R.; BUTLER, A.; DESORMEAUX, M.; KITCHING, F.; MACCALL, M. J.; ELLASCHUK, B.; PIERRE, M. Aircrew dosimetry using predictive code for aircrew radiation exposure (PCAIRE). **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 116, n. 1-4, pp. 320-326, 2005.
- LEWIS, B. J.; GREEN, A. R.; BENNETT, L. G. I. Effect of “Noisy” sun conditions on aircrew radiation exposure., **Adv. Space Res.**, v. 44, pp. 184–189, 2009.
- MARTIN, I. M., **X-ray Measurements and calculation of additional flux in the South Atlantic Magnetic Anomaly region**. 1972. Dissertação (mestrado), Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- MEEKER JR, W. Q.; CORNWELL, L. W.; AROIAN, L. A. The product of two normally distributed random variables. In: **Selected Tables in mathematical statistics**, Vol. VII. Providence, Rhode Island (USA): American Mathematical Society, 1981.
- MITAROFF, A.; SILARI, M. The CERN-EU high-energy reference field (CERF) facility for dosimetry at commercial flight altitudes and in space. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 102, n. 1, pp. 7-22, 2002.

- MUNIZ, R. O. R. *Desenvolvimento de um Simulador Antropomórfico para Simulação e Medidas de Dose e Fluxo de Nêutrons na Instalação para Estudos em BNCT*. 2010. Dissertação (mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- NCRP. NATIONAL COUNCIL ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Radiation protection guidance for activities in low-earth orbit*. 2000. (NCRP Report 132).
- NORMAND, E. Single event effects in avionics and on the ground. *Int. J. High Speed Elect. Sys.*, v. 14, n. 2, pp. 285-298, 2004.
- O'BRIEN, K. *LUIN, a code for the calculation of cosmic ray propagation in the atmosphere (update of HASL-275)*. Environmental Measurements Laboratory, Springfield, VA, 1978. (Report EML-338).
- O'BRIEN, K.; SMART, D. F.; SHEA, M. A.; FELSBERGER, E.; SCHREWE, U.; FRIEDBERG, W.; COPELAND, K. World-wide radiation dosage calculations for air crew members. *Adv. Space Res.* v. 31, n. 4, pp. 835-840, 2003.
- O'BRIEN, K.; FELSBERGER, E.; KINDL, P. Application of the heliocentric potential to aircraft dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 116, n. 1-4, pp. 336-342, 2005.
- O'BRIEN, K. Limitations of the Use of the Vertical Cut-off to Calculate Cosmic-ray Propagation in the Earth's Atmosphere - Editorial. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 128, n. 3, pp. 259-260, 2008a.
- O'BRIEN, K. Limitations of the Use of the Vertical Cut-off to Calculate Cosmic-ray Propagation in the Earth's Atmosphere - Erratum. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 130, n. 3, pp. 399, 2008b.
- OBERHOFER, M.; SCHARMANN, A. *Applied Thermoluminescence Dosimetry*. Bristol, England: Adam Hilger Ltd. 1981.
- OLIVEIRA, M. A. L. *Simulation of extent atmospheric showers and reconstruction methods of their fundamental parameters*. 2000. Tese (Doutorado) - Universidade de Campinas, Campinas.
- PAZIANOTTO, M. T.; GONÇALEZ O. L.; FEDERICO, C. A.; CARLSON, B. V. Evaluation of The Response of a Neutron Detector of Long-Counter Type Using Monte Carlo Transport Simulation In: XIII Workshop on Nuclear Physics - WONP-NURT. 2011, Havana, Cuba. *Proceedings...*Havana: 2011.
- PELLICCIONI, M. Radiation Weighting Factors and High Energy Radiation. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 80, n. 4, pp. 371-378, 1998.
- PELLICCIONI, M. Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 88, n. 4, pp. 279-297, 2000.
- PELLICCIONI, M. The impact of ICRP publication 92 on the conversion coefficients in use for cosmic ray dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 109, n. 4, pp. 303-309, 2004.
- PINTO JUNIOR, O. *Estudos sobre raios-X na atmosfera da Anomalia Magnética do Atlântico Sul*. 1985. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- REGINATTO, M.; GOLDHAGEN, P. MAXED, a computer code for maximum entropy deconvolution of multisphere neutron spectrometer data. *Health Phys.* v. 77, pp. 579, 1999.
- REGINATTO, M.; GOLDHAGEN, P.; NEUMANN, S. Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, v. 476, pp. 242-246, 2002.
- ROESLER, S.; HEINRICH, W.; SCHRAUBE, H. Monte carlo calculation of the radiation field at aircraft altitudes. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 98, n. 4, pp. 367-388, 2002.
- ROMERO, A.M.; SAEZ-VERGARA, J. C.; RODRIGUEZ, R.; DOMÍNGUEZ-MOMPELL, R. Study of the ratio of non-neutron to neutron dose components of

- cosmic radiation at typical commercial flight altitudes. **Radiat. Prot. Dosim.** v. 110, n. 1-4, pp. 357–362, 2004.
- SABOIA, A. M.; MARQUES, C. G. Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). in: **Anais da 58ª Reunião Anual da SBPC**, 2006, Florianópolis.
- SATO, T.; NIITA, K. Analytical functions to predict cosmic-ray neutron spectra in the atmosphere. **Radiat. Res.**, v. 166, pp. 544-555, 2006.
- SATO, T.; YASUDA, H.; NIITA, K.; ENDO, A.; SIHVER, L. Development of PARMA: PHITS-based analytical radiation model in the atmosphere. **Radiat. Res.**, v. 170, pp. 244-259, 2008.
- SATO, T.; ENDO, A.; YASUDA, H.; NIITA, K. Impact of the introduction of ICRP publication 103 on neutron dosimetry. **Radiat. Prot. Dosim.** v. 146, n. 1-3, pp. 183–185, 2011a.
- SATO, T.; ENDO, A.; ZANKL, M.; PETOUSSI-HENSS, N.; YASUDA, H.; NIITA, K. Fluence-to-dose conversion coefficients for aircrew dosimetry based on the new ICRP Recommendations. **Prog. Nucl. Sci and Tech.** v. 1, pp. 134-137, 2011b.
- SCHREWE, U. J.; ALBERTS, W. G.; ALEVRA, A. V.; FERRARI, A.; OTTO, T.; SILARI, M. Calibration Problems, Calibration Procedures and Reference Fields for Dosimetry at Flight Altitudes, **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 86, n. 4, pp. 289-295, 1999.
- SCHRIMPF, R.D.; FLEETWOOD, D.M. *Radiation effects and soft errors in integrated circuits and electronic devices*. London, England: World Scientific Publishing Co. 2004.
- SCHUHMACHER, H. Neutron calibration facilities. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 110, n. 1-4, pp. 33-42, 2004.
- SIEBERT, M. **Maßzahlen der Erdmagnetischen Aktivität, in Handbuch der Physik**, vol. 49, n.3, 206-275, Springer, Berlin, Heidelberg, 1971.
- SMART, D. F; SHEA, M. A. A review of geomagnetic cutoff rigidities for earth-orbiting spacecraft. **Adv. Space Res.**, v. 36, pp. 2012–2020, 2005.
- SORDI G. M. A. A. [comunicação pessoal]. Informação pessoal recebida pelo autor em 23 de setembro de 2011.
- SPENVIS. Space Environment Information System. Simulação do ambiente espacial. Disponível em: < www.spenvis.oma.be >. Acesso em 18 de junho de 2010.
- SULLIVAN, D.O.; BARTLETT, D. T.; BECK, P.; BOTOLLIER, J. F.; SCHREWE, U.; LINDBORG, L.; TOMMASINO, L.; ZHOU D. Recent studies on the exposure of aircrew to cosmic and solar radiation. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 100, n. 1-4, pp. 495-498, 2002.
- SWPC. Space Weather Prediction Center. National Weather Service. Plotagens históricas de fluxos de partículas. Disponível em: <<http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/plots.html>>. Acesso em 08 de maio de 2011.
- THERMO-SCIENTIFIC, **FHT 762- WENDI-2 Datasheet**. (n.42540/85 TD-E). 2009.
- THIERFELDT, S.; HAIDER, C.; HANS, P.; KALEVE, M.; NEUENFELDT, F.: Evaluation of the implementation of radiation protection measures for aircrew in EU member states. **Radiat. Prot. Dosim.** v. 136, n. 4, pp. 324-328, 2009.
- TRANSPORT CANADÁ. *Measures for managing exposure to cosmic radiation of employers working on board aircraft*. Commercial and Business Aviation, 5 April 2001. (Advisory Circular. n. 0183).
- TRIOLO, A.; BRAI, M.; MARRALE, M.; GENARO, G.; BARTOLOTTA, A., Study of the glow curves of TLD exposed to thermal neutrons. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 126, n. 1-4, pp. 333-336, 2007.
- TYLKA, A. J.; ADAMS, J. H.; BOBERG, P. R.; BROWNSTEIN, B.; DIETRICH, W. F.; FLUECKIGER, E. O.; PETERSEN, E. L.; SHEA, M. A.; SMART, D. F.; SMITH, E.

- C., CREME 96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code” **IEEE Transac. Nuc. Sci.**, v. 44, n. 6, 1997.
- UNSCEAR. UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *Exposures from natural radiation sources*. 2000. (UNSCEAR 2000 Report).
- VERGARA, J.C.S.; ROMÁN, R. D The implementation of cosmic radiation monitoring in routine flight operation of Iberia Airline of Spain: 1 Y of experience of in-flight permanent monitoring, **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 136, n. 4, pp. 291-296, 2009.
- VUKOVIĆ, B.; POJE, M.; VARGA, M.; RADOLIĆ, V.; MIKLAVČIĆ, I.; FAJ, D.; STANIĆ, D.; PLANINIĆ, J. Measurements of neutron radiation in aircraft. **Appl. Radiat. Isot.**, v. 68, pp. 2398–2402, 2010.
- WIEGEL, B.; ALEVRA, A.V.; MATZKE, M.; SCHREWE, U.J.; WITTSTOCK, J. Spectrometry using the PTB neutron multisphere spectrometer (NEMUS) at flight altitudes and at ground level. **Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A**, v. 476, pp. 52–57, 2002.
- WILSON, J. W.; GOLDHAGEN, P.; MAIDEN, D. L.; TAI, H., *High altitude radiations relevant to the high speed civil transport (HSCT)*. NASA Technical Documentation, 1998. NASA.

ANEXO A - Dados geofísicos.

Neste anexo são apresentados os gráficos das mensurações de prótons, elétrons, campo magnético e índice Kp obtidas pelos satélites GOES (SWPC, 2011) para as datas de interesse do presente estudo.

Na parte superior de cada gráfico são apresentados os fluxos de prótons, em partículas/cm²/s/sr, para os canais com limiares inferiores de energia de 100 MeV (verde), 50 MeV (azul) e 10 MeV (vermelho); logo abaixo são apresentados os fluxos de elétrons, em partículas/cm²/s/sr, para os canais com limiares de energia de 0,6 MeV (roxo) e 2 MeV (azul) para o satélite primário e 0,6 MeV (âmbar) e 2 MeV (vermelho) para o satélite secundário. Logo abaixo são apresentadas as medições do campo magnético, em nT, para o satélite primário e secundário e por último a estimativa do índice Kp, para períodos de três horas, feita pelo SWPC.

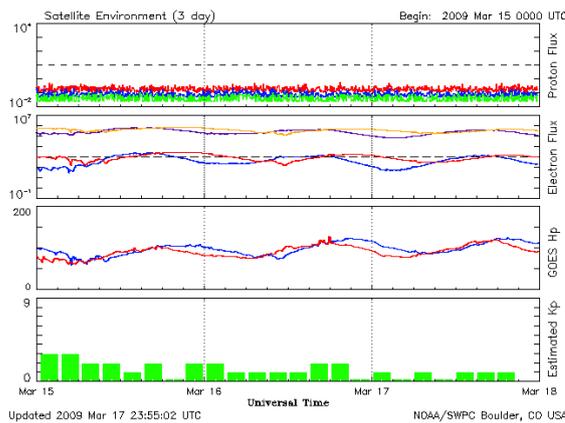


Figura A.1 - Dados geofísicos de 15/03/2009 a 17/03/2009.

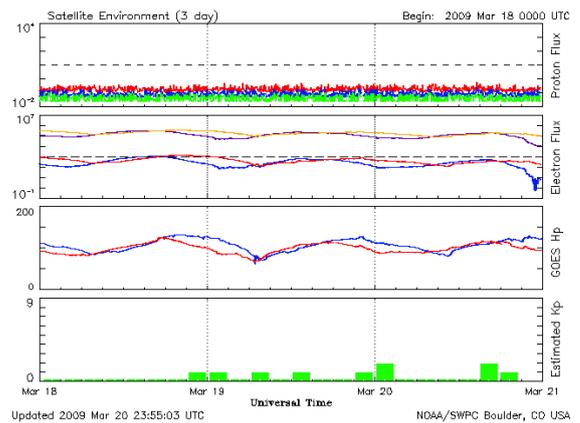


Figura A.2 - Dados geofísicos de 18/03/2009 a 20/03/2009.

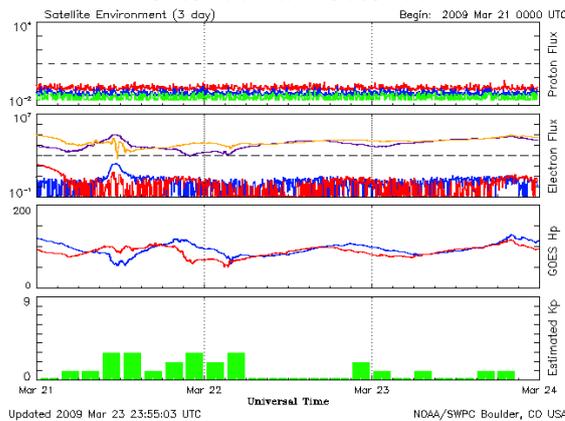


Figura A.3 - Dados geofísicos de 21/03/2009 a 23/03/2009.

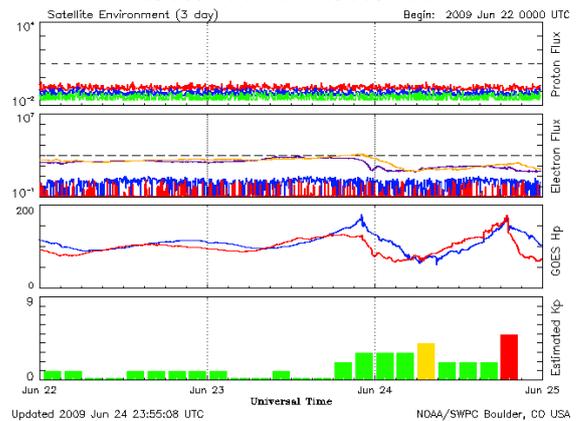


Figura A.4 - Dados geofísicos de 22/06/2009 a 25/06/2009.

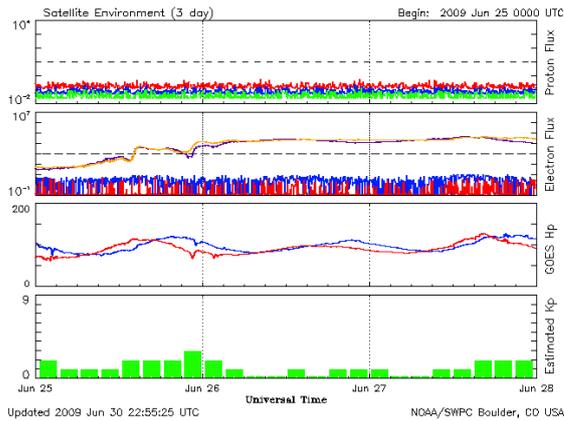


Figura A.5 - Dados geofísicos de 25/06/2009 a 27/06/2009.

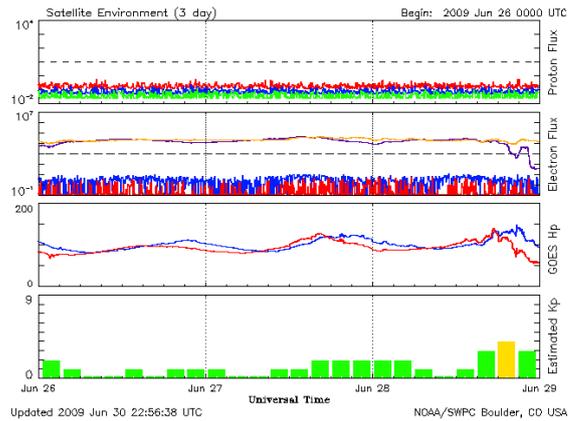


Figura A.6 - Dados geofísicos de 26/06/2009 a 28/06/2009.

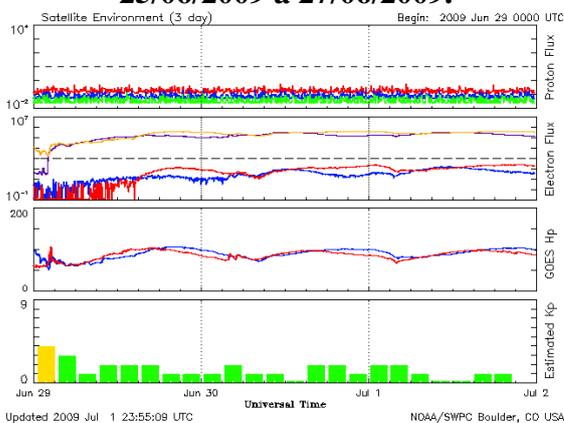


Figura A.7 - Dados geofísicos de 29/06/2009 a 01/07/2009.

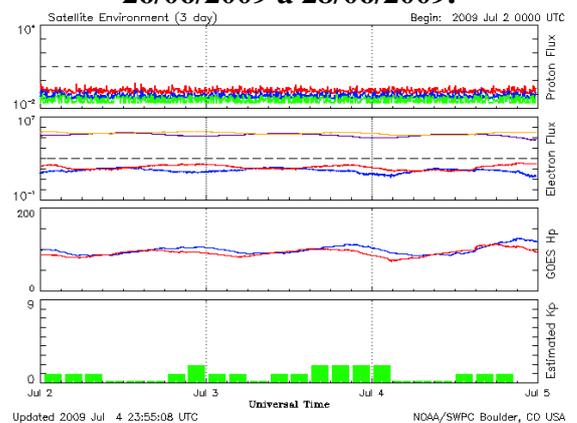


Figura A.8 - Dados geofísicos de 02/07/2009 a 05/07/2009.

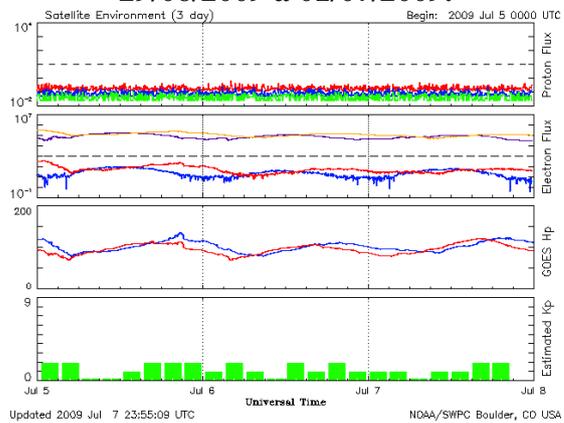


Figura A.9 - Dados geofísicos de 05/07/2009 a 07/07/2009.

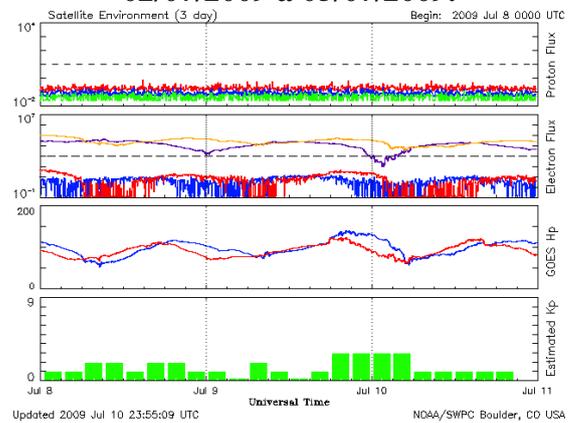


Figura A.10 - Dados geofísicos de 08/07/2009 a 10/07/2009.

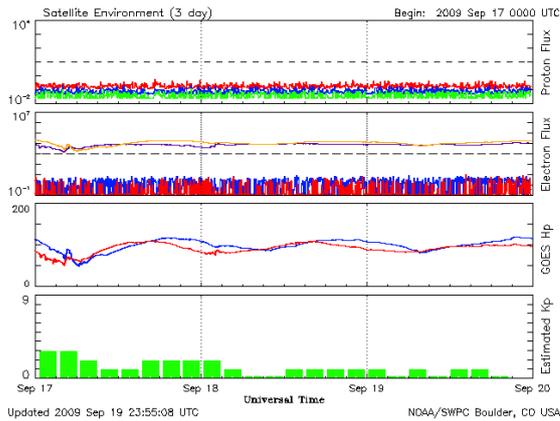


Figura A.11 - Dados geofísicos de 17/09/2009 a 20/09/2009.

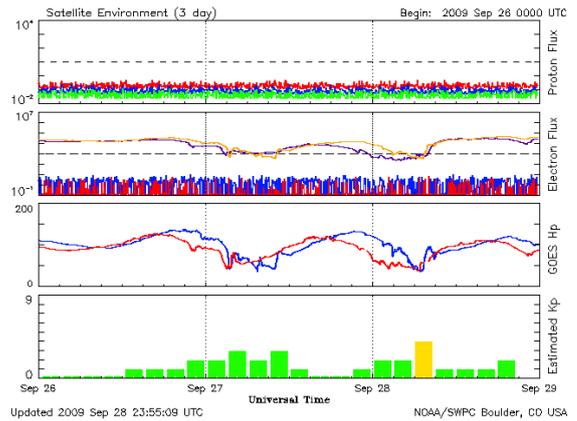


Figura A.12 - Dados geofísicos de 26/09/2009 a 28/09/2009.

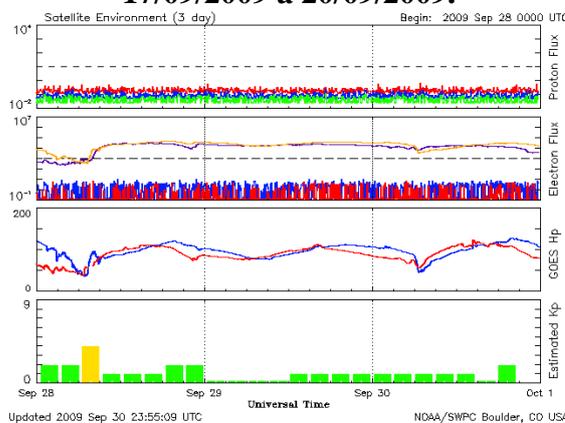


Figura A.13 - Dados geofísicos de 28/09/2009 a 30/09/2009.

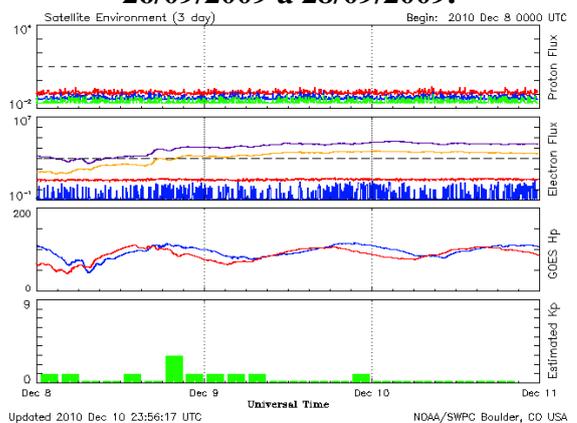


Figura A.14 - Dados geofísicos de 08/12/2009 a 10/12/2009.

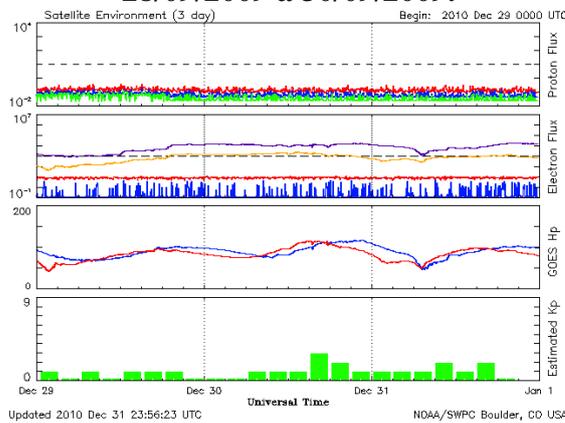


Figura A.15 - Dados geofísicos de 29/12/2010 a 31/12/2010.

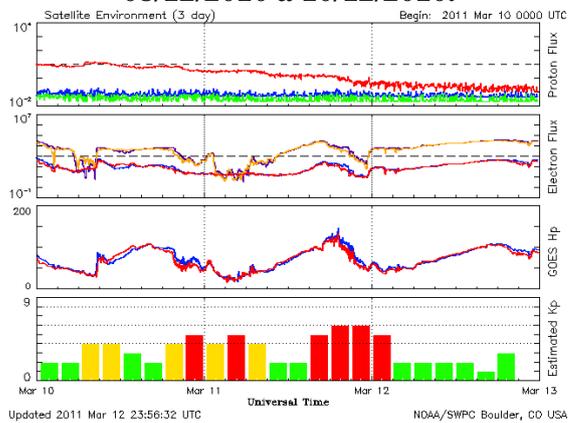


Figura A.16 - Dados geofísicos de 10/03/2011 a 12/03/2011.

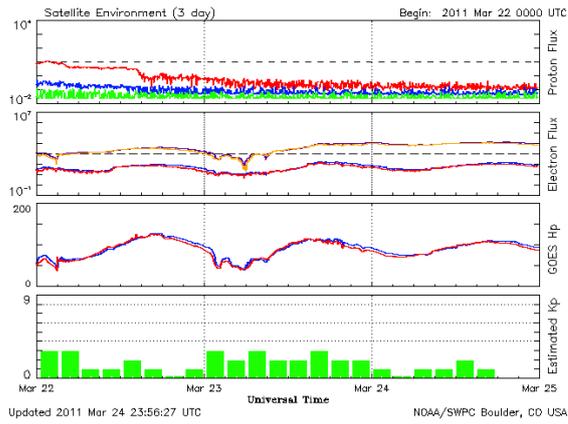


Figura A.17 - Dados geofísicos de 22/03/2011 a 24/03/2011.

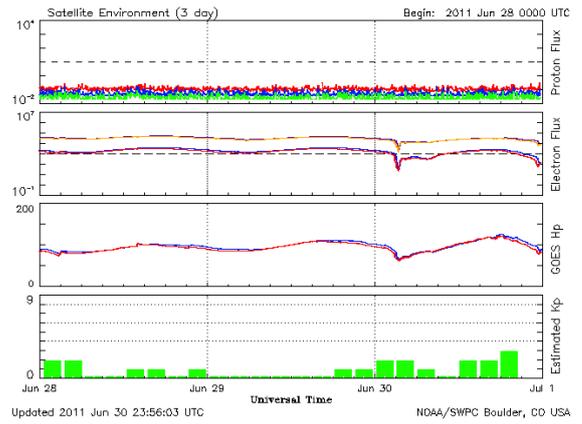


Figura A.18 - Dados geofísicos de 28/03/2011 a 30/03/2011.

ANEXO B - Espectros de fluência.

As Figuras B.1 a B.6, extraídas da norma ISO 20785-1, (2006) representam os espectros calculados de partículas no ar livre, para valores extremos de atividade solar (potencial de desaceleração solar de 465MV a 1700MV) e de rigidez de corte vertical (de 0 a 17 GV).

As taxas de fluência de partículas $d^2\phi/dt.dE$ são dadas em $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{GeV}^{-1}$ e são multiplicadas pela energia E e normalizadas pelas taxas de fluência energética integradas (os fatores de normalização são fornecidos nas legendas, para cada curva).

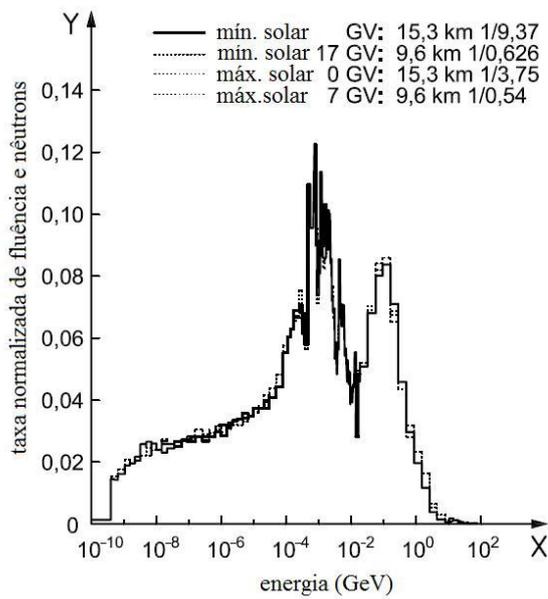


Figura B.1 - Taxa normalizada de fluência espectral de nêutrons.

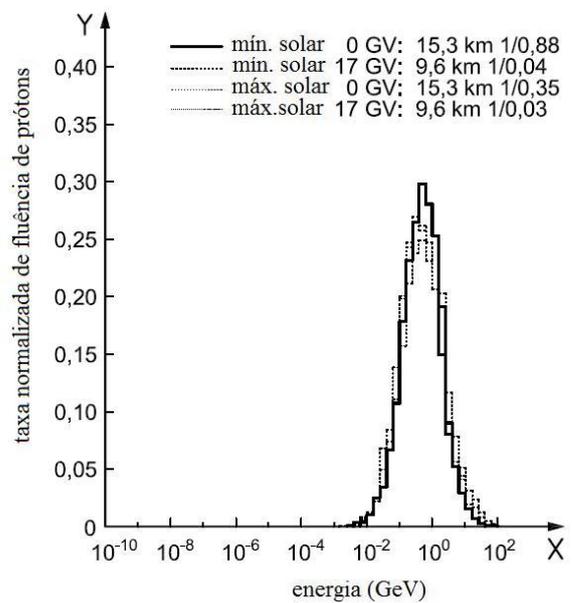


Figura B.2 - Taxa normalizada de fluência espectral de prótons.

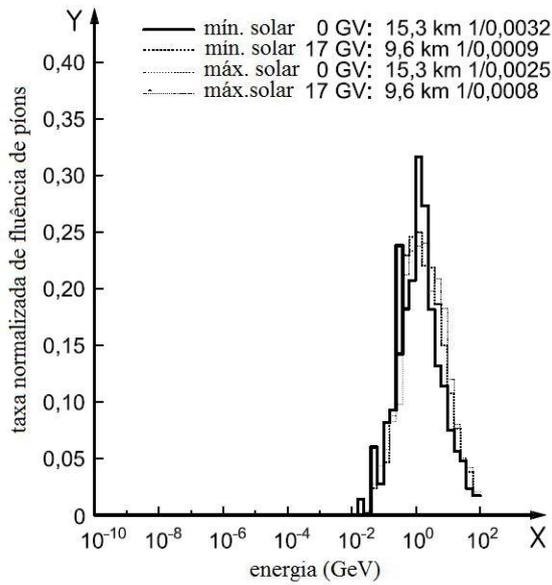


Figura B.3 – Taxa normalizada de fluência espectral de píons.

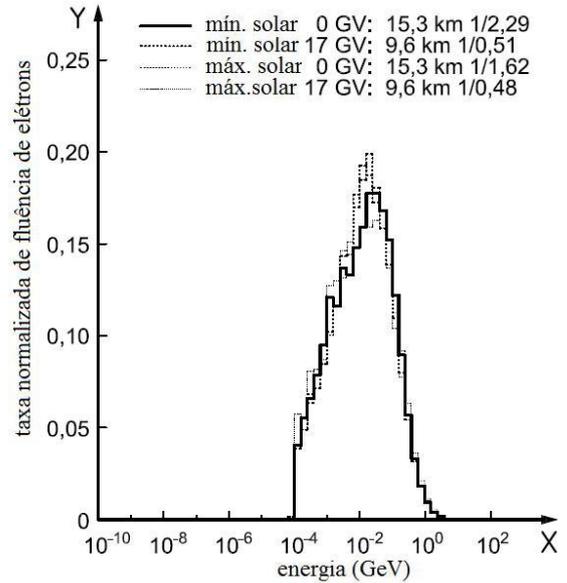


Figura B.4 – Taxa normalizada de fluência espectral de elétrons.

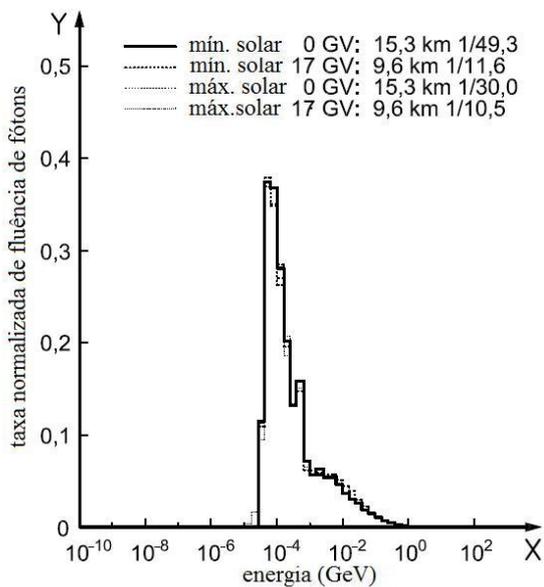


Figura B.5 – Taxa normalizada de fluência espectral de fótons.

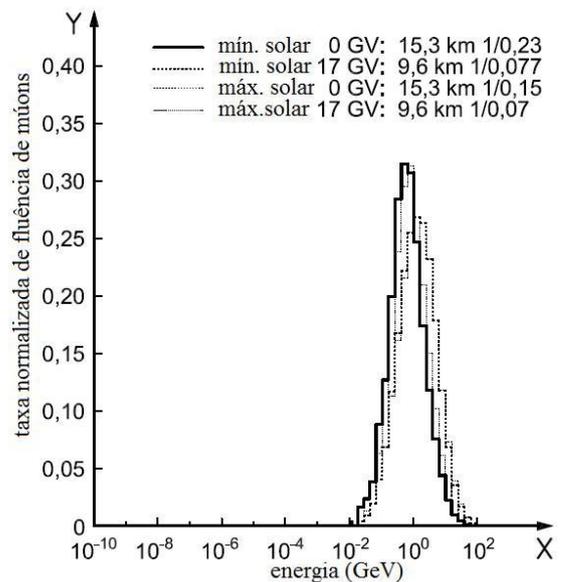


Figura B.6 – Taxa normalizada de fluência espectral de múons.

ANEXO C – Certificado de ensaio.

Ensaio de EMI/EMC

Descrição: Ensaio de Emissão Irrradiada dos equipamentos Thermo Scientific FH40G-10 Wide Energy Neutron Detector, Sonda FHT762 e Garmin GPSMAP 78.

Setup: FCC Part 15; Class B Radiated (3m)

Cliente: Odair Lelis Gonçalves

Executores :

editado
Pesq. Dr. Antonio Carlos Cunha Mígiano
editado
Tecnologista Dr. Carlos Alberto Reis de Freitas
editado
IC/CNPq, Alice Lima de Souza da Cruz
editado
IC/CNPq/PBIC IEAv, Anderson Kenji Hirata
editado
IC/UBC, Bruno Alá Cunha
editado
IC/estagiário, Glauco Pavanelli Zanella

Equipamentos:

-Thermo Scientific FH40G-10 Wide Energy Neutron Detector. SN 023204. CG 55932. CP 6635121/1.
-Sonda FHT762. SN 0269. PN 42540/85. CG 55933. CP 6635122/1.
- GPSMAP 78. SN 93693705. CG 14546. CP 664567/1

Código do Ensaio: 20 - 102010

Data do Ensaio: 20/10/2010

Validade: Outubro/2011



Figura 1. Equipamentos avaliados: detector de neutros e GPS

Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial

Instituto de Estudos Avançados – IEAv

Divisão de Física Aplicada – EFA

Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos – LSE

Laboratório (12) - 3947 - 5561 ou 5564



Instituto de Estudos Avançados. IEAv/EFA-E
Rodovia dos Tamoiós, km 5.5
São José dos Campos, SP
CEP 12231 970
CP6044

Equipamentos

Instrumentação	Modelos	Serial	Certificado de Cal.	VAL Data
Coaxial Cable (Type-N)	HP11966L	NA	NA	NA
Spectrum Analyzer	HP-E7405A	41160411	Agilent-1182618287-1	06/01/2011
Log Periodic Antenna	HP 11956A	1228	NA	NA
Line Impedance Stabilization Network	EMCO - 3810-2	2347	NA	NA

Configurações no receptor de RF

Use FCC Part 15 Settings: Yes
 Interpolation: Linear
 Detector: Peak
 Segment Overlap %: 20.000000
 Number of Sweeps: 1
 Receiver PreAmp: Yes
 Video Average: No

 Signal Path: Log Periodic Path
 Start Frequency: 30.000000 MHz
 Stop Frequency: 2000.000000 MHz
 RBW: Auto
 VBW: Auto
 Ref Level: Auto
 Attenuation: 0.000000 dB
 Sweep Time: 10.000000 sec
 Segment Size: 500000.000000 kHz

Input:
 Measure From List: Measure selected signals
 Frequency search: Yes
 Tune and listen: No
 Prompt before measure: No
 Update Signals: Always update signal
 Signal Path: LogPeriodic Path

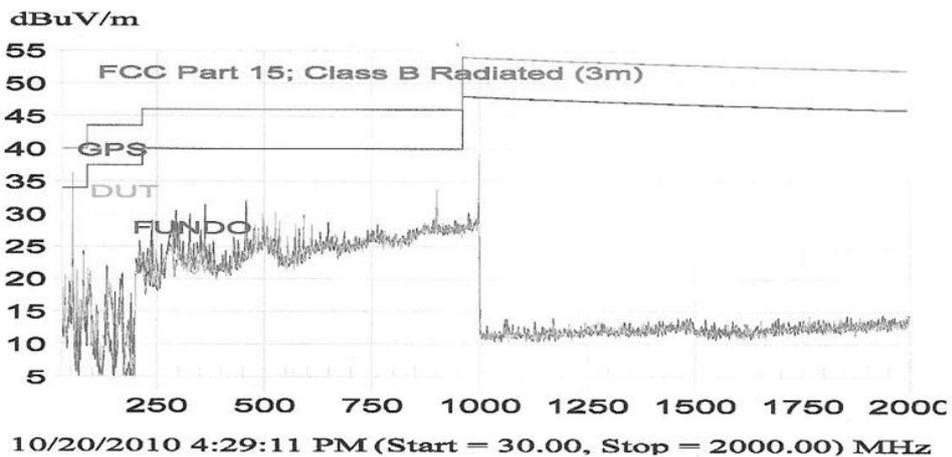
 Receiver PreAmp: Yes
 Autorange Sweep Time: 0.200000 sec

 Peak Detector Settings
 Dwell Time: 0.200000 sec
 RBW: Auto
 VBW: Auto
 Attenuation: Auto

 Quasi-peak Detector Settings
 Dwell Time: 0.200000 sec
 RBW: Auto
 VBW: Auto
 Attenuation: Auto

editado por
 questões de
 confidencialidade

Resultados



Conclusão

Equipamentos geram níveis de potência de radiação abaixo dos níveis estabelecidos pela norma FCC part 15.

ANEXO D – Principais trabalhos publicados durante a elaboração desta tese.

Artigos em periódicos

FEDERICO, C. A.; PEREIRA, H. H. C.; PEREIRA, M. A.; GONÇALEZ, O. L.; CALDAS, L. V. E. Estimates of cosmic radiation dose received by aircrew of DCTA's flight test special group. **J. Aerosp. Tech. Man.**, v. 2, n. 2, p. 137-144, 2010.

FEDERICO, C. A.; GONÇALEZ, O. L.; FONSECA, E. S.; MARTIN, I. M.; CALDAS, L. V. E. Neutron spectra measurements in the South Atlantic Anomaly region. **Radiat. Meas.**, v. 45, p. 1526-1528, 2010.

Artigos completos apresentados em congressos, simpósios e similares.

FEDERICO, C. A.; GONÇALEZ, O. L.; DYER, C.; HANDS, A.; CARESANA, M.; PEREIRA, M. A.; PEREIRA, H. H. C.; PAZIANOTTO; CALDAS, L. V. E. Onboard measurements of cosmic-ray induced dose on aircraft in Brazilian airspace. Submetido para: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC 2011, outubro 24-28, 2011, Belo Horizonte, Brasil. **Proceedings....**, Belo Horizonte: 2011.

FEDERICO, CLAUDIO ANTONIO; GONÇALEZ, ODAIR LELIS ; SORDI, G. M. A. ; CALDAS, L. V. E. . Considerações a respeito de proteção radiológica de tripulações de aeronaves no Brasil. In: RADIO 2011 International Joint Conference, 2011, Recife.

FEDERICO, CLAUDIO ANTONIO; GONÇALEZ, ODAIR LELIS ; CALDAS, L. V. E. . Desenvolvimento da capacitação para efetuar medições de radiação ionizante em tripulações de aeronaves. In: RADIO 2011 International Joint Conference, 2011, Recife.

FEDERICO, C. A. ; GONÇALEZ, ODAIR LÉLIS ; CALDAS, L. V. E. ; BRUCK, LEOPOLDO . Estudo da dose devida à radiação cósmica em tripulações no espaço aéreo brasileiro. In: VIII Simpósio de Transporte Aéreo / II Red Ibero Americana de Investigación em Transporte Aéreo, 2009, São Paulo. Avanços do Transporte Aéreo Brasileiro. São Paulo : EPUSP, 2009. v. unico. p. 337-348.

Resumos apresentados em congressos, simpósios e similares.

FEDERICO, CLAUDIO ANTONIO; GONÇALEZ, ODAIR LELIS ; PAZIANOTTO, M. T.; CALDAS, L. V. E. . In-Flight measurements of cosmic-rays induced dose received by aircrew in Brazilian territory. In: XXXIV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, 2011, Foz do iguaçu. Anais do XXXIV RTFNB, 2011. v. eletr.

FEDERICO, C. A. ; GONÇALEZ, ODAIR LÉLIS ; CALDAS, L. V. E. . Estabelecimento de um sistema dosimétrico para medidas de dose de radiação cósmica em tripulações de aeronaves. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, 2008, Campina Grande, Pb. Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia. Campina Grande, Pb : Editora da universidade Estadual da Paraíba, 2008. v. único. p. 179-180.