

Desenvolvimento da capacitação para efetuar medições de radiação ionizante em tripulações de aeronaves

Federico C. A. ⁽¹⁾, Gonzalez O. L. ⁽¹⁾, Caldas L. V. E. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Estudos Avançados – IEAv/DCTA
Rodovia dos Tamoios, km 5.5, São José dos Campos, São Paulo
12228-970, Brasil
claudiofederico,odairl@ieav.cta.br
<http://www.ieav.cta.br>

⁽²⁾ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN-SP
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, São Paulo
Brasil
lcaldas@ipen.br
<http://www.ipen.br>

Abstract. Neste trabalho são descritas as atividades executadas dentro de um programa de pesquisa do Instituto de Estudos Avançados, pertencente ao Comando da Aeronáutica, em conjunto com pesquisadores de Institutos da Comissão Nacional de Energia Nuclear, no sentido de trazer ao Brasil as capacitações e conhecimentos necessários à correta avaliação das doses de radiação ionizante oriundas da radiação cósmica e seus subprodutos, incidentes em tripulações de aeronaves.

1 Introdução

É fato já conhecido que existe um aumento da taxa de dose proveniente da radiação cósmica e seus subprodutos gerados na atmosfera em função da altitude, fazendo com que tripulações de aeronaves estejam sujeitas a ultrapassar com frequência o limite de dose anual proposto por organismos internacionais para indivíduos do público [1,2]. Os efeitos da radiação em dispositivos e materiais utilizados em aeronaves [3,4], da mesma forma, passaram recentemente a ser importantes, uma vez que falhas de determinados componentes, em particular as denominadas SEUs (Single Event Upsets) 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 de radiação [5].

O desenvolvimento da metodologia para a mensuração e caracterização dosimétrica do campo de radiação cósmica no interior de aeronaves em função da altitude, é importante para possibilitar a geração de dados para se efetuar melhores estimativas de dose nas tripulações e das probabilidades de falhas em equipamentos de bordo.

O objetivo do presente trabalho é apresentar a metodologia que está sendo adotada pelo grupo de pesquisa liderado pelo Instituto de Estudos Avançados para a sua capacitação para a efetiva avaliação das doses de radiação nas rotas do espaço aéreo brasileiro.

Tal metodologia está sendo desenvolvida em três vertentes:

- a) Estudo dos fatores geofísicos espaciais que afetam o campo de radiação cósmica na atmosfera e as medidas a ele associadas;
- b) Desenvolvimento e teste de equipamentos e dosímetros adequados para medida deste campo complexo de radiação e a sua aplicação em medidas de dose a bordo de aeronaves no espaço aéreo brasileiro; e
- c) Capacitação em simulação computacional da interação da RC com detectores, dosímetros, blindagens e outros materiais e para o cálculo da dose efetiva de radiação em rotas de aeronaves no espaço aéreo brasileiro.

2. Fatores geofísicos que afetam do campo de radiação cósmica na atmosfera

As radiações cósmicas (RC) que atingem a terra podem ser agrupadas didaticamente em duas grandes categorias: a radiação cósmica galáctica (RCG) e a radiação cósmica solar (RCS). Ambas as RC interagem por meio de forças eletromagnéticas com o campo magnético terrestre, que defletem a sua trajetória, servindo como um escudo que parcialmente protege a terra destas partículas.

A RCG tem a sua origem fora do sistema solar, possui um amplo espectro de energia (até GeV), distribui-se isotropicamente no espaço interestelar e é constituída predominantemente de núcleos atômicos (cerca de 98% do total), sendo que, destes, 87% consistem de hidrogênio, 12% de hélio e 1% de outros núcleos pesados, com pequena contribuição de elétrons e pósitrons (2%) [1].

A radiação cósmica solar (constituída predominantemente de prótons e elétrons) é produto da atividade solar, sendo dependente dela [6,7]. O Sol possui um ciclo de atividade conhecido, com um período de 11 anos, sendo que a cada ciclo o Sol passa por um máximo e um mínimo em sua atividade. 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 de 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 alta energia, cujo espectro de energia pode chegar até centenas de MeV ou eventualmente unidades de GeV [6], além de elétrons, núcleos de hélio e radiação eletromagnética. Quando ocorrem grandes explosões solares, as partículas emitidas podem chegar à Terra e contribuir para o aumento da dose devida à radiação cósmica. Esses eventos, denominados Eventos de Partículas Solares (EPS), 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 aumentou 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 [7]. Periodicamente ocorrem decréscimos momentâneos da dose de RC, 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”. Uma representação do ciclo solar é apresentada na Figura 1.

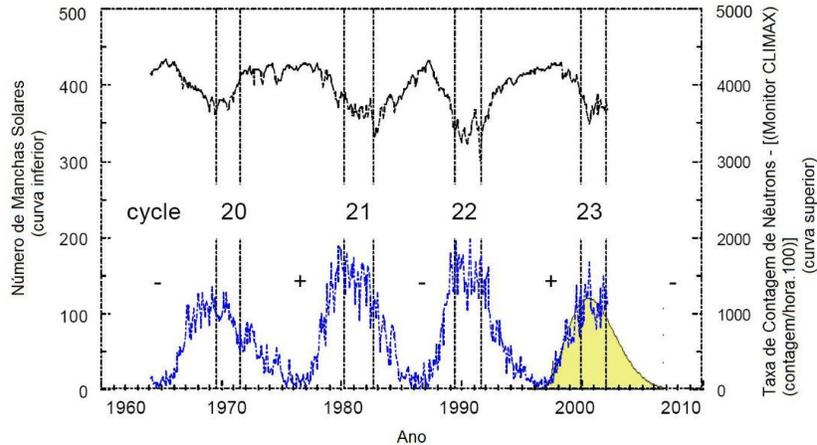


Fig. 1. Taxa de contagem de nêutrons e do número de manchas solares em função do tempo (extraído e adaptado de Hajek et al [8])

As variações de fluxo de prótons e elétrons da RCS 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 EPS. Tal 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.

As partículas da radiação cósmica que conseguem penetrar as camadas mais externas do campo geomagnético e atingir a atmosfera interagem com os núcleos dos constituintes atmosféricos por meio de processos de colisões elásticas e inelásticas de alta energia, produzindo uma cascata de radiações secundárias, que inclui mesons pi, neutros e carregados (π^0 and π^\pm), mésons pesados (K), hyperons (Y), prótons, nêutrons e suas anti-partículas, elétrons e radiação eletromagnética [9-11]. Uma representação esquemática dessas interações é apresentada na Figura 2.

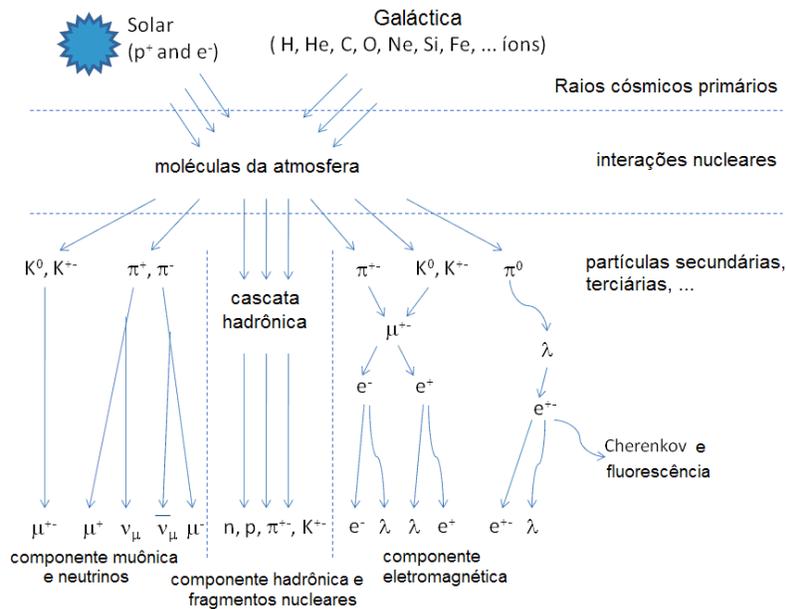


Fig. 2. Representação das reações envolvidas na interação das partículas da radiação cósmica primária com a atmosfera, dando origem aos raios cósmicos secundários (extraído e adaptado de Federico et al [12])

À medida que a cascata se desenvolve e penetra camadas mais internas da atmosfera o número e a diversidade de partículas secundárias aumenta e a sua energia média diminui, até o momento em que a absorção das mesmas começa a preponderar, havendo variação da dose em função da altitude barométrica. Na figura 3 é mostrada a variação da 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 (extraído e adaptado da norma ISO 20785-1 [13]), onde se pode observar um máximo da taxa de dose entre 15km e 20km de altitude.

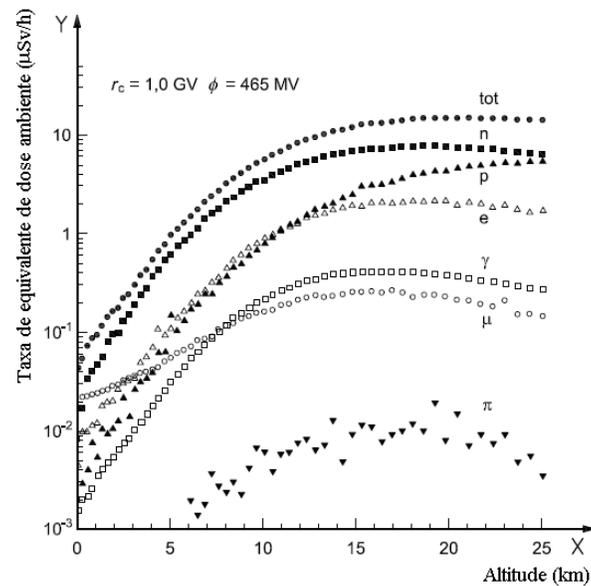


Fig. 3. Taxa de equivalente de dose ambiente em função da altitude barométrica padrão para vários componentes da radiação cósmica atmosférica em época de mínimo solar de 465 MV (extraído e adaptado da ISO 20785-1 [13])

A dose decorrente de partículas e radiação eletromagnética presentes na cascata durante a sua penetração na atmosfera depende de diversos fatores, incluindo o campo magnético terrestre, o vento solar e a atenuação causada pela atmosfera.

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 [14]. Tal capacidade de deflexão das partículas é determinada por uma característica local do campo geomagnético denominada rigidez de corte.

Grande parte do território brasileiro está sujeito à influência de uma anomalia magnética, denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Trata-se de uma região em que as linhas de campo magnético terrestre se aproximam da crosta, podendo modificar a forma de desenvolvimento do chuveiro de radiação cósmica secundária na atmosfera. Na figura 4 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 (*International Geomagnetic Reference Field*).

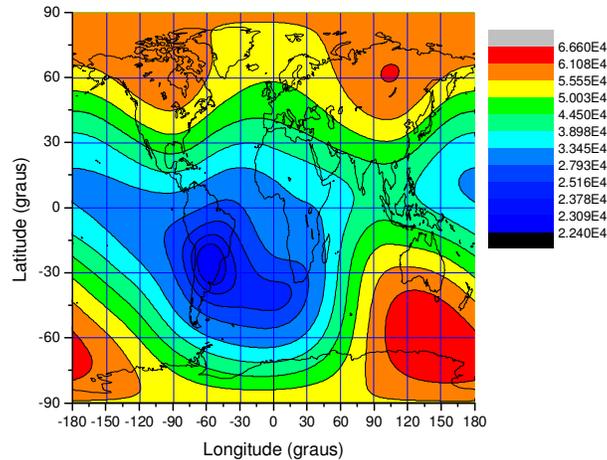


Fig. 5. Mapa do campo magnético (intensidade total, expressa em nT) obtido pelo modelo IGRF2011, para a data de 01/10/2010

Alguns estudos foram desenvolvidos sobre a AMAS desde 1968, utilizando balões estratosféricos entre outros métodos [15-17]. A maior parte destes estudos indicam que a AMAS modifica a radiação incidente em altas altitudes, mas não foram detectadas modificações significativas nas fluências de partículas em altitudes menores, compatíveis com as altitudes de aviação comercial. Entretanto, é importante realçar, que a dose de radiação, é proporcional à fluência, mas também é fortemente dependente da transferência linear de energia (LET) e, com isso, da distribuição em energia e da natureza da partícula. Para a sua mensuração correta é necessária instrumentação com resposta conhecida para este campo de radiação ou que tenha sido calibrada em um campo de radiação desta natureza e perfeitamente conhecido. O conhecimento referente a esse campo de atuação está sendo desenvolvido por meio de medidas de espectro de nêutrons em solo, em diversas altitudes [18], e está sendo complementado pela montagem de uma estação fixa de monitoramento de nêutrons que permita acompanhar grandes flutuações dos parâmetros geomagnéticos ou EPS's que possam dar origem à variações na taxa de dose ao nível do solo ou em altitudes de aviação.

3. Monitores de radiação e dosímetros para medida da radiação cósmica nas altitudes de voo

Um dos grandes obstáculos à realização de mensurações da radiação cósmica incidente em aeronaves são os equipamentos e dosímetros a serem utilizados. Em primeiro lugar, tais equipamentos devem suportar a operação dentro de uma aeronave, o que implica em estarem sujeitos a diferenciais de pressão e gravidade e também à possibilidade de interferência eletromagnética oriunda dos sistemas emissores de radiofrequência presentes na aeronave, tais como radar, rádios de comunicação, transponder e etc. Os equipamentos e dosímetros, por sua vez, devem ser previamente

avaliados quanto à existência de materiais perigosos ou à observância das normas de emissão de campos eletromagnéticos, com a finalidade de garantir a segurança da aeronave e obedecer os regulamentos da IATA (International Air Transport Association) para aeronaves comerciais de transporte de passageiros. Nos estudos desenvolvidos pelo IEAv, optou-se por utilizar aeronaves de ensaio do Grupamento de Ensaio em Voo (GEEV), pertencente ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), efetuando-se, antes, todos os testes de compatibilidade eletromagnética necessários para garantir a confiabilidade das medidas obtidas, bem como, a segurança da aeronave. O GEEV é a única unidade aérea do Brasil criada com a finalidade específica de efetuar ensaios em aeronaves e, até onde se sabe, a única do gênero na América do Sul.

Idealmente, os equipamentos ou dosímetros a serem utilizados em um processo de medição devem ser calibrados em um campo com características similares ao campo em que serão utilizados, ou possuir uma resposta conhecida, de forma que possam ser feitas as correções necessárias e aplicados os fatores de conversão da grandeza física de sua resposta para unidades de medidas de dose correspondentes a este campo de radiação. Outra abordagem utilizada é a calibração dos equipamentos de medida em campos de radiação convencionais e sua extrapolação para as energias da RC de acordo com as curvas de dependência com a energia apresentadas pelo fabricante e confirmadas por meio simulações computacionais do sistema detector.

No caso da RC, composta de diversos tipos de partículas e com espectros de energia que podem se estender por várias décadas de energia, torna-se muito difícil a sua reprodução em laboratório, bem como, um detector que responda a todos os tipos de partícula.

Em especial, nas altitudes de vôo, a contribuição de nêutrons pode chegar até a 40% da dose total, sendo importante a sua distribuição de energia [18,19]. Nêutrons rápidos representam um risco acentuado para efeitos na instrumentação eletrônica digital e os fatores de conversão de fluxo para dose são fortemente dependentes da sua energia.

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 deste tipo de campo são muito diversas daquelas obtidas em campos emitidos por fontes convencionais de radionuclídeos, aceleradores ou reatores, obrigando a se utilizar campos conhecidos e caracterizados de largo espectro, criados especificamente para simular aqueles obtidos nos locais de medida [20], para a verificação ou para a calibração dos instrumentos de medida.

Existe, nos laboratórios do CERN (Centré European de Recherché Nucleaire) denominado CERF (Cosmic Energy Reference Field), Prevevin, França, um arranjo experimental projetado para reproduzir com razoável proximidade o campo existente em altitudes de voo de aeronaves. Embora tal 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, e está sendo amplamente utilizado para verificação da instrumentação utilizada para fins de dosimetria aeronáutica.

Nas primeiras medidas já realizadas a bordo das aeronaves do GEEV nas altitudes de 4876 m, 7010 m, 9448 m e 10668 m, foi utilizado o monitor FH40G-10, com sonda FHT-762 da Thermo Scientific, calibrado neste campo de radiação. Na figura 6 são apresentados resultados preliminares destas medidas realizadas na região de São José dos Campos, comparados com estimativas computacionais calculadas por meio do programa computacional EXPACS, versão 2.19 [21, 22].

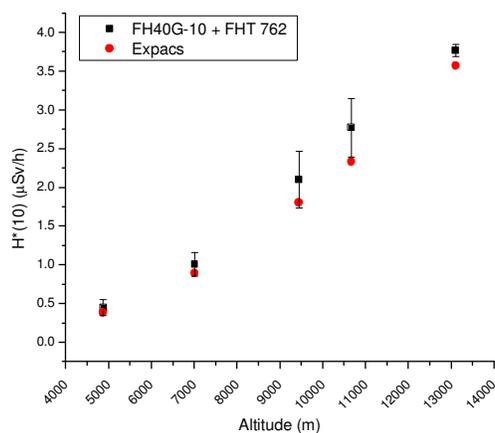


Fig. 6. Resultados preliminares das medições experimentais já realizadas, em comparação com estimativas teóricas, calculadas por meio do programa EXPACS v. 2.19 [21,22]

4. Simulação computacional

A capacidade de simulação computacional é um fator importante para os grupos que pretendam desenvolver estudos mais abrangentes nesse campo de atuação, permitindo, como citado anteriormente, extrapolar a resposta de sistemas de detecção ou então simular o comportamento de sistemas de forma a poder adaptá-los ao tipo de medida necessária. No IEAV o desenvolvimento das técnicas de simulação está sendo feito utilizando o programa MCNPX, versão 2.5 [23].

O trabalho de Pazianotto et al [24] ilustra o estudo do processo de simulação computacional de um detector do tipo Long-Counter, calibrado por meio de fontes convencionais, e que está sendo adaptado para ser utilizado como monitor de nêutrons de RC em solo. Uma das mais importantes considerações para uma simulação realista, além da adequada descrição geométrica e material do detector, são as bibliotecas de dados nucleares a serem utilizadas e os modelos físicos dos processos nucleares mais adequados a serem utilizados para as regiões em que tais bibliotecas não estejam disponíveis. Por meio do domínio do processo de simulação computacional, a resposta de um detector pode ser avaliada utilizando fontes de radiação convencionais, extrapolando-se adequadamente esta resposta para a distribuição de energia dos espectros de RC nas diversas altitudes.

Outro tipo de simulação computacional refere-se àquele no qual são estimadas as doses de radiação para uma determinada rota de aeronave. Programas para tais

cálculos já são disponibilizados gratuitamente por centros especializados e deverão ter avaliada a sua aplicabilidade às rotas do espaço aéreo brasileiro, confrontando-se os seus resultados com medidas realizadas a bordo de aeronaves em tais rotas. Estão atualmente sendo avaliados os programas CARI-6 [25], PCAIRE [26], QARM [27], entre outros.

5. Conclusões

O problema da medição de dose de radiação incidente em tripulações de aeronaves, bem como na instrumentação sensível é uma questão que ainda não foi abordada de forma abrangente por grupos na América do Sul, embora esta capacitação já exista há vários anos nos continentes Europeu, Norte Americano e Asiático. A abordagem multidisciplinar adotada pelo grupo de pesquisadores envolvidos neste projeto têm se mostrado bastante efetiva, permitindo um avanço sistemático do conhecimento adquirido que, de outras formas ficaria restrito pelas dificuldades de acesso a instalações de calibração adequadas e aos ensaios em vôo, bem como, de instalações de monitoramento de nêutrons em solo, que inexistem no Brasil. O grupo de trabalho constituído por pesquisadores do IEAv e da CNEN, bem como a infra-estrutura de vôo disponibilizada pelo Comando da Aeronáutica, reúne parte significativa desta capacitação necessária. Um projeto completo de capacitação está sendo submetido ao Fundo Setorial Aeronáutico para completar a infra-estrutura de solo e instrumentação de medida a bordo de aeronaves, planejando-se a avaliação com o melhor grau de precisão das doses em todas as rotas do espaço aéreo brasileiro. Este projeto denomina-se Projeto DRIEAB - Dosimetria da Radiação no Espaço Aéreo Brasileiro.

Agradecimento:

Os autores agradecem à FINEP e ao CNPq pelo suporte financeiro parcial e ao Comando da Aeronáutica, pelo suporte a estes estudos.

Referências

1. Bartlett, D. T.: Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. *Radiat. Prot. Dosim.* (2004) v. 109, n. 4, p. 349-355
2. ICRP: Recommendations of the international commission on radiological protection. International Commission on Radiological Protection. Publication 60. (1991) *Annals of the ICRP*, v. 21, n. 1-3
3. Holmess-Siedle, A.; Adams, L., *Handbook of Radiation Effects*. Segunda edição, Oxford University Press (2002)
4. Normand, E., Single event effects in avionics and on the ground. *Int Journal of High Speed Elect and Systems*, (2004) v. 14, n. 2, p. 285-298
5. Schrimpf, R.D.; Fleetwood, D.M. Radiation effects and soft errors in integrated circuits and electronic devices. World Scientific Publishing Co., London (2004)
6. 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.* (2002) v. 100, n. 1-4, p. 495-498
7. Lewis, B.J.; Green, A.R.; Bennett, L.G.I., Effect of “Noisy” sun conditions on aircrew radiation exposure., (2009) *Advances in Space Research*, v. 44, p. 184-189
8. Hajek, M; Berger, T; Vana, N.: A TLD-based personal dosimeter system for aircrew monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.* (2004) v. 110, n. 1-4, p. 337-341

9. Hartmann, G. A. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul: Causas e Efeitos. Dissertação (mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo (2005).
10. Oliveira, M. A. L., Simulation of extent atmospheric showers and reconstruction methods of their fundamental parameters, Tese de Doutorado, Universidade de Campinas, Campinas (2000)
11. Brum, C. G. M., Variabilidade da absorção de ruído cósmico via riômetro e modelagem numérica dos processos associados. Tese (doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2004)
12. Federico, C. A.; Pereira, H. H. C.; Pereira, M. A.; Gonzalez, O. L.; Caldas, L. V. E.: Estimates Of Cosmic Radiation Dose Received By Aircrew Of DCTA's Flight Test Special Group. Journal of Aerospace Technology and Management (2010a), v. 2, p. 137-144
13. ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. Dosemetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircrafts - Part 1: conceptual basis for measurements. Geneva, ISO 20785-1 (2006)
14. 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). (2005) Radiat. Prot. Dosim., v. 116, n. 1-4, p. 320-326.
15. Martin, I. M.: Medidas de raios-X e cálculo do fluxo adicional na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Espaciais (1972) São José dos Campos
16. 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, (1981) São José dos Campos
17. Pinto Junior, O.: Estudos sobre raios-X na atmosfera da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Tese de doutorado, Instituto de Pesquisas Espaciais (1985) São José dos Campos
18. Federico, C. A.; Gonzalez, O. L.; Fonseca, E. S.; Martin, I. M.; Caldas, L. V. E.: Neutron spectra measurements in the South Atlantic Anomaly region. Radiat. Measur. (2010b) v 45, n.10 p.1526-1528
19. Federico, C. A.; Gonzalez, O. L.; Caldas, L. V. E.; Bruck, L. Estudo da dose devida à radiação cósmica em tripulações no espaço aéreo brasileiro. Anais do VIII Simpósio de Transporte Aéreo VIII SITRAER / II RIDITA. (2009) São Paulo, SP, Brasil. p. 337-348
20. Schuhmacher, H., Neutron calibration facilities. Radiat. Prot. Dosim, (2004) v. 110, n. 1-4, p. 33-42
21. Sato, T.; Niita, K., Analytical functions to predict cosmic-ray neutron spectra in the atmosphere. Radiat. Res (2006) v. 166, p. 544-555
22. Sato, T.; Yasuda, H., Niita, K., Endo, A., Sihver, L., Development of PARMA: PHITS-based analytical radiation model in the atmosphere. Radiat. Res, (2008) v. 170, p. 244-259
23. D. Pelowitz (Ed.), *MCNPX User's Manual Version 2.5.0*, Los Alamos National Laboratory report LA-CP-05-0369 (2005)
24. Pazianotto, M. T. ; Federico, C. A. ; Gonzalez, O. L. ; Carlson, B. V. . Evaluation of the Neutron Detector Response for Cosmic Ray Energy Spectrum by Monte Carlo Transport Simulation. XIII Workshop on Nuclear Physics, WONP-NURT2011, (2011) Havana
25. EURADOS. EUROPEAN RADIATION DOSIMETRY GROUP. Cosmic radiation exposure of aircraft crew. (2004) Radiation Protection 140 of EURADOS Work Group 5
26. 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. (2005) v. 116, n. 1-4, p. 320-326
27. 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. on Nucl. Sc. (2009) v. 56, n. 6