

ESTUDO DA DOSE DEVIDA À RADIAÇÃO CÓSMICA EM TRIPULAÇÕES NO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO.

Claudio Antonio Federico¹

Odair Lélis Gonzalez¹

Linda Viola Ehlin Caldas²

Leopoldo Bruck³

¹Instituto de Estudos Avançados – IEAv/CTA / São José dos Campos, SP.

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN – SP.

³Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um breve estudo da contribuição da radiação cósmica na dose de radiação ionizante a qual tripulações e equipamentos estão sujeitos em vôos comerciais e de grande altitude. São apresentados resultados de cálculos e de medições realizadas, principalmente, no hemisfério norte, relatadas na literatura especializada. É discutida a influência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) na dose equivalente em relação a outras regiões do mundo, recomendando-se estudos e pesquisas mais detalhados no espaço aéreo brasileiro.

ABSTRACT

In this work it is presented a brief study of the cosmic radiation contribution to the ionizing radiation dose of which crews and equipment are subjects in commercial and great altitude flights. Results of calculations and measures found in the specialized literature, mainly for the north hemisphere, are presented. The influence of the South Atlantic Magnetic Anomaly in the equivalent dose in relation to other regions of the world is discussed. More detailed studies and research in the Brazilian airspace are recommended.

1. INTRODUÇÃO

O homem ao longo de sua vida está continuamente exposto à radiação ionizante de origem artificial e natural. A radiação artificial é proveniente das aplicações médicas (raios-X, radioterapia e medicina nuclear), de reatores nucleares e outras aplicações industriais, como, por exemplo, a gamagrafia utilizada na inspeção de peças pesadas. São fontes naturais de radiação aquelas emanadas por radioisótopos presentes na terra, água e ar desde a origem do nosso planeta e as partículas de alta energia provenientes do espaço. Esta radiação proveniente do espaço é chamada de radiação cósmica (RC). A RC é atenuada pela atmosfera terrestre, porém, parte dela, ainda atinge a superfície da terra, irradiando todos os seres vivos continuamente. A intensidade da radiação cósmica depende da altitude.

Nestas últimas décadas, não só com o desenvolvimento de aeronaves com teto de operação mais alto e o aumento do fluxo aéreo, como também, com a maior autonomia de certas aeronaves, o problema do controle do nível de dose de radiação ionizante recebida pelos pilotos e tripulação de aeronaves e equipamentos sensíveis, os aviônicos, passou a ser, gradualmente, mais importante nas áreas de saúde ocupacional, proteção radiológica, radiobiologia e segurança de vôo, motivando diversos estudos sobre esse assunto, publicados na literatura especializada internacional, como exposto por Hajek (2004), Bartlett (2004), Sullivan (2002) e Wilson (1998). Em especial, o transporte civil de altas velocidades (High Speed Civil Transport), como, por exemplo, o Concorde, que operava em maiores altitudes, está sujeito a doses de 2 a 3 vezes maiores que nos vôos subsônicos usuais (WILSON, 1998).

Reconhecido o problema, as principais autoridades de aviação civil, tais como, a americana FAA e a canadense TCCA, investiram em pesquisa e desenvolvimento para o estudo da incidência e intensidade dos eventos relacionados à radiação cósmica, com a finalidade de

avaliar a exposição ocupacional de pilotos e da tripulação das aeronaves civis em vôos de longa duração.

Na Figura 1 é apresentado, de forma ilustrativa, o aumento das taxas de dose efetiva em função da altitude, calculadas por meio do programa CARI-6, para a região de São José dos Campos, no período de janeiro de 2008. É interessante observar que o limite de dose anual, proposto por organismos internacionais para indivíduos do público é de 1 mSv (ICRP, 1991; IAEA, 1991), limite este que pode ser facilmente ultrapassado por tripulações de aeronaves, que podem voar tipicamente até cerca de 600 a 800 horas por ano.

2. RADIOPROTEÇÃO DAS TRIPULAÇÕES

A “International Commission on Radiological Protection” (ICRP) reconhece que é necessário controlar a exposição do grupo crítico de profissionais de vôo, como pilotos e tripulações (ICRP, 1991). Estudos mostram (BARTLETT, 2004) que este grupo 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.

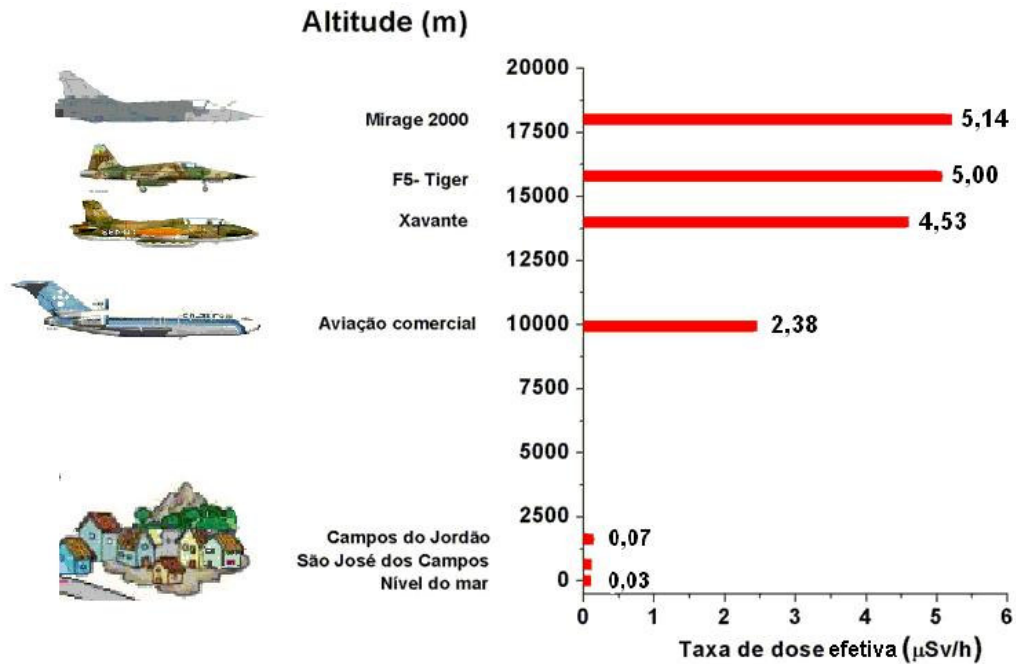


Figura 1: Taxas de dose efetiva devidas à radiação cósmica, em função da altitude.

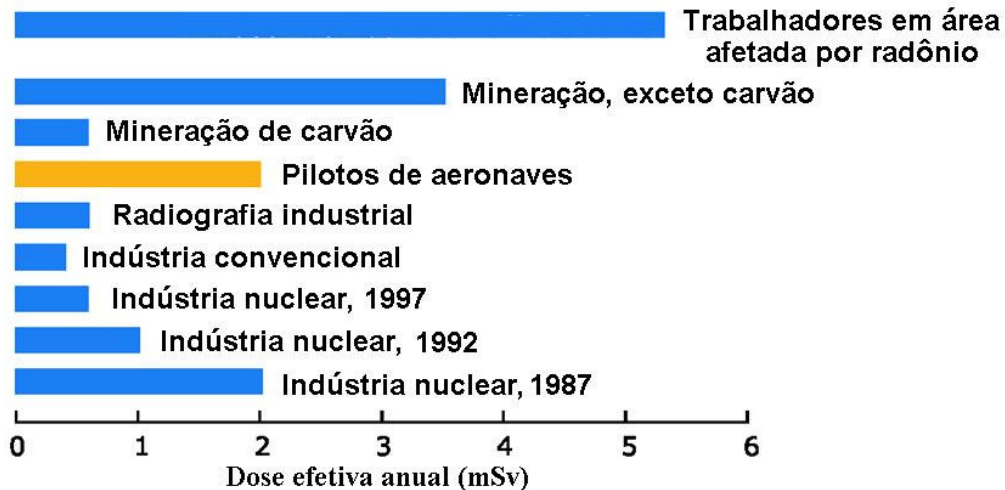


Figura 2: Comparação entre doses efetivas médias anuais em várias ocupações, no Reino Unido, extraído e adaptado de Bartlett (2004).

Estudos recentes (YONG, 2009) sugerem que os pilotos e os tripulantes de linhas comerciais regionais, habitualmente sujeitos a longa permanência em vôo por evento (ou total anual) podem estar expostos a doses biologicamente significantes de radiação ionizante.

O “Federal Aviation Administration, Civil Aero-Medical Institute”, dos EUA, estimou as doses recebidas por tripulações em 32 vôos para diferentes destinos. Esta dose variou de 0,023 mSv a 0,8 mSv por bloco de 100 horas de vôo (FAA, 1990).

Em 1990, a ICRP propôs, em sua recomendação de número 60 (ICRP, 1991), que pilotos e tripulações devam ser considerados como pessoal ocupacionalmente exposto à radiação ionizante. Esta mesma recomendação foi mantida e melhor detalhada nas publicações da ICRP de números 75 (ICRP, 1998) e 103 (ICRP, 2008). Nessa mesma linha de atitude, a União Européia e o Canadá reconheceram as tripulações de aeronaves como pessoal ocupacionalmente exposto à radiação ionizante, conforme exposto por Courades (1999), Transport Canadá (2001) e Lim (2009), determinando que as tripulações com possibilidade de serem expostas a doses superiores a 1 mSv ao ano devem ter suas doses controladas. Deve-se lembrar que 1 mSv por ano é o limite de dose para indivíduos do público estabelecido por organismos internacionais e, no Brasil, pela Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (CNEN, 2005).

Nos últimos anos têm sido realizadas medições experimentais, principalmente no hemisfério norte, cobrindo altitudes que variam de 8 a 20 km e latitudes de 30° S a 70° N. Sullivan et al (2002) relataram taxas de dose que variaram de 1 μ Sv/h a 17 μ Sv/h, o que resultaria, por exemplo, em doses de 0,1 a 1,7mSv para cada 100 horas de vôo. Deve-se observar que a maior parte das medições da radiação cósmica em altitudes de vôo de aeronaves foi realizada no continente Norte-Americano e na Europa, sendo que poucos dados foram coletados na região da América do Sul, conforme pode ser observado na Figura 3.

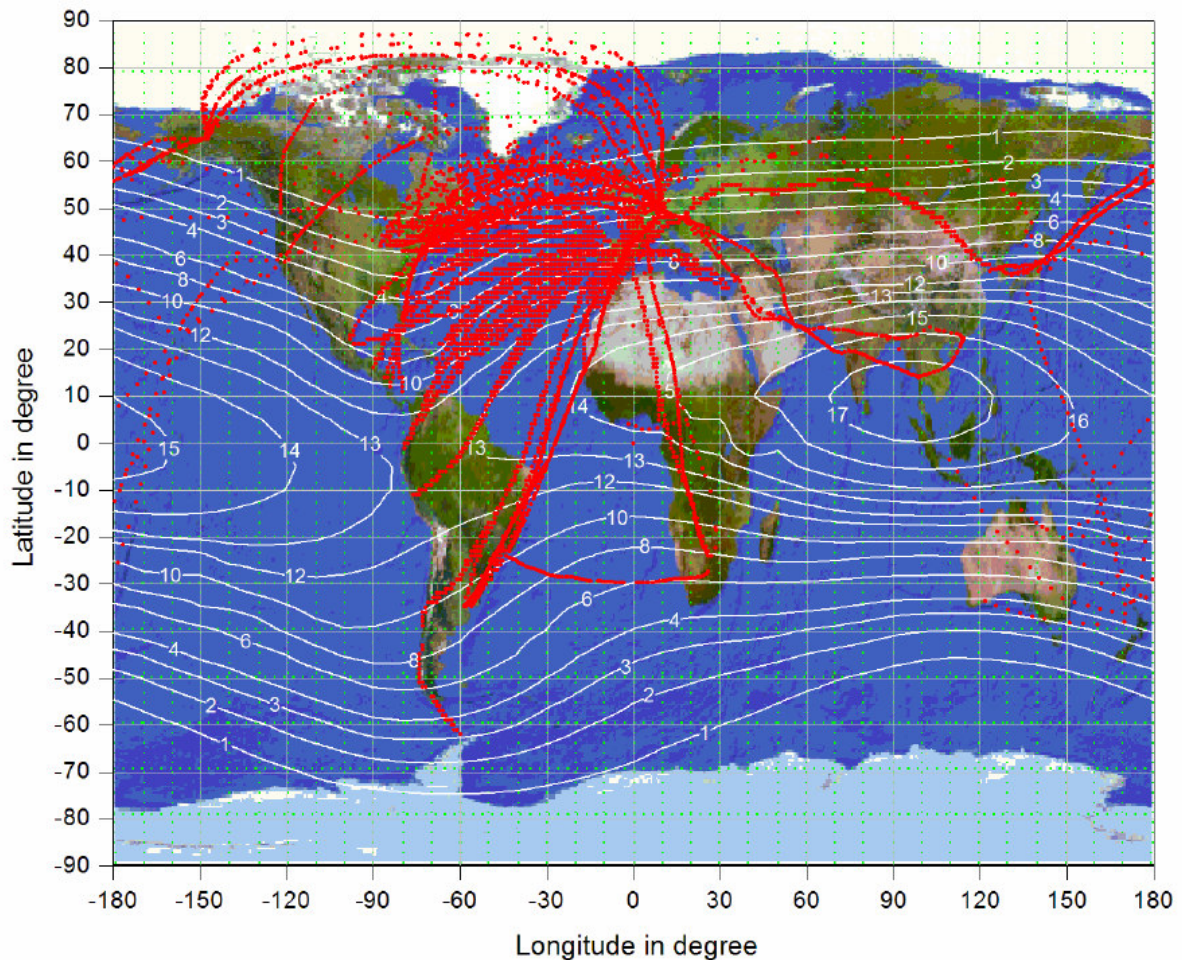


Figura 3: Rotas aéreas investigadas entre maio de 1992 e abril de 2003 (extraído de EURADOS, 2004).

Sob o ponto de vista de proteção radiológica, outro fator relevante é a grande proporção de jovens do sexo feminino em idade de procriação em tripulações de aeronaves (ALVES, 2007 e BECK, 2006), características estas que podem implicar em um maior risco quanto aos efeitos hereditários da radiação. Deve-se, ainda, considerar a proteção do feto, no caso de gestantes.

Em vista das dificuldades encontradas na determinação experimental das doses devidas à radiação cósmica, muitos organismos propuseram e desenvolveram o uso de programas computacionais que calculam teoricamente a dose recebida em aeronaves, nas grandezas equivalente de dose ambiental e dose efetiva. Dentre os programas disponíveis para essa finalidade podem ser citados: CARI-6, EPCARD, EXPACS, PCAIRE e SIEVERT (EURADOS, 2004).

3. EFEITOS EM AVIÔNICOS

Os efeitos da radiação em dispositivos e materiais utilizados em aeronaves (HOLMES-SIEDLE, 2002), da mesma forma, passaram então a ser importantes, uma vez que falhas de determinados componentes, em particular aqueles dos computadores de bordo (NORMAND, 2004), 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 transientes e danos provocados pela incidência da radiação ionizante (SCHRIMPF, 2004 e CLAEYS, 2002).

Neste sentido, a caracterização do campo de radiação cósmica em função da altitude das principais rotas de aeronaves no espaço aéreo brasileiro, além da proteção radiológica das tripulações, também fornecerá dados para a estimativa das probabilidades de falhas em equipamentos de bordo.

4. A ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS)

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, 1995 e COSTA, 2004). Tal anomalia modifica a forma com que as radiações cósmicas interagem com o campo geomagnético e com a atmosfera.

Na figura 4 pode-se observar claramente a forte influência da AMAS na taxa de falhas do tipo DSE (device single event) ocorridas em satélites (HARTMANN, 2005, appud. NICHITIU, 2004).

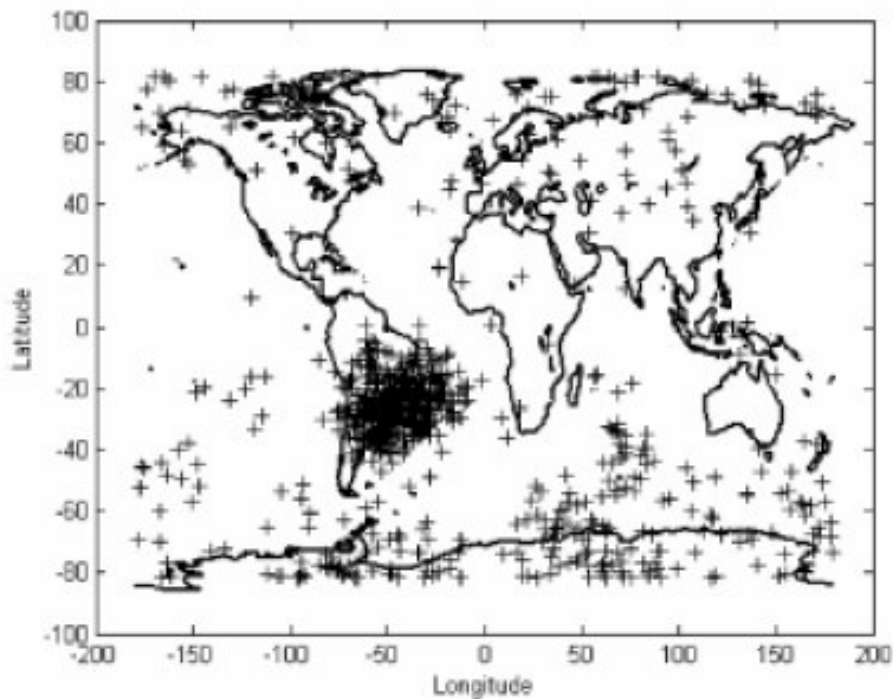


Figura 4: Distribuição geográfica de DSEs, extraído de Hartmann (2005, appud. NICHITIU, 2004).

5. CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO CÓSMICA

Agruparemos didaticamente, neste trabalho, as radiações cósmicas (RC) em três grandes categorias, devido às suas diferenças de origem e comportamento. A primeira será a RC de

origem solar, denominada simplesmente de RC solar ou RCS. A segunda englobará as outras origens de radiação cósmica externas ao sistema solar e será genericamente chamada de RC galáctica ou RCG. A terceira abrangerá partículas (principalmente prótons e elétrons) aprisionadas pelo campo magnético terrestre em órbitas fechadas nos conhecidos cinturões de Van Allen e será chamada de Radiação Aprisionada (RCA). As três categorias serão discutidas em maiores detalhes seguir.

A RCG distribui-se isotropicamente no espaço interestelar e é constituída predominantemente de partículas pesadas (98%) e leves (2%). As partículas pesadas são núcleos ionizados dos elementos da tabela periódica, sendo que, 87% são de hidrogênio, 12% de hélio e 1% dos demais núcleos mais pesados. As partículas leves são elétrons e pósitrons (BARTLET, 2004). Todas essas radiações não possuem direção definida e sofrem deflexão pelo campo magnético terrestre, bem como, se penetrarem na atmosfera terrestre perdem energia por ionização do ar. Ao colidirem com núcleos de nitrogênio e oxigênio da atmosfera terrestre causam um chuveiro de partículas secundárias de menor energia: nêutrons, píons, mésons, elétrons, fótons e outros prótons. Conforme sua energia ou massa, essas partículas interagem de diversas formas com moléculas da atmosfera terrestre, perdendo energia até serem finalmente freadas ou absorvidas na atmosfera ou, ainda, na crosta terrestre.

Dessa forma, a atmosfera terrestre provê uma camada de, aproximadamente, 1000g/cm^2 de ar, que causa uma atenuação da radiação inicial, de modo que a sua contribuição é menor que 10% da dose média total recebida pelos seres vivos na terra (HEINRICH, 1999). 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 como um escudo protetor, defletindo parte das partículas incidentes na terra. Entretanto, existe uma forte dependência da deflexão com a 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, 2005). Tal capacidade de deflexão das partículas é determinada por uma característica local do campo geomagnético denominada rigidez de corte.

A radiação cósmica solar (RCS) é produto da atividade solar, sendo dependente dela. O Sol possui um ciclo de atividade conhecido, com um período total de 22 anos, onde sua polaridade é invertida a cada 11 anos, sendo que a cada mudança de polaridade, o Sol passa por um ciclo de máximo e de mínimo em sua atividade. A frequência do surgimento de manchas solares (Sun spots) é dependente da fase do ciclo solar e 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 (SULLIVAN, 2002). Quando ocorrem grandes explosões solares, as partículas emitidas chegam à Terra e contribuem para o aumento da dose devida à radiação cósmica. Esses eventos, denominados Eventos de Partículas Solares ou Solar Particle Events (SPEs), são identificados por meio de uma rede de monitores de nêutrons e podem durar de horas até dias. Como exemplo, pode-se citar um grande evento deste tipo ocorrido em 23 de fevereiro de 1956, que aumentou os níveis de dose a cerca de 10 mSv/h a uma altitude de 20 km. 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”. Uma descrição do ciclo solar em termos de manchas solares e de contagens de nêutrons na terra é apresentada na Figura 5, indicando uma forte anti-correlação entre a radiação cósmica que atinge a terra e a atividade solar.

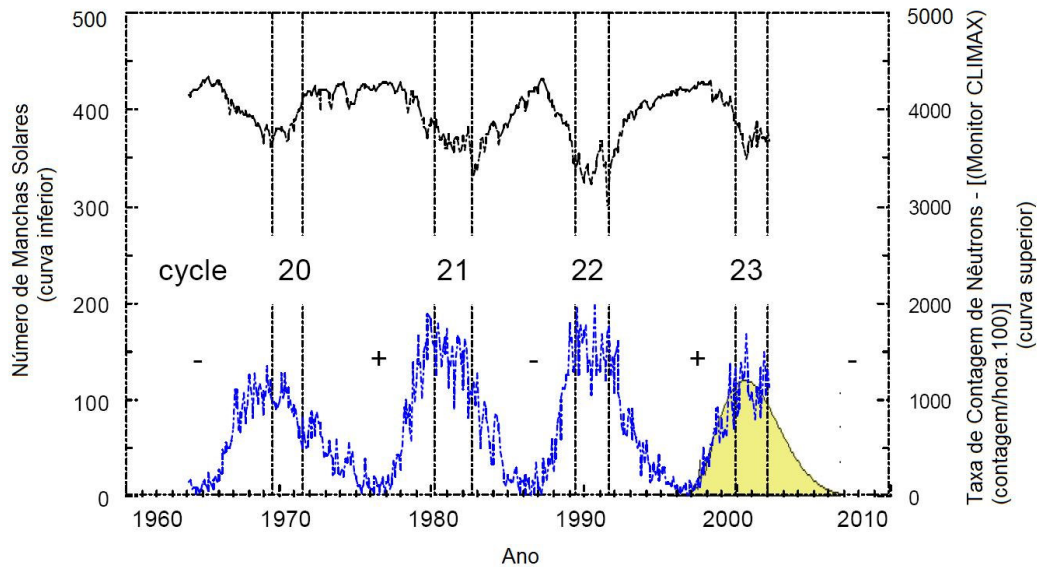


Figura 5: Taxa de contagem de nêutrons (curva superior) e do número de manchas solares (curva inferior) em função do tempo, extraído de EURADOS (2004).

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 mais baixa energia, de forma que a intensidade de raios cósmicos galácticos 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, 1997). Tal 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 2009), a época é de mínimo solar, que corresponde a um máximo de radiação cósmica galáctica.

As RCG que não são defletidas pelo campo magnético solar interagem com o campo magnético terrestre, onde podem ser defletidas pela força de Lorentz, a qual provoca uma curvatura em sua trajetória, com raio $r = R_p/B_p$, onde B_p é a componente do campo magnético terrestre perpendicular à direção do movimento e R_p é a rigidez magnética da partícula.

Conforme mencionado no início desta seção, o campo magnético terrestre é responsável pelo aprisionamento de partículas carregadas de baixa energia, principalmente elétrons e prótons e, em menor quantidade, íons pesados, formando os cinturões de Van allen. As partículas aprisionadas têm seu movimento caracterizado por três componentes: uma trajetória

helicoidal ao longo da linha de campo magnética, as reflexões, nos chamados pontos de reflexão polares e um movimento de deriva longitudinal ao redor da terra.

6. CAMPO GEOMAGNÉTICO E A ANOMALIA MAGNÉTICA

O campo magnético terrestre é responsável pela formação de linhas de campo e estruturas geomagnéticas, conforme pode ser observado na Figura 6.

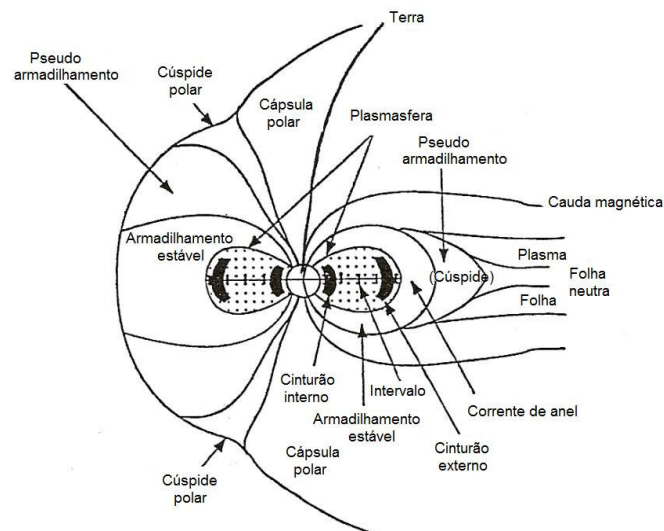


Figura 6: Linhas de campo magnéticas e regiões de interação da radiação de origem solar, extraído e adaptado de NCRP (2000).

Tais linhas de campo são afetadas pelo plasma da RCS de forma que sofrem uma deformação na direção do Sol. Tal deformação é resultado da compressão causada pelo vento solar, que produz um arco estacionário a uma distância de cerca de 15 raios terrestres médios (RT, sendo que 1 RT = 6.371 km). Tal distorção é sazonal e é devida, em parte, às assimetrias decorrentes da inclinação de 23,5 graus do dipolo em relação ao plano orbital da Terra e à diferença entre o eixo do dipolo e o eixo de rotação terrestre. Estas distorções 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, inclusive, a poder interferir com comunicações, satélites e aeronaves (LAURIENTE, 1995 e COSTA, 2004).

De acordo com Harthmann (2005), essa anomalia tem a sua origem principalmente explicada por um componente dipolar do campo geomagnético, porém parte dela (cerca de 10% a 20%) só é 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. Estudos (SABOIA, 2006) indicam também que o perfil da AMAS deve se ampliar bastante, podendo, em longo prazo, vir a cobrir mais da metade do hemisfério Sul.

Na Figura 7 pode-se observar a AMAS a uma altitude de 10 km, onde se verifica também que grande parte do território brasileiro, principalmente a costa sudeste, situa-se próximo ao centro da desta anomalia.

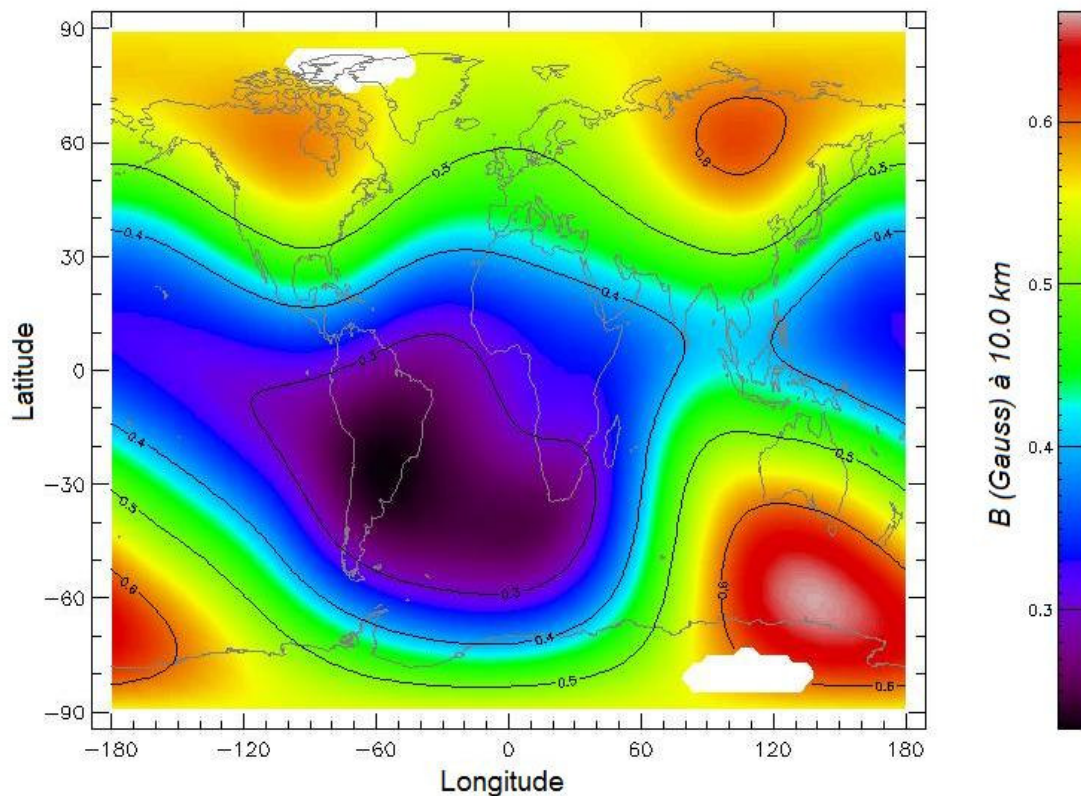


Figura 7: Mapa do campo magnético terrestre a uma altitude de 10 km, extraído de SPENVIS (2008).

7. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA COM A ATMOSFERA TERRESTRE

Conforme já mencionado na seção precedente, as partículas que constituem a radiação cósmica incidem no topo da atmosfera, colidindo com os átomos dos constituintes atmosféricos (Nitrogênio e Oxigênio, principalmente), causando ionizações e perdendo sua energia gradualmente. O processo de perda de energia ocorre por meio de colisões elásticas e inelásticas com os núcleos atômicos, gerando uma cascata de radiações secundárias de menor energia, conforme apresentado na Figura 8, onde são representadas as principais reações envolvidas na interação das partículas dos raios cósmicos primários com a atmosfera terrestre, dando origem aos raios cósmicos secundários. Estas radiações secundárias, além de prótons, nêutrons e fragmentos de núcleos, incluem partículas subnucleares instáveis ou partículas elementares, como mésons pi neutros e carregados (π^0 e $\pi^{+/-}$), anti-prótons e anti-nêutrons (\bar{p} e \bar{n}), mésons pesados ou kaons (K) e hyperons (Y) (HARTMAN, 2005 e OLIVEIRA, 2000).

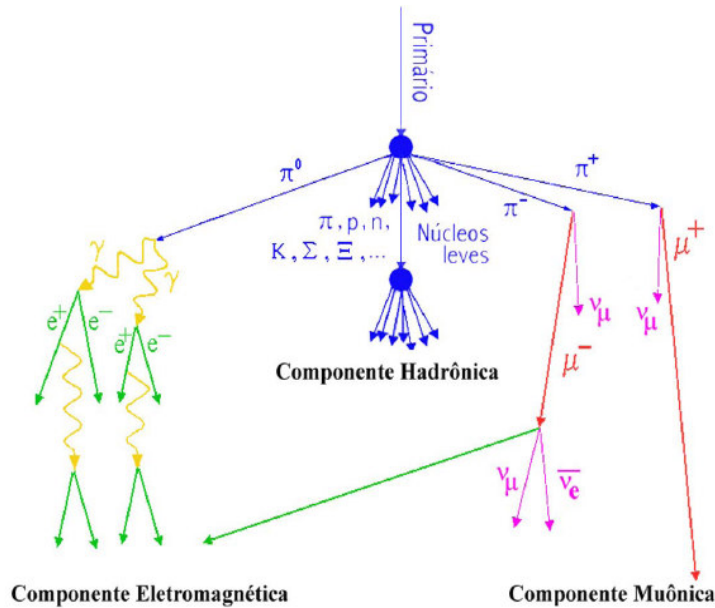


Figura 8: Representação das reações originadas pela interação da radiação cósmica, extraído de Brum (2004).

A composição da dose equivalente causada por radiação cósmica depende da evolução da cascata ao longo de sua penetração na atmosfera e, portanto, depende da altitude, conforme pode ser observado na Figura 9, onde é apresentada a 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. 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 e múons.

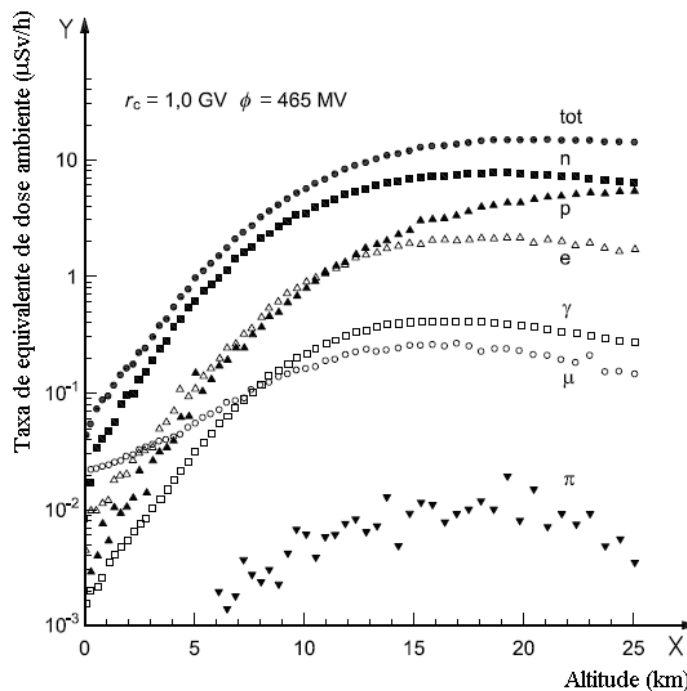


Figura 9: Taxa de equivalente de dose ambiente em função da altitude barométrica padrão (extraído da norma ISO 20785-1, 2006).

8. CONCLUSÕES

Pelo exposto e pelo crescente número de publicações recentes, observa-se que o assunto tem merecido um destaque crescente na comunidade científica internacional.

A existência da AMAS reforça a necessidade urgente de se efetuar estudos mais detalhados de forma a se conhecer as doses típicas recebidas por tripulações e pelos equipamentos de aeronaves no espaço aéreo brasileiro. O desenvolvimento de ferramentas de medida que permitam obter o conhecimento da taxa de dose de radiação no espaço aéreo brasileiro pode ser de utilidade no assessoramento de empresas aéreas e orientação de projetos de aeronaves no sentido de minimizar as doses de radiação nas tripulações e as proteções de falhas eletrônicas de equipamentos sensíveis. Observa-se que existem razões suficientes para justificar estudos mais detalhados da dose de radiação no espaço aéreo brasileiro, os quais estão sendo desenvolvidos no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA), com a participação de pesquisadores da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

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 AMAS, bem como verificar a adequação e confiabilidade dos resultados dos programas computacionais existentes, tendo em vista as particularidades dessa região.

Além da particularidade da AMAS, que afeta o espaço aéreo brasileiro, é preciso lembrar que as tripulações brasileiras também efetuam vôos internacionais e, portanto, adicionalmente estão sujeitas a doses semelhantes às aquelas recebidas por pilotos e tripulações de outras nacionalidades, reforçando a necessidade de maiores estudos no sentido de avaliar a necessidade de controles adicionais sobre a dose recebida pelas tripulações.

É importante que sejam feitos estudos e pesquisas com sólida base científica e ampla coleta de dados, que resultem em conclusões imparciais, seguras e confiáveis, antes que ações de proteção conservadoras, motivadas pelo temor, desconhecimento e pressão social possam acarretar ações regulatórias restritivas, com possíveis prejuízos ao setor aeronáutico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP e ao CNPQ pelo apoio financeiro parcial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves JG, Mairos JC. (2007) In-flight dose estimates for aircraft crew and pregnant female crew members in military transport missions. *Radiation Protection Dosimetry*. 125 (1-4): 433-437.
- Bartlett DT. (2004) Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. *Radiation Protection Dosimetry* 109(4): 349-355.
- Beck P, Bartlett D, Lindborg L, Mcaulay I, Schnuer K, Shraube H, Spurny F. (2006) Aircraft crew radiation workplaces: comparison of measured and calculated ambient dose equivalent rate data using EURADOS in-flight radiation data base. *Radiation Protection Dosimetry*. 118 (2): 182-189.

- Brum CGM (2004) 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.
- Claeys C, Simoen E. (2002) Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices. *Springer-Verlag*.
- CNEN (2005) Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Norma CNEN NN 3.01.
- Costa AM, Mendes Junior O. (2004) Anomalia magnética do atlântico sul e a radiação cósmica sobre a costa do Brasil, *Scientific American – Brasil*, 2(23).
- Courades JM (1999) European legislation on protection against cosmic radiation. *Radiation Protection Dosimetry*. 86 (4): 7-24.
- EURADOS (2004) Cosmic radiation exposure of aircraft crew. European Radiation Dosimetry Group Radiation Protection 140 of EURADOS Work Group 5, Directorate-General for Energy and Transport.
- FAA (1990) Radiation Exposure of Air Carrier Crewmembers. FAA Advisory Circular 120-52. U.S. Department of Transportation.
- Hajek M, Berger T, Vana N. (2004) A TLD-based personal dosimeter system for aircrew monitoring. *Radiation Protection Dosimetry* 110(1-4): 337-341.
- Hartmann GA (2005) 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.
- Heinrich W, Roesler S, Schraube H. (1999) Physics of cosmic radiation fields. *Radiation Protection Dosimetry*, 86(4): 253-258.
- Holmess-Siedle A, Adams L. (2002) *Handbook of Radiation Effects*. Segunda edição, Oxford University Press.
- IAEA (1996) International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. *Safety Series* 115. International Atomic Energy Agency.
- ICRP (1991) Recommendations of the international commission on radiological protection. *Annals of the ICRP* 21 (1-3), International Commission on Radiological Protection.
- ICRP (1998) General principles for the radiation protection of workers. *Annals of the ICRP* 27 (1), International Commission on Radiological Protection.
- ICRP (2008) The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. *Annals of the ICRP* 37 (2-4), International Commission on Radiological Protection.
- ISO (2006) ISO 20785-1 - Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircrafts - Part 1: conceptual basis for measurements. International Organization of Standardization. Geneva.
- Lauriente M, Vampola AL, Gosier K. (1995) Experimental validation of south atlantic anomaly motion using a two-dimensional cross-relation technique. Workshop of Radiation Belts: Models and Standards, Belgian Institute for Space Aeronomy, Brussels, Belgium.
- Lewis BJ, Bennett LGI, Green AR, Butler A, Desormeaux M, Kitching F, Maccall MJ, Ellaschuk B, Pierre M. (2005) Aircrew dosimetry using predictive code for aircrew radiation exposure (PCAIRE). *Radiation Protection Dosimetry*. 116(1-4): 320-326.
- Lim MK, Bagshaw M. (2002) Cosmic rays: are air crew at risk?. *Occupational Environment Medicine*. 59: 428-432.

- NCRP (2000) Radiation protection guidance for activities in low-earth orbit. National Council On Radiological Protection, NCRP Report 132.
- Normand E. (2004) Single event effects in avionics and on the ground. *Int Journal of High Speed Elect and Systems*, 14(2): 285-298.
- Oliveira MAL. (2000) Simulação de Chuveiros Atmosféricos Extensos e Métodos de Reconstrução de seus Parâmetros Fundamentais. Tese (doutorado), Universidade de Campinas, Campinas.
- Schrimpf RD, Fleetwood, D.M. (2004) *Radiation effects and soft errors in integrated circuits and electronic devices*. World Scientific Publishing Co.
- SPENVIS. Extraído de <http://www.spennis.oma.be> em 16/out/2008.
- Sullivan DO, Bartlett DT, Beck P, Botollier JF, Schrewe U, Lindborg L, Tommasino L, Zhou D. (2002) Recent studies on the exposure of aircrew to cosmic and solar radiation, *Radiation Protection Dosimetry* 100(1-4): 495-498.
- TRANSPORT CANADÁ (2001) Measures for managing exposure to cosmic radiation of employers working on board aircraft. Commercial and Business Aviation Advisory Circular 183.
- Tylka AJ, Adams JH, Boberg PR, Brownstein B, Dietrich WF, Flueckiger EO, Petersen EL, Shea MA, Smart DF, Smith EC (1997) CREME 96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code” *IEEE Transactions on Nuclear Science* 44(6).
- Wilson JW, Goldhagen P, Maiden DL, Tai H. (1998) High altitude radiations relevant to the high speed civil transport (HSCT). NASA Technical Documentation, NASA.
- Yong LC, Sigurdson AJ, Ward EM, Waters MA, Whelan EA, Petersen MR, Bhatti P, Ramsey MJ, Ron, E, Tucker JD. (2009) Increased frequency of chromosome translocations in airline pilots with long-term flying experience. *Occupational Environment Medicine* 66: 56-62.