

Aeronautas e radiação cósmica: aspectos físicos e jurídicos de uma alarmante exposição ocupacional

GABRIEL RÜBINGER-BETTI*

Advogado. Bacharel em Direito pela Universidade de Brasília.

GABRIEL SOUSA DINIZ†

Doutorando em física pela Universidade de Brasília.

Resumo

Estudos demonstram que a categoria dos aeronautas é ocupacionalmente exposta à radiação cósmica, mas pouco se discute no Brasil acerca dessa matéria. A radiação cósmica é um fenômeno natural que consiste de partículas de alta energia originárias do espaço. Ao adentrar a atmosfera terrestre, essas partículas produzem radiação ionizante, perigosa para a saúde humana. Os organismos internacionais de radioproteção consideram que a radiação cósmica na superfície da Terra deve ser desconsiderada para efeitos de regulamentação jurídica. Entretanto, aeronautas e passageiros frequentes de avião estão expostos a doses mais elevadas de radiação devido ao decaimento exponencial da densidade do ar, o que diminui a proteção existente no solo. Em voos isolados, esse excesso de radiação não é alarmante, mas, para aqueles em constante voo, a exposição ocorre de maneira contínua e elevada, o que representa uma série de riscos à saúde. Neste trabalho abordaremos os aspectos físicos e jurídicos da exposição ocupacional a radiação cósmica da categoria dos aeronautas e as mudanças necessárias para uma regulamentação mais adequada do fenômeno no Brasil.

Palavras-chave: Aeronautas; Radiação cósmica; Exposição ocupacional; Direito do Trabalho; Direito Previdenciário.

1 Introdução

Raios cósmicos são partículas de alta energia, podendo atingir energias superiores a 10^{20} eV (Elétron-Volt) (KOTERA e OLINTO, 2011), enquanto a energia alcançada pelo laboratório CERN com o LHC (Large Hadron Colider) está na ordem de grandeza de 10^{12} eV e a energia da radiação cancerígena ultravioleta está entre 3,10 e 124 eV. As partículas que viajam pelo espaço e que, ao atingirem a atmosfera

*E-mail: rubinger.g@gmail.com

†E-mail: gdiniz93@gmail.com

terrestre, promovem uma cascata de partículas em um amplo intervalo de energia. Produz-se, como resultado, radiação ionizante, que comporta uma série de riscos à saúde humana, por conta da alta carga energética desse fenômeno de origem cósmica. Ao atingir o tecido humano, por exemplo, a radiação ionizante pode gerar mutações celulares, uma das causas do câncer (RAFNSSON et al., 2001, p. 6).

Os seres humanos estão expostos à radiação cósmica tanto na superfície da Terra quanto no espaço. Na superfície da Terra, estamos expostos à chamada “radiação cósmica de fundo” (ou background radiation), em níveis que variam de acordo com características geográficas. Esses níveis geralmente não são considerados de risco, e são, via de regra, desconsiderados pelas entidades que regulamentam a radioproteção ao redor do mundo. No espaço, entretanto, os níveis de radiação são mais elevados. Diversos estudos prévios indicam que a dose de radiação recebida por aeronautas durante sua jornada de trabalho é suficiente para considerar a categoria como ocupacionalmente exposta (RAFNSSON et al., 2001, p. 6), despertando preocupações acerca de riscos à saúde. Embora essa questão já esteja sendo debatida há alguns anos por organismos internacionais e pela literatura científica (NIU, 2011, p. 40), o tema permanece pouco estudado no Brasil.

Este trabalho tem como objetivo explorar a questão da exposição ocupacional dos aeronautas à radiação cósmica, esclarecendo os aspectos físicos do fenômeno e as suas consequências jurídicas. Defende-se, em síntese, que a profissão de aeronauta deve ser considerada como ocupacionalmente exposta a radiações ionizantes, sobretudo em comparação com outras profissões em que também ocorre esse tipo de exposição, o que requer uma regulamentação jurídica urgente e a atenção dos organismos de radioproteção. O texto está organizado da seguinte maneira: a primeira seção tem como foco a explicação dos aspectos físicos da radiação cósmica e sua relação com as condições de trabalho da classe aeronauta. A seção seguinte elucida a atual regulamentação jurídica da proteção a radiações ionizantes na legislação regulatória, previdenciária e trabalhista. Finalmente, expõem-se as consequências jurídicas do tratamento da categoria dos aeronautas como ocupacionalmente exposta a radiações ionizantes, e as propostas para uma regulamentação mais adequada do fenômeno.

2 Ambiente e fenomenologia

2.1 O ambiente terrestre

Grande parte da cascata de partículas energéticas provenientes do meio intra- e intergaláctico é barrada pela densa atmosfera terrestre, pois durante a propagação das partículas há colisões com as moléculas atmosféricas que provocam a perda de energia das partículas cósmicas – parte dessas partículas, portanto, são freadas na atmosfera e não nos atingem. Outro mecanismo natural de proteção contra esse fenômeno é o campo magnético da Terra que desvia a trajetória de tais partículas desde grandes altitudes (>500 km), fazendo com que as partículas carregadas desviem sua trajetória da Terra.

Exemplificando a importância do campo magnético terrestre, é sabido que Marte possui uma atmosfera pouco densa se comparada com a Terra. Uma das causas para essa baixa densidade é a ausência de campo magnético marciano, o que permitiu que partículas de alta energia vindas do sol varresse a antiga atmosfera marciana (CHAMBERLAIN, 1978).

A densidade atmosférica decai de maneira exponencial com o aumento da altitude. Assim, maior quantidade de ar está concentrada em baixas altitudes. Trabalhos recentes, tal como Köhn et al. (2015), consideram a densidade atmosférica com uma escala de altura de 8,3 km (um decaimento exponencial com a altitude) – de modo que, nessa altitude, a densidade atmosférica possui aproximadamente 36% do seu valor em solo. Dessa forma, indivíduos em maiores altitudes estão protegidos por uma quantidade inferior de ar do que indivíduos no solo terrestre. Como a altitude de cruzeiro em voo comercial é em média 10 km (ver Figura 1), indivíduos em altitude de voo estão sem a proteção da parte mais densa da atmosfera.

No Brasil, há ainda um outro fator que contribui para uma maior incidência de partículas energéticas: a Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS). Esse fenômeno, que atualmente cobre grande parte do território brasileiro, consiste em uma chamada “região de mínimo” no campo magnético terrestre (DORMAN, 2009), o que provoca uma maior incidência de partículas de alta energia na região. Vários satélites, ao passar pela região, não são postos em funcionamento para evitar danos (SMITH et. al., 2005), ilustrada pela Figura 2. Por essa razão, há a possibilidade do espaço aéreo brasileiro possuir níveis maiores de radiação ionizante.

2.2 Raios cósmicos

Raios cósmicos, em geral, são compostos por prótons, partículas alfa e íons mais pesados (como núcleos de ferro), que atingem a Terra em uma taxa de aproximadamente $10^3 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (GAISSER, 1990). A origem dos raios cósmicos detectados da Terra varia de acordo com sua energia, mas a maior parte dessas partículas é proveniente da nossa própria galáxia.

O Sol é particularmente uma fonte constante de raios cósmicos que atingem a atmosfera da Terra, compostos em sua maioria por prótons. Outras fontes de raios cósmicos galácticos são antigas supernovas que ocorreram dentro da Galáxia. Por sua vez, as partículas mais energéticas, os chamados “raios cósmicos ultrarrelativísticos” (ou seja, com velocidade próxima à da luz) não possuem origem definida atualmente, embora se saiba que sua fonte é extragaláctica. A transição, em termos de energia, para raios cósmicos galácticos e extragalácticos está entre 10^{15} eV e 10^{18} eV, um intervalo grande de energia, que reflete a dificuldade na determinação das fontes desse fenômeno (KOTERA e OLINTO, 2011). Apesar das energias ultra relativísticas que os raios cósmicos podem alcançar, o seu espectro mostra que a componente mais abundante que atinge a Terra possui energia na ordem de 0.1-100 GeV. Isso demonstra que eles são produzidos por fontes no meio interestelar local, as vizinhanças espaciais como o Sol e outras fontes dentro da Galáxia (GAISSER, 1990).

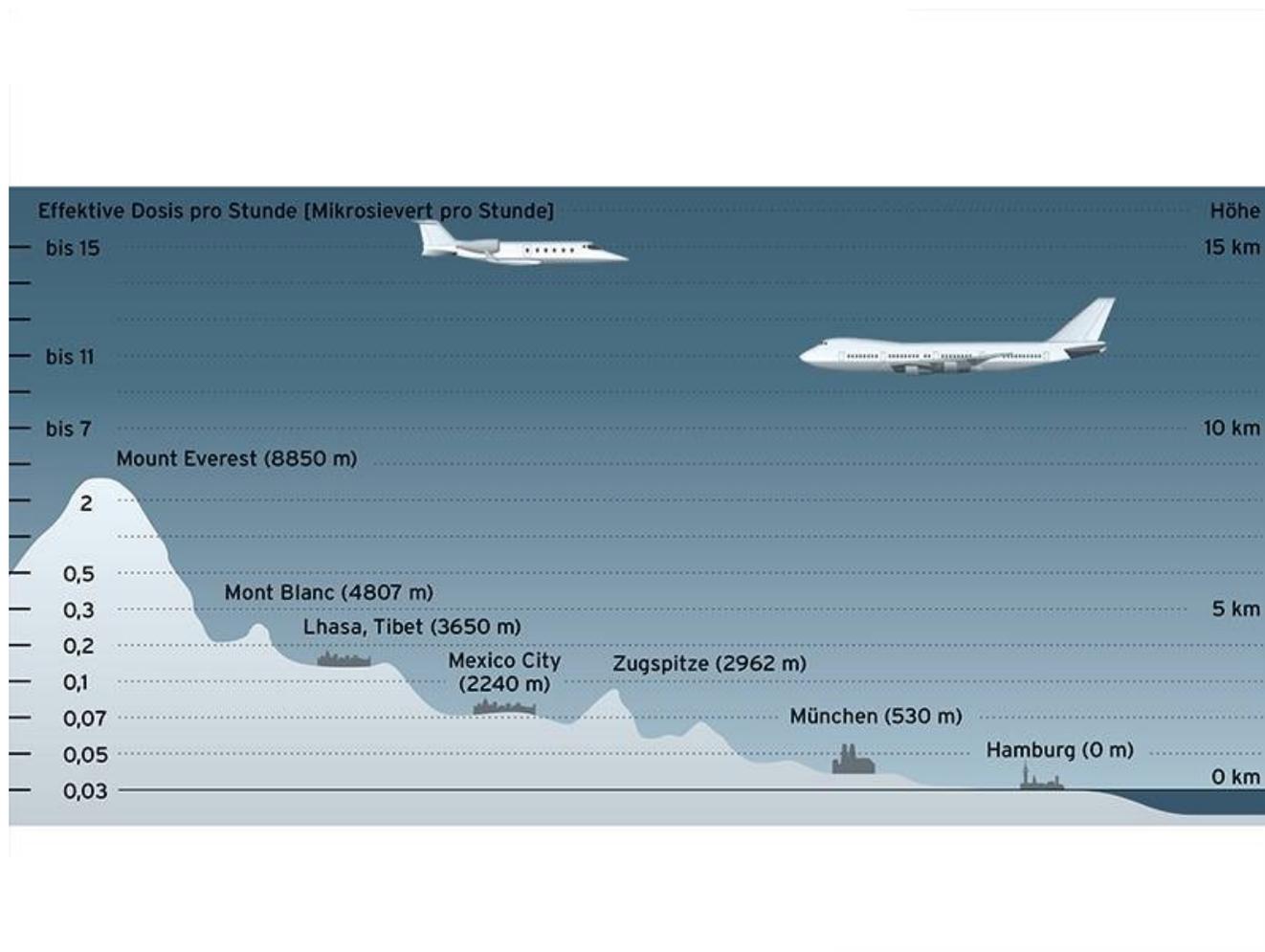


Figura 1: Ilustração da altitude típica de um voo comercial em comparação com a dose efetiva de radiação ionizante por hora (em $\mu\text{Sv}/\text{hora}$). Retirada de: <http://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/beruf/methodik/fliegendespersonal.html>. Acessado em 20 de dezembro de 2016.

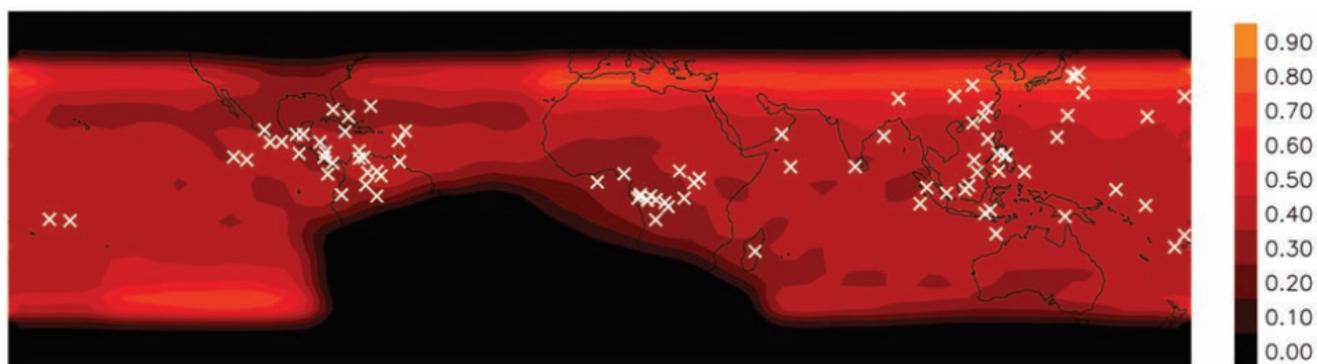


Figura 2: Painel das detecções de satélite por Smith et al. (2005) sobrepostas ao mapa de densidade de ocorrência de relâmpagos. A área negra constitui a região onde as detecções não foram possíveis pelo risco de danos ao satélite – correspondendo a região da AMAS. FONTE: SMITH et al. (2005)

O chuva de partículas gerado pelos raios cósmicos na atmosfera terrestre acontece devido a colisões entre esses raios energéticos e partículas de ar da atmosfera neutra. Como partículas geradas por essas colisões ainda possuem energia muito grande – embora, por força da conservação da energia, a energia se distribua pelas partículas do chuva sem aumentar seu valor total –, o número de partículas cresce ainda mais durante o caminho dos raios cósmicos até a Terra, promovendo o que se chama de *air extensive shower*, que consiste justamente no produto das colisões entre os raios cósmicos e a atmosfera neutra.

Pela incapacidade da atmosfera de barrar todas as partículas, a taxa de radiação na superfície da Terra gira em torno de 1 mSv por ano (BARTLETT, 2004), sendo Sv a unidade Sievert, que mede a quantidade de radiação ionizante recebida. Assim, a radiação cósmica é uma radiação ionizante produzida pelos raios cósmicos. Os níveis de radiação cósmica variam de acordo com características geográficas e sofrem alterações com a ocorrência de fenômenos espaciais.

Como vimos, a proteção contra a radiação cósmica diminui de acordo com o aumento da altitude, o que faz com que os aeronautas sejam um grupo especialmente vulnerável, sobretudo no Brasil, em que existe o fenômeno da AMAS, que provoca uma maior incidência de partículas energéticas. Como a radiação cósmica é uma radiação ionizante, essa exposição pode causar uma série de riscos à saúde e à integridade física desses profissionais.

2.3 Níveis de exposição dos aeronautas à radiação

Os aeronautas estão expostos a níveis maiores de radiação cósmica em comparativo com o público em geral na superfície da Terra, por estarem protegidos por uma camada menor da atmosfera. A dose de radiação recebida varia de acordo com a altura, duração e rota do voo; outras características físicas, como a atividade solar, também influenciam. Poucos estudos, entretanto, traçam um comparativo entre as doses de radiação recebidas pelos aeronautas e as doses recebidas em outras profissões.

Em seu trabalho pioneiro, Gundestrup e Storm (1999) estimaram que os aeronautas recebem uma dose anual média de 3-6 mSv por ano, sendo que a dose para 950 horas de voo pode variar no espectro de 0,2-9,1 mSv. Benett et al. (2013, p. 103), em um estudo feito com pilotos no Canadá no ano de 2009, indicou que a categoria recebe uma dose média anual de 3 mSv.

Dados de entidades oficiais de diferentes países da Europa, sob supervisão da Organização Internacional do Trabalho, indicaram que os aeronautas estiveram expostos a doses médias anuais que variam de 1,09-2,55 mSv, podendo, no entanto, chegar a níveis superiores a 6 mSv/ano (NIU, 2011, p. 40).

Um dos estudos mais apurados sobre o tema é o relatório emitido em outubro de 2015 pelo Departamento de Radioproteção da Alemanha (Bundesamt für Strahlenschutz), sob a coordenação de Frasch et al., intitulado “A exposição ocupacional à radiação na Alemanha em 2013-2014” (Die berufliche Strahlenexposition in Deutschland 2013-2014), que apresenta e analisa os resultados da monitoração das doses de radiação recebidas pelas profissões ocupacionalmente expostas ao fenômeno naquele país. 358.000 trabalhadores foram monitorados por meio de dosímetros individuais e 45 companhias aéreas calcularam a dose recebida por 39.500 aeronautas por meio de programas computacionais certificados.

Os resultados apontaram uma dose média anual de 0,050 mSv para os trabalhadores em geral, monitorados individualmente, o que corresponde a menos de 3% do limite superior anual de 20 mSv estabelecido pela legislação internacional. Em contraste, a dose média individual relativa à classe dos aeronautas detectada nesse período foi de 1,89 mSv/ano (FRASCH et al., 2015). O relatório demonstra que a profissão de aeronauta foi considerada a profissão exposta aos maiores níveis de radiação, em doses superiores a profissões da área da medicina (como a profissão de radiologista) e da engenharia nuclear, o que é ilustrado com clareza pela Figura 3. A única ressalva a ser feita é a presença, naquele país, de um grupo específico de trabalhadores da mineração de urânio na empresa Wismut, os quais estão sujeitos a níveis superiores atípicos de radiação.

Outro relatório emitido pelo mesmo órgão da administração alemã, intitulado “A exposição ocupacional à radiação da tripulação de voo na Alemanha em 2004-2009” (Die berufliche Strahlenexposition des fliegenden Personals in Deutschland 2004–2009), também afirma que a profissão de aeronauta está entre as profissões com maior exposição ocupacional à radiação. Em 2009, a dose média de radiação recebida por um aeronauta naquele país foi de 2,9 mSv (FRASCH et al., 2011, p. 5).

Federico, em tese de doutorado defendida em 2011, estima que a dose média anual recebida por aeronautas que operam na região da América do Sul e Caribe varia entre 1,45 mSv e 1,67 mSv, podendo chegar a níveis de 2,31 mSv a 2,73 mSv (2011, p. 153). Em outro trabalho sobre o mesmo tema, o autor ressalta a urgência de se avaliar as doses recebidas pela tripulação de voo no Brasil, uma vez que as estimativas iniciais indicam que a aviação comercial pode facilmente exceder os limites de 1 mSv/ano (FEDERICO et al. 2010, 143).

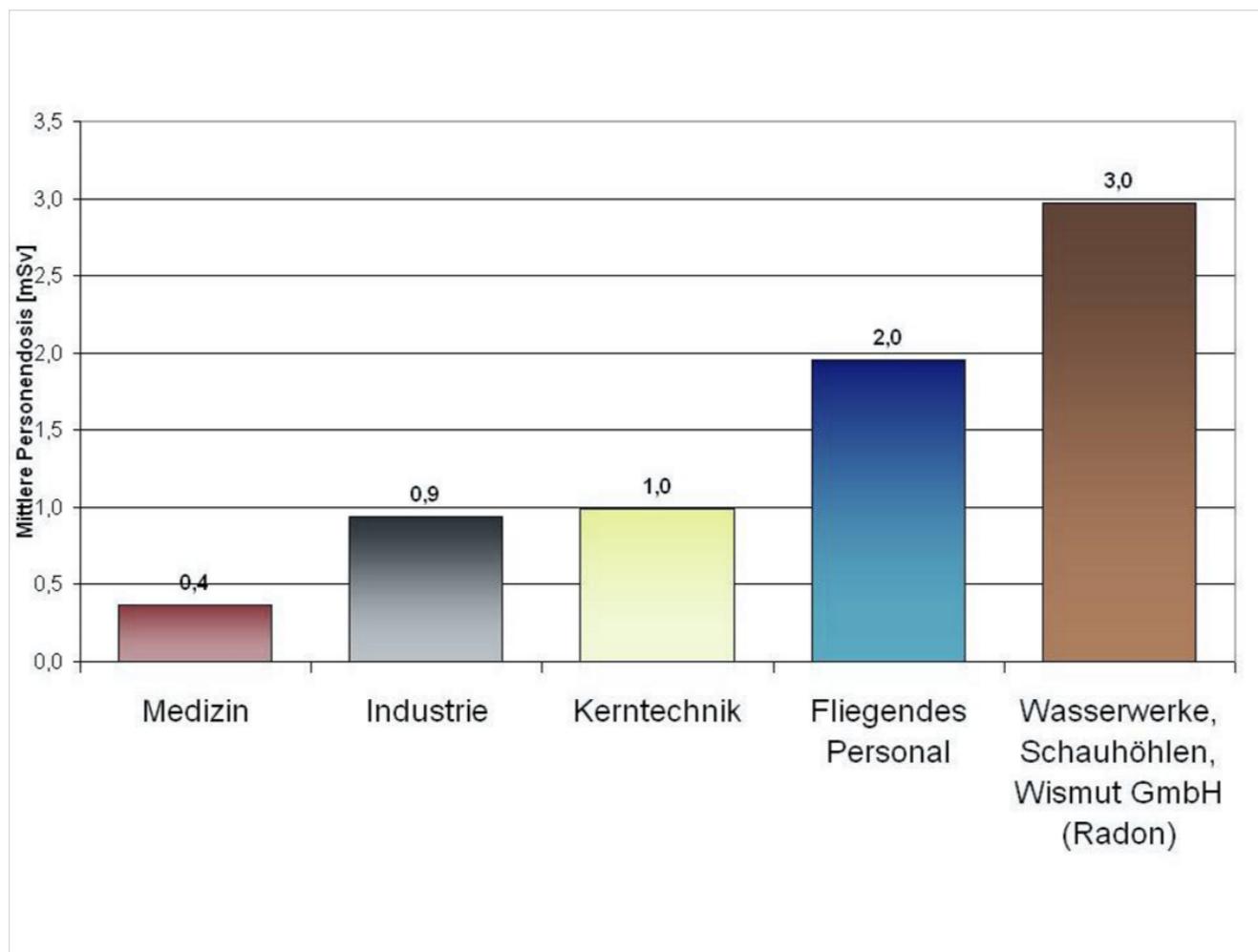


Figura 3: Dose média anual de radiação ionizante para diferentes categorias, em mSv/ano. Tradução livre: medicina, indústria, engenharia nuclear, aeronautas, manipulação de radônio na empresa Wismut Ltda. Disponível em: <http://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/beruf/methodik/fliegendespersonal.html>. Acessado em 20 de dezembro de 2016.

Todos esses trabalhos indicam que, em um ambiente em que não há medidas de controle das doses de radiação recebida, a categoria dos aeronautas está ocupacionalmente exposta à radiação cósmica (e, portanto, radiação ionizante), em níveis superiores tanto ao limite do público em geral quanto aos níveis de exposição de quase todas as profissões com exposição à radiação ionizante.

A questão que se levanta nesse momento é a seguinte: considerando a evidente exposição ocupacional à radiação, quais são os possíveis riscos à saúde que essa exposição pode representar e qual é a regulamentação internacional do fenômeno?

2.4 Regulamentação do fenômeno ao redor do mundo

Ao redor do mundo, a exposição ocupacional a radiações ionizantes desperta uma grande atenção de organismos internacionais e, nas últimas décadas, a questão da exposição dos aeronautas à radiação cósmica tem sido levantada com alguma frequência em âmbito internacional.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (International Commission on Radiological Protection - ICRP), organização internacional sem fins lucrativos cuja atuação na radioproteção está entre as mais importantes do mundo¹, aprovou em março de 2016 uma publicação exclusivamente sobre a proteção radiológica da radiação cósmica na aviação (ICRP Publication 132 - Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation).

A publicação da ICRP evidencia que a exposição a radiações cósmicas na aviação não pode ser ignorada, afirmando que os aeronautas não somente são expostos ocupacionalmente à radiação, mas também exercem uma das profissões com maiores níveis de exposição à radiação (LOCHARD et al., p. 43). Entre as conclusões do estudo, destaca-se a urgência em divulgar os riscos da radiação cósmica para a sociedade civil e, em especial, para os passageiros frequentes, inclusive com recomendações aos passageiros frequentes de que passem a monitorar a dose de radiação recebida.

No caso dos aeronautas, a Comissão recomenda que se mantenha um nível de referência de exposição entre 0,5 e 1 mSv/ano. Como existem muitos limites práticos à adequada otimização da proteção radiológica na aviação, a ICRP defende que a monitoração e controle da dose individual, para que esta se mantenha abaixo desse nível de referência, mostram-se como a opção mais efetiva para a proteção da saúde dos aeronautas (LOCHARD et al., p. 43).

Na União Europeia, o art. 42^o da Diretiva 96/29/EURATOM, emitida pela Comunidade Europeia da Energia Atômica e adotada por todos os países-membros da União Europeia, estabelece que as companhias aéreas devem monitorar a exposição dos aeronautas, informando os riscos que a radiação cósmica

¹Tamanha é a importância da ICRP na radioproteção mundial que a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), composta atualmente por 168 países (inclusive o Brasil), adota as recomendações emitidas pela ICRP como normas e diretrizes, que então são adotadas pelos países membros na legislação doméstica.

representa para a saúde, reduzindo as doses recebidas por tripulações muito expostas, e aplicando um regime de proteção especial durante a gravidez e amamentação.

No Canadá, todo aeronauta que receber uma dose anual superior a 1 mSv/ano deve ser considerado ocupacionalmente exposto à radiação cósmica. A regulamentação do fenômeno, como pode ser verificado no Commercial and Business Aviation Advisory Circular No. 0138R de 2006, também prescreve no sentido de monitorar e registrar as doses recebidas pelos aeronautas, informar os riscos potenciais da exposição, e proteger especialmente a gestante.

2.5 Saúde do aeronauta

A problemática da exposição de aeronautas à radiação cósmica também despertou o interesse e a preocupação de pesquisadores na área da medicina. Embora ainda se discuta, do ponto de vista científico, a correlação entre câncer e radiação cósmica, já foram publicados numerosos estudos correlacionando problemas de saúde da categoria dos aeronautas com a exposição ocupacional à radiação.

Um estudo realizado na Dinamarca com 3877 aeronautas (dos quais 3790 eram do sexo masculino) demonstrou um elevado risco de leucemia mieloide aguda e câncer em pilotos de jato do sexo masculino com mais de 5.000 horas de voo e, de maneira geral, um risco elevado de câncer de pele em aeronautas dinamarqueses do sexo masculino. O estudo indicou a exposição à radiação cósmica como a principal causa para o alto índice de câncer, provavelmente por conta da alta carga energética do fenômeno (GUNDESTRUP e STORM, 1999, p. 3).

No mesmo sentido, uma pesquisa islandesa investigou a correlação entre a exposição dos aeronautas a raios cósmicos e risco de desenvolvimento de melanoma e câncer de mama, em um espaço amostral de 1690 aeronautas, dos quais 158 eram do sexo masculino e 1532 do sexo feminino. O estudo constatou riscos mais elevados de câncer em geral e, especialmente, de câncer de mama, por conta da exposição a radiações cósmicas (RAFNSSON et al., 2001, p. 6). Por exemplo, relatou-se na pesquisa 7 casos de melanoma maligno, enquanto a quantidade esperada (i.e., do público geral) seria de 2,34 (RAFNSSON et al., 2001, p. 3).

Outro amplo estudo, empreendido na Suécia com 3202 aeronautas (2956 do sexo feminino e 632 do sexo masculino), indicou um risco de câncer mais elevado do que no público em geral, sendo que a exposição à radiação cósmica foi considerada a causa mais provável (LINNERSJÖ et al., 2003, p. 813-814). Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos, como Rafnsson e Tulinius (2000) e Hammer et al. (2012).

Mesmo que seja necessária uma maior produção de estudos para que se possa comprovar, do ponto de vista científico, a conexão entre exposição à radiação cósmica e a ocorrência de câncer – como defende o estudo recente de Di Trollo et al. (2015, p. 1132) –, é certo que se deve manter a dose de radiação

recebida pelos aeronautas no nível mais baixo possível, ainda que por precaução, em consonância com as recomendações mais recentes da Comissão Internacional de Proteção Radiológica e com a tendência do ambiente regulatório mundial exposta no tópico anterior.

3 Regulamentação jurídica da proteção à radiação ionizante no Brasil

3.1 Âmbito regulatório: normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear

A Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência e Tecnologia, é o órgão responsável no Brasil pela emissão de normas jurídicas que regulamentam os mecanismos de proteção e o uso da radiação ionizante. No atual estado da arte regulatório, há uma série de normas editadas pela CNEN (NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica) que estabelecem, para todos os efeitos legais, os requisitos básicos de proteção radiológica em relação à exposição à radiação ionizante.

A Norma 3.01 da CNEN é aplicável aos casos em que há exposição ocupacional do indivíduo (art. 1.2.3) à radiação ionizante, ou seja, em situações de exposição normal ou potencial decorrentes de seu trabalho a qualquer espécie de fonte radioativa, inclusive a natural. A radiação cósmica da superfície do local é desconsiderada para fins regulatórios (art. 1.2.2 c/c art. 3.36). A norma prescreve que qualquer ação envolvendo práticas ou fontes associadas a essas práticas só pode ser realizada em conformidade com determinados requisitos de segurança, a não ser que a exposição seja excluída do controle regulatório da CNEN ou que a fonte esteja isenta ou dispensada de controle (art. 5.1).

Os conceitos de “fonte” e “prática”, em sua acepção técnica, são definidos conforme o art. 3 da Norma 3.01 da CNEN. Fonte é todo “equipamento ou material que emite ou é capaz de emitir radiação ionizante ou liberar substâncias ou materiais radioativos” (art. 3.40). Caso emitam radiação naturalmente, são consideradas fontes naturais – por exemplo, a radiação cósmica e a radiação produzida por minerais como o urânio (art. 3.41).

Prática, segundo a definição da Norma, é “toda atividade humana que introduz fontes de exposição ou vias de exposição adicionais ou estende a exposição a mais pessoas, ou modifica o conjunto de vias de exposição devida a fontes existentes, de forma a aumentar a probabilidade de exposição de pessoas ou o número de pessoas expostas” (art. 3.59). As práticas que envolvam exposição a fontes naturais de radiação são englobadas pela Norma, mas apenas nas hipóteses em que o controle da exposição seja considerado necessário pela CNEN (art. 1.2.2, b). A Posição Regulatória 3.01/001:2011 trata dos critérios de exclusão, isenção e dispensa da aplicação de requisitos de proteção radiológica, ou seja, das hipóteses em que a CNEN não considera necessário intervir para controlar a exposição.

A Posição Regulatória 3.01/001:2011 considera como excluídas do escopo da Norma 3.01 as exposições cuja intensidade ou probabilidade de ocorrência não possa ser excluída por ações de proteção radiológica, além dos casos que a CNEN vier a considerar como excluídos de seu controle (art. 3.1 da Posição Regulatória). A isenção, por sua vez, é aplicável a práticas que, por conta dos baixos níveis de radiação envolvidos, se enquadrem nos critérios de isenção estabelecidos pela Posição Regulatória (art. 3.2 da Posição Regulatória). Os princípios gerais de isenção são: a) o risco individual associado à radiação é irrelevante; b) o impacto coletivo das práticas é suficientemente baixo, de forma a não necessitar o cumprimento de requisitos de proteção radiológica; c) as práticas e fonte isentas devem ser intrinsecamente seguras, com probabilidade irrelevante de cenários não conformes com os princípios "a" e "b" (arts. 3.2.1 e 3.2.3, a, b e c, da Posição Regulatória).

Todas as práticas que estejam dentro do escopo da Norma 3.01 da CNEN devem obedecer com precisão às determinações da Norma. Justamente por conta do risco inerente às práticas que envolvam fontes de radiação, a Norma estabelece uma série de requisitos para que essas práticas ocorram. Entre esses requisitos, destaca-se a necessidade de elaboração de um Plano de Proteção Radiológica que descreva as fontes de radiação, demonstre a otimização da proteção radiológica ou sua dispensa, forneça dados acerca da jornada de trabalho dos IOE (Indivíduos Ocupacionalmente Expostos), bem como a estimativa das doses anuais para os IOE e para indivíduos do público, além de controle médico dos IOE, entre outros (art. 5.3.8, e, f, g, h e l). Percebe-se, portanto, que a legislação determina uma expressiva precaução para o desenvolvimento de qualquer atividade laboral com exposição à radiação ionizante.

Nesse sentido, a Norma 3.01 estabelece que "nenhuma prática será aceita pela CNEN, a não ser que a prática produza benefícios, para os indivíduos expostos ou para a sociedade, suficientes para compensar o detrimento correspondente [...]" (art. 5.4.1.1). Como não existe nível de exposição à radiação que seja absolutamente seguro, a legislação, seguindo uma tendência mundial, impõe que esse nível seja otimizado, de forma que a exposição em termos de dosagem, número de pessoas expostas e probabilidade de ocorrência de exposições seja a menor possível, tendo em conta os fatores econômicos e sociais (art. 5.4.3.1).

Como medida de controle, a Norma 3.01 estabelece, em seu art. 5.4.2, os níveis máximos de dose individual permitidos por lei. As doses anuais recebidas pelos indivíduos não podem, a não ser em circunstâncias especiais autorizadas pela CNEN, e ressalvadas as exposições médicas, ultrapassar os limites da Tabela 1.

Dessa forma, a exposição ocupacional à radiação ionizante não pode ultrapassar os limites de 20 mSv/ano em 5 anos consecutivos ou exceder o limite de 50 mSv em qualquer ano. Além disso, mulheres grávidas não podem receber mais do que 1 mSv durante o período de gestação, e que indivíduos com menos de 18 anos de idade não podem estar sujeitos a exposições ocupacionais (arts. 5.4.2.1, 5.4.2.2 e 5.4.2.3).

A legislação atualmente em vigor, como esperado, não aborda com clareza a questão da exposição ocupacional à radiação cósmica na atmosfera em altitudes de voo comercial. O art. 3.2.1 da Posição

Tabela 1: *Limites de doses anuais.*

Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv	1 mSv
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

Regulatória 3.01/001:2011 exclui da aplicação das normas a radiação cósmica na superfície da terra. No mesmo sentido, a Posição Regulatória considera como isenta a prática ou fontes associadas a práticas em que a dose efetiva esperada a ser recebida por qualquer indivíduo do público por conta dessa prática ou fonte seja inferior a 1 mSv em qualquer período de um ano (art. 3.2.4, a).

Este não é o caso da radiação cósmica recebida pelos aeronautas, cujos níveis de exposição facilmente superam o limite de 1 mSv/ano para um IOE, estando acima da isenção legal. Além disso, a omissão por parte das normas emitidas pela CNEN acerca da radiação cósmica na atmosfera não deve ser interpretada em desfavor do trabalhador exposto à radiação, tendo em vista os riscos advindos da exposição a qualquer fonte radioativa.

Assim, embora a radiação cósmica seja considerada uma fonte natural, a exposição ocupacional à radiação cósmica na altitude de voo comercial, tal como a que ocorre no caso dos aeronautas, é uma prática que introduz vias de exposição adicionais, em níveis bastante superiores à radiação na superfície da terra, conforme tratamos na seção anterior. Isto enseja o mesmo tratamento jurídico dispensado a outras profissões em que ocorre exposição à radiação ionizante, como o caso dos radiologistas, justamente porque a exposição dos aeronautas é equiparável (e, via de regra, maior) do que a dessas profissões.

3.2 Normas de Direito Previdenciário

No âmbito do Direito Previdenciário, a exposição à radiação ionizante dá ensejo a uma espécie diferenciada de aposentadoria – a aposentadoria especial – ou a uma contagem diferenciada do tempo de contribuição. Também é necessário mencionar que, quando a exposição é causadora de acidente de trabalho ou doença ocupacional, é possível que sejam devidos outros benefícios previdenciários de caráter acidentário, mas estes não serão abordados no presente artigo por exigirem uma análise mais detalhada.

A aposentadoria especial é uma espécie de aposentadoria destinada aos trabalhadores que exercem suas atividades expostos a condições prejudiciais à saúde ou à integridade física e tem como principal característica a redução de tempo de serviço necessário à aposentadoria. A depender do agente nocivo, a aposentadoria especial será concedida após 15, 20 ou 25 anos de serviço, conforme dispõe o art. 57 da Lei nº 8.213/91, e a relação desses agentes nocivos se encontra no Anexo IV do Decreto nº 3.048/99.

Além de reduzir o tempo necessário para passar à inatividade, o valor do benefício de aposentadoria especial equivale à integralidade do salário-de-benefício, conforme o art. 57, §1º, da Lei nº 8.213/91. Não incide, portanto, nenhuma fórmula de redução do valor do benefício futuro, como o fator previdenciário, e por isso a aposentadoria especial, se comparada com outras espécies de aposentadoria, tende a ser mais benéfica do ponto de vista financeiro ao trabalhador. Essa aparente “posição vantajosa” para as aposentadorias especiais nada mais é do que uma contrapartida aos danos à saúde e à integridade física causados por essas profissões, garantia prevista no art. 201, §1º, da Constituição Federal.

Para que a aposentadoria especial seja concedida, é necessária a comprovação da exposição aos agentes nocivos, segundo o art. 57, §3º da Lei nº 8.213/91. Esta comprovação de atividade especial, no entanto, não é uma questão simples, em virtude das incontáveis alterações legislativas acerca da matéria. De maneira resumida, para comprovar a atividade especial exercida em período anterior a 05/03/1997, exige-se apenas o enquadramento da atividade nas relações dos anexos dos Decretos nº 53.831/64 e nº 83.080/79. Como tanto a radiação ionizante quanto a profissão de aeronauta estavam presentes nas relações desses Decretos, pode-se considerar qualquer atividade exercida por aeronautas em período anterior a 05/03/1997 como atividade especial.

A partir de 05/03/1997, no entanto, exige-se comprovação da efetiva exposição aos agentes nocivos, o que pode ser feito por meio de diversos laudos ou formulários, a depender da época. Atualmente, o formulário responsável por essa comprovação é o Perfil Profissiográfico Previdenciário, que contém informações detalhadas acerca do ambiente de trabalho, o agente ao qual o trabalhador está exposto, os níveis de exposição, entre outros.

A radiação ionizante está presente no rol de agentes nocivos que dão ensejo à aposentadoria especial do Anexo IV do Decreto nº 3.048/99, sendo classificada como “agente físico”, sob o código 2.0.3. Segundo o que dispõe a norma, a exposição à radiação ionizante dá ensejo a uma aposentadoria após 25 anos de contribuição, nas seguintes atividades: a) extração e beneficiamento de minerais radioativos; b) atividades em minerações com exposição ao radônio; c) realização de manutenção e supervisão em unidades de extração, tratamento e beneficiamento de minerais radioativos com exposição às radiações ionizantes; d) operações com reatores nucleares ou com fontes radioativas; e) trabalhos realizados com exposição aos raios Alfa, Beta, Gama e X, aos nêutrons e às substâncias radioativas para fins industriais, terapêuticos e diagnósticos; f) fabricação e manipulação de produtos radioativos; g) pesquisas e estudos com radiações ionizantes em laboratórios.

Para a legislação regulatória, estudada no tópico anterior, a radiação ionizante de origem cósmica é uma fonte radioativa. Assim, a exposição à radiação cósmica pode ser considerada, para efeitos de enquadramento nas atividades do Anexo IV do Decreto nº 3.048/99, sob a alínea “d” do código 2.0.3, ou seja, “operações com reatores nucleares ou com fontes radioativas”.

O código 2.0.0 do Anexo IV do Decreto nº 3.048/99 estabelece que os agentes físicos dão ensejo à aposentadoria especial quando ocorrer exposição acima dos limites de tolerância especificados ou, quando

houver atividades descritas, no mero exercício dessa atividade. Como vimos, no caso das radiações ionizantes, o Anexo IV descreve uma série de atividades, não mencionando limites de tolerância. Para o Decreto nº 3.048/99, portanto, o exercício de qualquer uma das atividades acima mencionadas durante 25 anos, de maneira não intermitente nem ocasional, é suficiente para garantir uma aposentadoria especial. No entanto, a Instrução Normativa nº 77 de 2015, do Instituto Nacional do Seguro Social, norma de caráter infralegal cujo objetivo seria regulamentar no âmbito administrativo as disposições da Lei nº 8.213/91 e do Decreto nº 3.048/99, estabelece em seu art. 282, II, que a exposição ocupacional às radiações ionizantes, após 06/03/1997, só caracteriza período especial quando forem ultrapassados os limites de tolerância estabelecidos no Anexo 5 da NR-15 do MTE.

Temos aqui uma situação de reprovável inépcia legislativa, pois o Anexo 5 da NR-15 do MTE, ao definir “limites de tolerância”, remete aos níveis estabelecidos pela Norma 3.01 da CNEN. Conforme exposto na seção anterior, a atual redação Norma 3.01 não trata de limites de tolerância, mas de doses máximas, acima das quais não pode haver qualquer atividade.

Assim, o art. 282, II, da IN nº 77 do INSS vai de encontro aos princípios mais básicos de proteção ao trabalhador, exigindo que ele desenvolva seu trabalho sob risco extremo à saúde, além de ser insustentável do ponto de vista jurídico, já que a Norma 3.01 da CNEN não permite que haja atividade laboral acima dos limites de tolerância estabelecidos pela lei. Impõe-se, portanto, que a aplicação desse dispositivo seja afastada, por contrariar os próprios requisitos contidos na legislação.

Pela atual legislação previdenciária, somente existe direito à aposentadoria especial quando comprovados 25 anos de exposição contínua a agentes nocivos. Contudo, o trabalhador que não possui tempo especial suficiente para requerer uma aposentadoria especial pode aproveitar o tempo especial para uma outra aposentadoria, se beneficiando de uma contagem diferenciada. A fórmula é simples: multiplica-se o tempo especial por 1,2 para mulheres e 1,4 para homens, conforme o art. 70 do Decreto no 3.048/99. Assim, a título de exemplo, um homem que trabalhou durante 10 anos exposto à radiação ionizante não poderá requerer uma aposentadoria especial, mas poderá converter esse tempo especial para comum, utilizando o tempo resultante da conversão (14 anos) em uma aposentadoria por tempo de contribuição.

3.3 Normas de Direito do Trabalho

A Constituição Federal estabelece como direitos básicos do trabalhador a redução dos riscos inerentes ao trabalho por meio de normas de saúde, higiene e segurança (art. 7º, XII) e o recebimento de adicional de remuneração para as atividades penosas, insalubres ou perigosas (art. 7º, XIII), além de proibir o trabalho insalubre para menores de 18 anos (art. 7º, XXXIII). A regulamentação dos adicionais de insalubridade e periculosidade é feita pela Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), Decreto-Lei nº 5.452/43.

O art. 189 da CLT define as atividades insalubres como aquelas que "por sua natureza, condições ou métodos de trabalho, exponham os empregados a agentes nocivos à saúde, acima dos limites de

tolerância fixados em razão da natureza e da intensidade do agente e do tempo de exposição aos seus efeitos". A definição dos agentes nocivos, sua natureza, e o estabelecimento dos limites de tolerância são de competência do Ministério do Trabalho e Emprego, por meio de atos administrativos.

A já mencionada Norma Regulamentadora no 15 (NR-15), aprovada pela Portaria MTB nº 3.214/78, identifica as atividades e operações com exposição a radiações ionizantes como atividades insalubres, quando excedidos os limites de tolerância previstos na Norma 3.01 da CNEN. Como exposto, a Norma 3.01 da CNEN (seja a atual, seja a vigente à época) não trata exatamente de limites de tolerância, mas de doses máximas, de forma que, pela literalidade da lei, nenhum trabalho com exposição a radiações ionizantes poderá ser considerado insalubre, já que é expressamente proibida qualquer exposição ocupacional acima das doses máximas previstas pela Norma 3.01 da CNEN.

As atividades perigosas, por sua vez, são definidas pelo art. 193 da CLT como "aquelas que, por sua natureza ou métodos de trabalho, impliquem o contato permanente com inflamáveis ou explosivos em condições de risco acentuado". A Norma Regulamentadora no 16 (NR-16), com as alterações inseridas pela Portaria no 518/03 do MTE, considera perigosas as atividades com exposição a radiações ionizantes constantes no seu Anexo, como radioterapia e atividades de operação e manutenção de reatores nucleares, mas não inclui em seu rol a exposição à radiação cósmica.

A Subseção I Especializada em Dissídios Individuais – SBDI I do Tribunal Superior do Trabalho, ao apreciar a questão, emitiu a OJ (Orientação Jurisprudencial) no 345, assentando o entendimento de que é devido adicional de periculosidade ao empregado exposto a radiações ionizantes, exceto no período de 12/12/2002 a 06/04/2003, período no qual é devido adicional de insalubridade. Ressaltamos que, em um dos julgados que deram origem à orientação jurisprudencial (ER 522574/1998, de relatoria do Ministro Carlos de Paula), o Tribunal deixou claro que outras atividades não constantes no Anexo I da NR-16 podem dar ensejo ao pagamento de adicional de periculosidade.

Assim, nos termos da legislação atualmente em vigor, pode-se afirmar que os aeronautas, à semelhança de outras profissões sujeitas à exposição a radiações ionizantes, têm direito ao recebimento de adicional de periculosidade, por aplicação analógica do art. 193 da CLT e da NR-16.

4 Conclusões

A exposição dos aeronautas à radiação cósmica – e, por consequência, à radiação ionizante – é uma situação que vem sendo estudada há tempos no universo científico. Os aeronautas recebem uma dose de radiação ionizante que é frequentemente superior à dose recebida por outras profissões ocupacionalmente expostas ao mesmo fenômeno, o que deveria ensejar o mesmo tratamento jurídico. No entanto, a categoria permanece desamparada pelas normas jurídicas que regulamentam o fenômeno no país.

No âmbito regulatório, não permanece claro qual é o enquadramento da exposição à radiação cósmica pela Norma 3.01 da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Argumentamos, a partir de uma interpretação sistemática das normas em vigor, que os aeronautas devem ser considerados indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) para os efeitos da Norma 3.01, na medida em que estão expostos, via de regra, a doses superiores à dose legalmente isenta de 1 mSv/ano.

No contexto do Direito Previdenciário, demonstrou-se que a profissão de aeronauta deve ser considerada uma atividade especial, o que enseja a concessão de aposentadoria especial, a conversão de tempo especial em comum e outros benefícios previdenciários de caráter acidentário. Entretanto, a concessão administrativa desses benefícios pode encontrar óbice no art. 282, II, da Instrução Normativa no 77/15 do INSS, que estabelece que a exposição à radiação ionizante só caracteriza tempo especial quando superado o limite do Anexo 5 da NR-15 do MTE, que remete à Norma 3.01 da CNEN e aos níveis de 20 mSv/ano. Impõe-se que a aplicação dessa norma seja afastada, na via administrativa ou judicial, por estar em patente contradição com a legislação e com a própria Norma 3.01 da CNEN.

Finalmente, viu-se que no Direito do Trabalho a exposição à radiação ionizante enseja o pagamento de adicional de periculosidade, segundo o art. 193 da CLT em combinação com a NR-16 e a jurisprudência do TST. As atividades desenvolvidas pelos aeronautas, no entanto, não constam do rol de atividades do Anexo da NR-16, sendo necessário aplicar as disposições legais de maneira analógica.

Dessa forma, enquanto para a legislação regulatória permanece ambíguo o tratamento da profissão de aeronauta como ocupacionalmente exposta, as legislações previdenciária e trabalhista impõem uma série de obstáculos administrativos para a garantia dos direitos decorrentes da exposição à radiação ionizante. É provável, portanto, que esses trabalhadores precisarão recorrer ao Poder Judiciário caso desejem assegurar seus direitos.

A reprovável regulamentação jurídica do fenômeno, contudo, decorre de um problema ainda mais grave: o desconhecimento geral que se tem no Brasil acerca dos riscos da exposição à radiação cósmica. A primeira medida que propomos para uma regulamentação mais adequada do fenômeno é a divulgação, por parte do poder público e das empresas aéreas, dos riscos que a radiação cósmica comporta à saúde e à integridade física dos aeronautas e passageiros frequentes, conforme a recomendação mais recente da Comissão Internacional de Proteção Radiológica.

O monitoramento individual das doses de radiação recebida pelos aeronautas é a segunda medida que entendemos ser necessária. Isso pode ser realizado tanto pela utilização de dosímetros individuais quanto pelo cálculo da dose recebida a partir de simulações por meio de programas computacionais, à semelhança do que é feito na Alemanha. Essa medida é um passo essencial para definir o quadro fático da exposição à radiação cósmica no Brasil – como já expusemos, uma série de particularidades faz com que seja provável que os níveis de radiação recebidas aqui sejam superiores aos níveis recebidos ao redor do mundo.

A terceira medida – que depende, sobretudo, de pressão política da categoria – seria a criação de uma

legislação mais clara e coerente, que evitasse o desnecessário recurso ao Poder Judiciário para que sejam assegurados os direitos e garantias decorrentes da exposição ocupacional à radiação.

A quarta e última medida que propomos é uma melhor administração das horas de trabalho da categoria, de forma a reduzir as doses de radiação para o menor nível possível, aproximando a dose recebida pelos aeronautas àquela dose recebida pelo público em geral (1 mSv/ano), conforme as recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica e a tendência observada em vários países no mundo.

Dessa maneira, embora o fenômeno ainda seja pouco debatido no âmbito jurídico no Brasil, esperamos que este trabalho sirva como um primeiro passo para a conscientização dos riscos decorrentes da radiação cósmica para os aeronautas e uma futura regulamentação jurídica mais adequada do fenômeno.

Referências

- [1] BARTLETT, D. T. Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. *Radiation protection dosimetry*, v. 109, n. 4, p. 349-355, 2004. DOI: 10.1093 /rpd/inch 311.
- [2] BRASIL. Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943 – Consolidação das Leis do Trabalho. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del5452.htm. Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- [3] BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO. Norma Regulamentadora nº 15. Aprovada pela Portaria MTB n.º 3.214, de 08 de junho de 1978. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR15/NR15-ANEXO15.pdf>. Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- [4] BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm. Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- [5] BRASIL. Lei nº 8.213, de 24 de julho de 1991. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8213cons.htm. Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- [6] BRASIL. Decreto nº 3.048, de 6 de maio de 1999. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d3048.htm. Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- [7] BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DO SEGURO SOCIAL. Instrução normativa nº 77, de 21 de janeiro de 2015. Disponível em: <http://sislex.previdencia.gov.br/paginas/38/inss-pres/2015/77.htm>. Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- [8] BRASIL. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Norma CNEN NN 3.01 – Diretrizes básicas de proteção radiológica. Resolução CNEN nº 27/04, publicada no DOU de 06 de janeiro de 2005. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>. Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- [9] BRASIL. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Posição regulatória 3.01/001:2011 – Critérios de exclusão, isenção e dispensa de requisitos de proteção radiológica. Aprovada pela resolução CNEN nº 102, de 22 de dezembro de 2010, publicada no DOU de 10 de maio de 2011. Disponível em: http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_01.pdf. Acessado em 30 de dezembro de 2016.
- [10] BRASIL. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Posição regulatória 3.01/004:2011 – Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas. Aprovada pela resolução CNEN nº 102, de 22 de dezembro de 2010, publicada no DOU de 10 de maio de 2011.

Disponível em: http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_04.pdf. Acessado em 30 de dezembro de 2016.

- [11] BENNETT, L. G. I. et al. A survey of the cosmic radiation exposure of Air Canada pilots during maximum galactic radiation conditions in 2009. *Radiation Measurements*, v. 49, p. 103-108, 2013.
- [12] CHAMBERLAIN, J.W. *Theory of Planetary Atmospheres: An introduction to their physics and chemistry*. Academic Press, New York, 1978.
- [13] DI TROLIO, Rossella et al. The use of interferon in melanoma patients: A systematic review. *Cytokine & growth factor reviews*, v. 26, n. 2, p. 203-212, 2015.
- [14] DORMAN, Lev. *Cosmic Rays in Magnetospheres of the Earth and other Planets*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [15] FEDERICO, C. A. et al. Estimates of cosmic radiation dose received by aircrew of DCTA's flight test special group. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 2, n. 2, p. 137-144, 2010.
- [16] FEDERICO, C. A. *Dosimetria da radiação cósmica no interior de aeronaves no espaço aéreo brasileiro*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2011.
- [17] FEDERICO, C. A. et al. *Considerações a Respeito de Proteção Radiológica de Tripulações de Aeronaves no Brasil*. 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/14255>. Acessado em 29 de dezembro de 2016.
- [18] FRASCH, G. et al. *Die berufliche Strahlenexposition des fliegenden Personals in Deutschland 2004-2009: Bericht des Strahlenschutzregisters*. Alemanha, Bundesamt für Strahlenschutz, 2011.
- [19] FRASCH, G. et al. *Die berufliche Strahlenexposition in Deutschland 2013-2014: Bericht des Strahlenschutzregisters*. Alemanha, Bundesamt für Strahlenschutz, 2015.
- [20] GAISSER, Thomas K. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 1990.
- [21] GUNDESTRUP, Maryanne; STORM, Hans H. Radiation-induced acute myeloid leukaemia and other cancers in commercial jet cockpit crew: a population-based cohort study. *The Lancet*, v. 354, n. 9195, p. 2029-2031, 1999.
- [22] HAMMER, Gaël P.; BLETTNER, Maria; ZEEB, Hajo. Epidemiological studies of cancer in aircrew. *Radiation protection dosimetry*, p. 1-8, 2009. DOI: 10.1093/rpd/ncpl25.
- [23] HAMMER, Gaël Paul et al. Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up. *European Journal of Epidemiology*, v. 27, n. 6, p. 419-429, 2012.
- [24] KÖHN, Christoph; EBERT, Ute. Calculation of beams of positrons, neutrons, and protons associated with terrestrial gamma ray flashes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 120, n. 4, p. 1620-1635, 2015. DOI: 10.1002/2014JD022229.

- [25] KOTERA, Kumiko; OLINTO, Angela V. The astrophysics of ultrahigh energy cosmic rays. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, Vol. 49:119-53. DOI: 10.1146/annurevastro-081710-102620. 2011.
- [26] LINNERSJÖ, A. et al. Cancer incidence in airline cabin crew: experience from Sweden. *Occupational and environmental medicine*, v. 60, n. 11, p. 810-814, 2003.
- [27] PARIDOU, A. et al. Mortality among pilots and cabin crew in Greece, 1960–1997. *International journal of epidemiology*, v. 32, n. 2, p. 244-247, 2003.
- [28] LOCHARD, J. et al. ICRP Publication 132: Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation. *Annals of the ICRP*, v. 45, n. 1, p. 5-48, 2016.
- [29] NIU, Shengli. Radiation protection of workers. International Labour Organization, 2011.
- [30] PEREIRA, Marlon Antonio et al. Avaliação da contribuição dos diferentes componentes da radiação cósmica atmosférica na dose em tripulações de aeronaves. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 3, n. 1A, 2015.
- [31] RAFNSSON, Vilhjálmur; HRAFNKELSSON, Jón; TULINIUS, Hrafn. Incidence of cancer among commercial airline pilots. *Occupational and environmental medicine*, v. 57, n. 3, p. 175-179, 2000.
- [32] RAFNSSON, Vilhjálmur et al. Risk of breast cancer in female flight attendants: a population-based study (Iceland). *Cancer Causes & Control*, v. 12, n. 2, p. 95-101, 2001.
- [33] SMITH, David M. et al. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV. *Science*, v. 307, n. 5712, p. 1085-1088, 2005. DOI: 10.1126/science.1107466.