

Revista da Graduação

Vol. 4

No. 2

2011

3

Seção: FACULDADE DE CIÊNCIAS AERONÁUTICAS

Título: Radiação e suas influências no cotidiano
de um piloto de linha aérea

Autor: Giancarlo Steffani Matheus

Este trabalho está publicado na Revista da Graduação.

ISSN 1983-1374

<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/10034/7075>

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AERONÁUTICAS

GIANCARLO STEFFANI MATHEUS

**RADIAÇÃO E SUAS INFLUÊNCIAS NO COTIDIANO DE UM PILOTO DE LINHA
AÉREA**

Porto Alegre
2011

GIANCARLO STEFFANI MATHEUS

**RADIAÇÃO E SUAS INFLUÊNCIAS NO COTIDIANO DE UM PILOTO DE LINHA
AÉREA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Aeronáuticas.

Orientador: Guido Carim Jr.

Porto Alegre

2011

GIANCARLO STEFFANI MATHEUS

**RADIAÇÃO DE FUNDO E SUAS INFLUÊNCIAS NO COTIDIANO DE UM PILOTO
DE LINHA AÉREA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Aeronáuticas.

Aprovada em 20 de junho de 2011.

BANCA EXAMINADORA:

Elones Fernando Ribeiro

Guido Cesar Carim Junior

Thais Russomano

Aos meus pais, por todo o esforço contínuo que fizeram, durante todos esses anos, para que eu alcançasse meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer minha família que esteve sempre ao meu lado, em todos os momentos em que precisei, em especial ao meu padrinho que mesmo à distância, me orientou em todo o processo do meu aprendizado técnico-aeronáutico.

Agradeço, também, ao Departamento de Iniciação Aeronáutica do Aeroclube do Rio Grande do Sul, pois foi um dos fatores fundamentais para que escolhesse trilhar a carreira de aeronauta.

Não posso deixar de mencionar também o Aeroclube de Eldorado do Sul, onde cursei todos os cursos práticos e que, com maestria, transformou um sonho em realidade.

A todos os professores, funcionários e instrutores da Faculdade de Ciências Aeronáuticas, principalmente, a Ivan Ramos e Éder Henriqson, por terem dividido comigo seus inúmeros conhecimentos.

E por último, mas não menos importante, ao meu orientador Guido Carim Jr. que prontamente aceitou o desafio de um assunto como esse e me auxiliou para que, em um curto espaço de tempo, o mesmo fosse concluído.

“When once you have tasted flight,
will forever walk the earth with your eyes
turned skyward...”

Leonardo da Vinci

RESUMO

Na formação de um piloto, além das habilidades técnicas, o mesmo recebe diversos fundamentos teóricos. Porém, em muitos dos casos, alguns conceitos básicos, como radiação cósmica, não são abordados.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o índice de radiação a que são expostos tripulações de voo e passageiros frequentes, além de indicar seus prováveis efeitos sobre órgãos e tecidos humanos. Além de introduzir os conceitos físicos pertinentes ao tema, são discutidos os fatores que influenciam a intensidade da radiação durante voos como altitude, latitude e o comportamento periódico das erupções solares. Com o uso de um contador Geiger, foram medidas taxas de radiação em pulsos/hora em níveis de voo de aviões de linha aérea domésticas e internacional. Os resultados mostram que o número de contagens radioativas por hora em voos nacionais é cerca de sete a dez vezes superior ao número de contagens em solo e que, para voos internacionais, esse fator se altera para aproximadamente vinte. Entretanto, esses índices ainda estão abaixo dos limites de dose efetiva estipulados para trabalhadores ocupacionais segundo a *International Commission of Radiological Protection*, que é uma média de 20 mSv por ano, calculada em períodos de 5 anos. Para mulheres grávidas, a média é 1mSv durante todo o período de gestação, não sendo permitido exceder 0,5mSv por mês. Embora a exposição à radiação cósmica possa afetar os tecidos e órgãos humanos, modificando ou destruindo células, outros fatores de risco ocupacionais podem contribuir mais significativamente para a mortalidade de membros de tripulações de voo.

Palavras-chave: radiação cósmica; contador Geiger; *International Commission of Radiological Protection*; membros de tripulações de voo.

ABSTRACT

During the pilot's learning process, as well as technical skills, he/she acquires several theoretical foundations. However in many cases, some basic concepts like cosmic radiation are not taught. The aim of this work is to evaluate the radiation rate to which crews and frequent flyers are exposed and also to indicate its probable effects on human organs and tissues. The paper introduces the physical concepts about radioactivity and discusses the factors that influence the radioactive intensity during the flights such as altitude, latitude and the behavior of solar flares. Using a Geiger counter, the radiation rates were measured in pulse/hour on flight levels that domestic and international airways aircraft flying. The results show that the number of radioactive counts per hour during domestic flights is about seven to ten times higher than at ground level and during international flights this factor increases to approximately twenty time higher. However, these values are still below the effective dose limit established for occupational workers by the International Commission of Radiological Protection, which corresponds to an average of 20mSv per year, calculated over a period of 5 years. For expectant mothers the average is 1 mSv during pregnancy, with an additional condition that the value may not exceed 0,5 mSv in any month. Although it can damage or kill cells, cosmic radiation plays only a minor role along with other occupational risk factors affecting mortality of commercial cockpit crew members.

Key-words: cosmic radiation; Geiger counter; International Commision of Radiological Protection, cockpit crew members.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Gráfico Z x N da distribuição de núcleos.....	14
Figura 2.2: Parte de uma carta de nuclídeos.....	14
Figura 2.3: O espectro eletromagnético	15
Figura 2.4: Alcance de partículas α no ar, no tecido humano e no alumínio	18
Figura 2.5: Alcance de partículas β no ar, no tecido humano e no alumínio	18
Figura 2.6: Camada semi-redutora no tecido humano e no Pb para raios X ou γ	19
Figura 2.7: Raios cósmicos primários e secundários	21
Figura 2.8: Taxa equivalente de dose ambiental ($\mu\text{Sv/h}$) x altitude de voo (Km)	22
Figura 2.9: Radioatividade em voos do Concorde entre 1976-1983 e 1988-1990 ..	23
Figura 2.10: Horas de voo e doses de tripulações do Concorde entre 1988-1990...	24
Figura 2.11: Dose absorvida limite e efeitos em órgãos e tecidos humanos	25
Figura 2.12: Valores do fator de ponderação radioativo W_R	26
Figura 2.13: Fatores de ponderação radioativo W_T para órgãos e tecidos	27
Figura 3.1: Esquema básico de um contador Geiger	30
Figura 3.2: Fotografia de um contador Geiger	30
Figura 3.3: Comparação de doses de radiação em rotas	32
Figura 4.1: Medidas de radiação em aeroportos e voos comerciais (jun/2010)	33
Figura 4.2: Medidas de radiação em aeroportos e voos comerciais (jul/2011)	34
Figura 4.3: Medidas de radiação em aeroportos e voos comerciais (dez/2010)	35

LISTA DE SIGLAS

CARI Civil Aeromedical Research Institute

CNEN Comissão Nacional de Energia Nuclear

FAA Federal Aviation Administration

EPCARD European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses

ICRP International Commission of Radiological Protection

LBA Luftfahrt-Bundesamt

PC-AIRE Predictive Code for Aircrew Radiation Exposure

PLA Piloto de Linha Aérea

TCCA Transport Canada Civil Aviation

LISTA DE SÍMBOLOS

Cs – Césio

Cu - Cobre

Gy - Gray

h – hora

He – Hélio

Ni - Níquel

P – Fósforo

Pb – Chumbo

Rn – Radônio

rem – roentgen equivalent man ($mrem/h = 10^{-3}rem/h$)

S – Enxofre

Sr - Estrôncio

Sv – sievert ($mSv/h = 10^{-3}Sv/h$; $\mu Sv/h = 10^{-6}Sv/h$)

Th - Tório

U – Urânio

Xe - Xenônio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	RADIOATIVIDADE	13
2.1.1	Radiações α , β , γ e nêutrons.....	15
2.1.2	Poder de penetração da radiação	17
2.1.3	Lei fundamental do decaimento	19
2.2	RADIOATIVIDADE EM AERONAVES DE TRANSPORTE REGULAR	20
2.3	INFLUÊNCIA DA RADIOATIVIDADE SOBRE OS SERES VIVOS	24
3	MÉTODO DE PESQUISA	29
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	33
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
6	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Desde o terremoto seguido de tsunami ocorrido no Japão, em 11 de março de 2011, a mídia mundial tem mostrado os esforços dos japoneses para resolver o problema do resfriamento das usinas nucleares de Fukushima. Diariamente são divulgados índices crescentes de radioatividade naquela região e a constante preocupação das autoridades locais com o nível de contaminação no entorno das usinas nucleares. O limitado conhecimento da população em geral sobre radioatividade e seus efeitos nos seres vivos é de certa forma preocupante, considerando-se que este tema está muito presente em nosso dia-a-dia, haja visto os avanços da medicina na área nuclear (radioterapias), no uso desse material como fonte primária de energia, e até mesmo, em nossa história, o acidente com ^{137}Cs em Goiânia em 1987.

Os seres vivos estão permanentemente expostos à radiação proveniente do espaço sideral e de elementos radioativos existentes na crosta terrestre, conhecida como radiação natural ou radiação de fundo. Sabe-se que a exposição à radiação mais intensa do que o nível normal de radiação de fundo deve ser evitada, pois, ao atravessar a matéria viva, a radiação pode causar alterações na estrutura química de moléculas ou átomos (HEWITT, 2002).

A intensidade da radiação de fundo varia com a altitude, inicialmente diminuindo à medida que nos afastamos do solo, conforme experimentos realizados há cerca de 100 anos por Victor Hess, e depois aumentando consideravelmente com o aumento da altitude em virtude, principalmente, da menor atenuação dos raios cósmicos pela atmosfera (WHEELER, 1950). Pode-se, então, afirmar que pessoas que se deslocam frequentemente em aeronaves de transporte aéreo estão sujeitas, durante os voos, a índices de radiação maiores do que ao nível do solo. Mas, além da altitude, duração e frequência dos voos, outros fatores influenciam a quantidade de radiação que atinge tripulações e passageiros.

Este trabalho tem como objetivos avaliar os níveis de radiação cósmica em diversas altitudes de voo e seus prováveis efeitos sobre as tripulações ao longo da vida profissional.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RADIOATIVIDADE

Há muito se estuda as propriedades físicas e químicas dos elementos. Hoje em dia se sabe que estes são átomos constituídos por um núcleo, onde se concentram prótons e nêutrons, e por elétrons que se distribuem em órbitas quantizadas ao redor do núcleo. Os elementos químicos são classificados de acordo com o seu número atômico Z (número de prótons) e número de massa A , sendo $A = Z + N$, onde N representa o número de nêutrons no núcleo. O átomo (não ionizado) é eletricamente neutro e, portanto, os elétrons em sua órbita eletrônica são em igual número ao de prótons no núcleo (HAZEN; PIDD, 1969).

Quase toda massa do átomo está concentrada no seu núcleo, pois a massa de um próton ou de um nêutron é quase 2.000 vezes a massa de um elétron. Além disso, o núcleo ocupa uma parte muito pequena do átomo, pois o raio nuclear é cerca de 100.000 vezes menor do que o raio atômico. As unidades típicas para expressar os raios atômicos e nucleares são, respectivamente, o Angstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) e o Fermi ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Na nomenclatura nuclear, prótons e nêutrons são indistintamente chamados de núcleons. Convém ainda mencionar que, assim como ocorre no modelo atômico, os núcleos exibem uma estrutura de camadas nucleares e, portanto, podem se encontrar no estado fundamental ou em estados excitados. Nos núcleos mais leves, os números de prótons e de nêutrons pouco diferem, mas, à medida que o número atômico aumenta, o número de nêutrons se torna cada vez maior e os núcleos podem ser estáveis ou instáveis (radioativos), conforme ilustrado na figura 2.1 (MUKHIN, 1987).

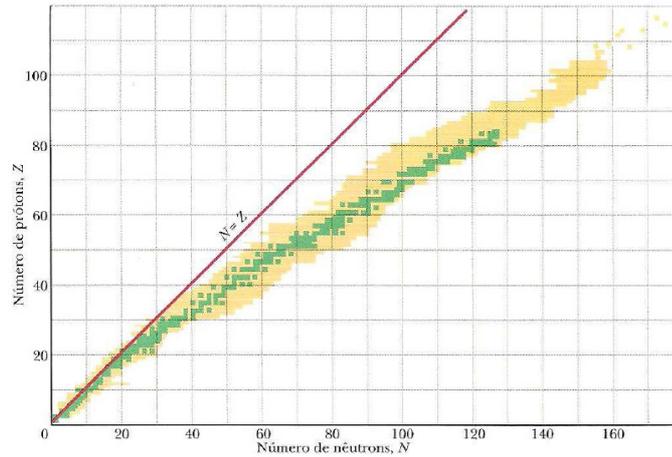


Figura 2.1: Gráfico Z x N da distribuição de núcleos. Em verde estão representados os núcleos estáveis; em amarelo, os núcleos radioativos.

Fonte: Halliday *et al* (2009).

No estudo de radioatividade, os núcleos são designados por *nuclídeos* e organizados em tabelas chamadas *carta de nuclídeos*. Estas cartas mostram os diversos isótopos (mesmo número atômico Z e diferentes número de nêutrons N) e outros dados referentes ao decaimento nuclear. A figura 2.2 mostra parte de uma carta de nuclídeos.

	$A = 198$						
82	^{197}Pb 43 min	^{198}Pb 2,4 h	^{199}Pb 1,5 h	^{200}Pb 21,5 h	^{201}Pb 9,33 h	^{202}Pb 53000 anos	^{203}Pb 2,16 d
81	^{196}Tl 1,84 h	^{197}Tl 2,83 h	^{198}Tl 5,3 h	^{199}Tl 7,4 h	^{200}Tl 26,1 h	^{201}Tl 72,9 h	^{202}Tl 12,2 d
80	^{195}Hg 9,5 h	^{196}Hg 0,15%	^{197}Hg 64,1 h	^{198}Hg 10,0%	^{199}Hg 16,9%	^{200}Hg 23,1%	^{201}Hg 13,2%
79	^{194}Au 39,4 h	^{195}Au 186 d	^{196}Au 6,18 d	^{197}Au 100%	^{198}Au 2,69 d	^{199}Au 3,14 d	^{200}Au 48,4 min
78	^{193}Pt 60 anos	^{194}Pt 32,9%	^{195}Pt 33,8%	^{196}Pt 25,3%	^{197}Pt 18,3 h	^{198}Pt 7,2%	^{199}Pt 30,8 min
77	^{192}Ir 73,8 d	^{193}Ir 62,7%	^{194}Ir 19,2 h	^{195}Ir 2,8 h	^{196}Ir 52 s	^{197}Ir 5,8 min	^{198}Ir 6,8 s
76	^{191}Os 15,4 d	^{192}Os 41,0%	^{193}Os 30,5 h	^{194}Os 6,0 anos	^{195}Os 6,5 min	^{196}Os 35 min	-
	115	116	117	118	119	120	121
	Número de nêutrons, N						

Figura 2.2: Parte de uma carta de nuclídeos.

Fonte: Halliday *et al* (2009).

2.1.1 Radiações α , β , γ e nêutrons

A estrutura dos núcleos também é regida pelas leis da Física Quântica e exibe um comportamento semelhante ao das órbitas quantizadas dos elétrons no átomo. Isto quer dizer que, assim como o átomo, os núcleos também podem estar em um estado excitado e, ao decaírem para o estado fundamental, emitem um fóton γ (gama). A energia dos raios γ é muito superior ao do fóton de luz visível emitido pelo átomo excitado, conforme pode ser visto no espectro eletromagnético representado na figura 2.3.

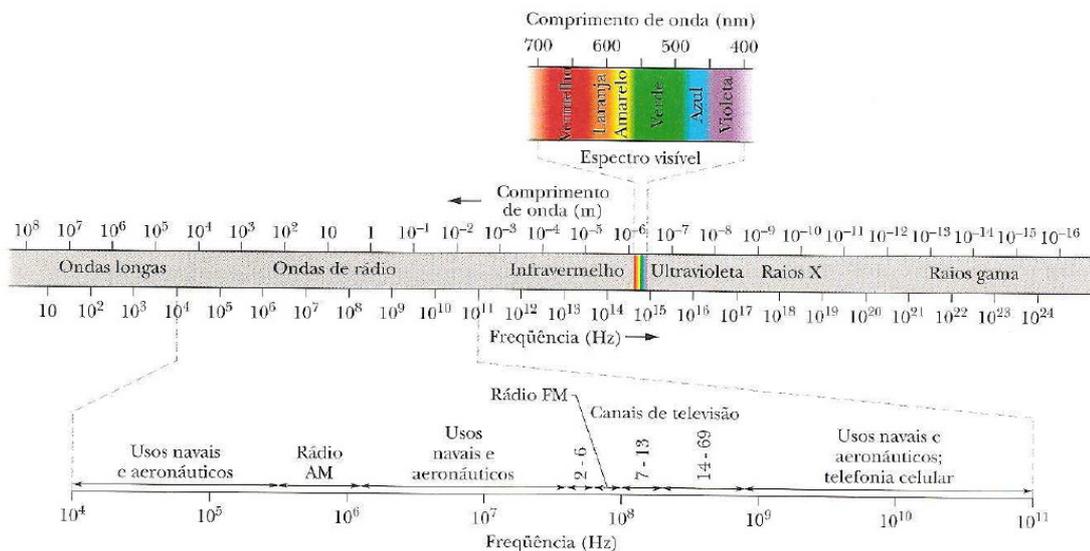


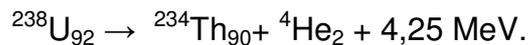
Figura 2.3: O espectro eletromagnético em ordem crescente de freqüência f , ou seja, em ordem crescente de energia E , uma vez que $E = h \cdot f$, onde h é a constante de Planck.

Fonte: Halliday *et al* (2009).

Os raios X, tão comumente usados em exames médicos nos dias atuais, são ondas eletromagnéticas como os raios γ , mas diferem completamente quanto à origem: os raios γ se originam dentro do núcleo e os raios X têm origem na camada eletrônica dos átomos. A radiação γ são ondas eletromagnéticas extremamente penetrantes.

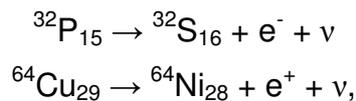
Conforme mostra a figura 2.2, existe um grande número de nuclídeos radioativos, isto é, nuclídeos que emitem partículas transformando-se em um nuclídeo diferente. Dentre as partículas emitidas, tem-se a partícula α (alfa), que corresponde ao núcleo do átomo de Hélio (${}^4\text{He}_2$), e as partículas β , que correspondem à emissão de um elétron e^- (β^-) ou de um pósitron e^+ (β^+).

Um exemplo de decaimento α é o do radionuclídeo ${}^{238}\text{U}_{92}$ que decai no ${}^{234}\text{Th}_{90}$ emitindo uma partícula α com energia de 4,25 MeV:



Quanto maior a energia da partícula α emitida maior será seu alcance (distância que a partícula percorre antes de parar).

São exemplos de decaimentos β^- e β^+ , respectivamente:



onde ν é o neutrino, uma partícula neutra, praticamente sem massa, que é emitida do núcleo juntamente com a partícula β . As partículas β são mais penetrantes do que as partículas α , isto é, seu alcance é muito maior.

Alguns núcleos grandes como o ${}^{235}\text{U}_{92}$ quando bombardeados com nêutrons sofrem o processo de fissão nuclear, isto é, dão origem a dois núcleos menores com emissão de outros nêutrons e liberação de energia. Por exemplo, na reação de fissão



embora a energia liberada seja muito inferior à gerada quando se acende um palito de fósforo, a energia total num processo de fissão nuclear pode se tornar extremamente grande pois cada nêutron gerado pode fissionar outro núcleo num intervalo de tempo muito pequeno (da ordem de 10^{-8} s). Assim, para uma grande quantidade de ${}^{235}\text{U}_{92}$, pode-se gerar uma quantidade enorme de energia. Esse é o princípio de funcionamento das usinas nucleares (EISBERG; RESNICK, 1988).

Quando uma radiação atravessa um material, ela interage com os átomos do mesmo e, se sua energia for superior à energia de ligação dos elétrons de um átomo

com o seu núcleo, pode haver ejeção de elétrons das órbitas atômicas, transformando os átomos neutros em íons positivos. Esses elétrons ejetados continuam propagando-se no material e interagindo com outros átomos, podendo vir a arrancar outros elétrons, isto é, gerando mais átomos ionizados. Devido à dissipação de energia ocorrida durante os inúmeros choques com o meio, os elétrons vão perdendo energia e acabam capturados por moléculas do material. Essa radiação capaz de transferir energia para o meio irradiado gerando íons negativos (elétrons) e íons positivos (átomos ionizados) é designada **radiação ionizante**.

Assim, esse processo altera a estrutura atômica do meio e ocasiona uma instabilidade no sistema seguida de um rearranjo instantâneo de elétrons na busca de uma configuração quimicamente mais estável. Essa busca por estabilidade pode ocorrer às custas de uma perda de identidade química molecular. Após o rearranjo, a molécula já não desempenha as mesmas funções que anteriormente. Esse é o motivo pelo qual a simples medida da quantidade ou intensidade de radiação não é suficiente para avaliar seus danos sobre organismos vivos. É preciso que se leve em conta também a energia absorvida por um organismo quando radiação ionizante o atinge. Quando 1 joule (1 J) de energia é absorvida por um quilograma (1 Kg) de material diz-se que a **dose absorvida D** é 1 gray (1 Gy).

2.1.2 Poder de penetração da radiação

Uma característica importante das radiações diz respeito ao seu poder de penetração na matéria. A distância que uma partícula α ou β percorre antes de parar é chamada **alcance**.

Num dado meio, o alcance aumenta com o aumento da energia da partícula radioativa. Por outro lado, para partículas com uma dada energia, o alcance diminui com o aumento da densidade do meio.

As figuras 2.4 e 2.5 apresentam, respectivamente, o alcance de partículas α e β com diversas energias em três diferentes meios – ar, tecido humano e alumínio.

Energia (MeV)	Alcance (cm)		
	Partículas α	Ar	Tecido humano
1,0	0,55	$0,33 \times 10^{-2}$	$0,32 \times 10^{-3}$
2,0	1,04	$0,63 \times 10^{-2}$	$0,61 \times 10^{-3}$
3,0	1,67	$1,00 \times 10^{-2}$	$0,98 \times 10^{-3}$
4,0	2,58	$1,55 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-3}$
5,0	3,50	$2,10 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-3}$

Figura 2.4: Alcance de partículas α no ar, no tecido humano e no alumínio.

Fonte: Okuno *et al.* (1982).

Energia (MeV)	Alcance (cm)		
	Partículas β	Ar	Tecido humano
0,01	0,23	$0,27 \times 10^{-3}$	
0,1	12,0	$1,51 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-3}$
0,5	150	0,18	$5,9 \times 10^{-2}$
1,0	220	0,50	0,14
2,0	840	1,00	0,34
3,0	1.260	1,50	0,56

Tabela 2.5: Alcance de partículas β no ar, no tecido humano e no alumínio.

Fonte: Okuno *et al.* (1982).

Os nêutrons, por serem partículas sem carga, não produzem ionização diretamente. Mas, ao penetrarem na matéria, transferem energia para outras partículas carregadas, as quais podem gerar ionizações no meio. Os nêutrons são partículas muito penetrantes que podem ser blindados por materiais ricos em hidrogênio, como a parafina e a água.

Os raios γ são ondas eletromagnéticas de origem nuclear extremamente penetrantes. Os raios X são ondas de mesma natureza que os γ , mas se originam no átomo. Os fótons dessas radiações podem perder toda ou quase toda sua energia em uma única interação com o meio em que se propagam. A distância que os fótons de raios γ ou X percorrem até interagir com o meio não pode ser prevista. Trata-se de um processo estatístico e o que se pode prever é a distância em que esses fótons têm 50% de chance de interagir. Essa distância é chamada camada

semi-redutora e seus valores no tecido humano e no chumbo são mostrados na figura 2.6.

Energia (MeV)	Camada semi-redutora (cm)	
	Tecido humano	Chumbo
Raios X ou γ		
0,01	0,13	$4,5 \times 10^{-4}$
0,05	3,24	$0,8 \times 10^{-2}$
0,1	4,15	$1,1 \times 10^{-2}$
0,5	7,23	0,38
1,0	9,91	0,86
5,0	23,10	1,44

Tabela 2.6: Camada semi-redutora no tecido humano e no chumbo para raios X ou γ .

Fonte: Okuno *et al.* (1982).

Essa propriedade de penetração da matéria tem várias aplicações na indústria, na medicina, na segurança, etc. Nos aeroportos, ao atravessarem bagagens sob inspeção, uma parte dos raios X é absorvida pelos materiais e uma parte é utilizada para impressionar um filme fotográfico ou um dispositivo eletrônico de captação de imagem, permitindo que se visualize a estrutura ou partes do material inspecionado.

2.1.3 Lei fundamental do decaimento

O decaimento radioativo é um processo estatístico, pois não se pode prever exatamente qual dos núcleos de uma amostra radioativa vai decair num intervalo de tempo Δt . Considerando-se uma amostra de material radioativo com N núcleos, estatisticamente pode-se afirmar que a taxa de decaimento ($-dN/dt$) é proporcional a N e, portanto,

$$-dN/dt = \lambda N$$

onde λ é a **constante de desintegração**, cujo valor é característico para cada radionuclídeo (TIPPLER, 1984).

Integrando-se essa equação, obtém-se

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

onde N_0 é o número de núcleos radioativos na amostra no instante de tempo inicial ($t=0$) e N é o número de núcleos remanescentes em um instante de tempo t .

Uma grandeza física importante em radioatividade é a **meia-vida** T , que é o tempo necessário para que metade dos radionuclídeos de uma amostra decaiam. Assim, conforme Tipler (1984), após um intervalo de tempo $t = T$, tem-se

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T},$$

de onde decorre que $\ln(1/2) = -\lambda T$, ou seja, $\ln 2 = \lambda T$. Portanto,

$$T = 0,693/\lambda.$$

Observe-se que a constante de desintegração tem dimensão de $1/[\text{tempo}]$, isto é, ela é expressa, por exemplo, em s^{-1} , ou min^{-1} , ou h^{-1} ou dia^{-1} ou ano^{-1} , dependendo unicamente do valor característico da meia-vida do núcleo.

É comum encontrar-se na literatura os valores da **vida média** τ de um núcleo radioativo. Esse valor é dado por $\tau = 1/\lambda$.

2.2 RADIOATIVIDADE EM AERONAVES DE TRANSPORTE AÉREO REGULAR

“A maioria das pessoas está ciente dos perigos da radiação nuclear produzida por materiais de construção radioativos, usinas nucleares e (especialmente) armas nucleares. Entretanto, muitas pessoas não sabem que a radiação é um fator de risco em longas viagens de avião, principalmente para a tripulação. Na verdade, algumas rotas são mais perigosas que outras, e o número total de horas de voo por ano dos membros da tripulação nessas rotas é limitado pelas companhias aéreas.” (HALLIDAY *et al.*, 2009).

O ambiente terrestre é constantemente bombardeado por partículas carregadas de alta energia oriundas de fora do Sistema Solar e por intensos feixes de partículas provenientes de eventos solares (ejeções de massa coronal e erupções solares). Essas partículas são chamadas **raios cósmicos primários**. Ao se aproximarem da Terra, elas interagem com moléculas e átomos do ar na atmosfera terrestre e dão origem a outras partículas, designadas **raios cósmicos secundários** (FRAUENFELDER; HENLEY, 1974), conforme ilustrado na figura 2.7.

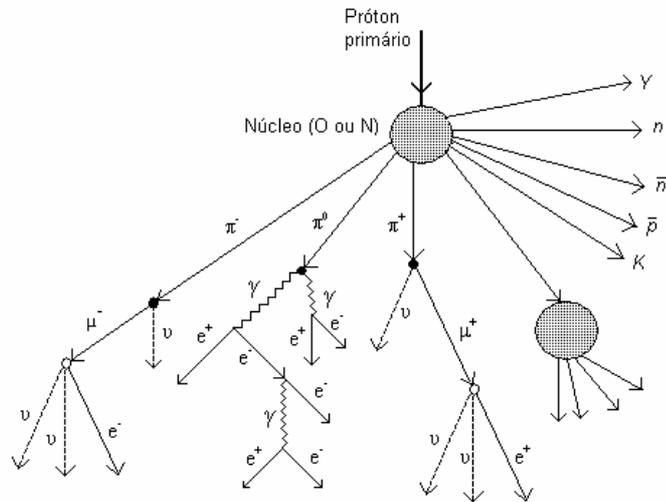


Figura 2.7: Raios cósmicos primários e secundários. Um próton de alta energia colide com núcleos de O ou N no topo da atmosfera, originando uma cascata de partículas.

Fonte: Frauenfelder e Henley (1974).

As sucessivas colisões dos raios cósmicos com as moléculas do ar vão gerando perdas de energia da radiação cósmica. Essas perdas de energia são cada vez maiores quanto mais profundamente as partículas penetram na atmosfera. Isso explica porque a intensidade da radiação depende, em princípio, da altitude na atmosfera.

Os prótons e outros núcleos atômicos presentes na radiação cósmica viajam pelo espaço com velocidades muito altas. Essa radiação pode ser intensificada pela atividade solar, gerando ainda mais partículas com alta energia. Devido aos impactos dessas partículas carregadas sobre instrumentos eletrônicos que se encontram no espaço, podem ocorrer falhas nos pequenos circuitos presentes em *microchips* ou fazer com que os *bits* binários armazenados nas memórias dos computadores troquem de valor. Ao nível do solo, excetuando-se o período de máxima atividade solar, que se repete a cada onze anos aproximadamente, grande parte das partículas carregadas não causa maiores danos porque são desviadas pelo campo magnético terrestre.

De forma simplificada, pode-se dizer que a Terra comporta-se como um imenso ímã no espaço, ou seja, ela é circundada por um campo magnético provavelmente gerado pelo movimento das partículas carregadas presentes nas partes internas da Terra. Ao se aproximarem da Terra, os raios cósmicos sofrem desvios devido à presença do campo magnético terrestre. Isso explica porque a radiação cósmica é mais intensa nos pólos, pois, nessas regiões, as partículas incidem ao longo das linhas de campo e, portanto, praticamente não são desviadas. Já na região equatorial tem-se um efeito oposto, pois as partículas incidem de forma a “cortar” as linhas de força do campo.

Na figura 2.8, pode-se verificar a diferença entre as taxas de radiação em função da altitude de voos em regiões polares (linhas azuis) e equatoriais (linhas vermelhas), bem como a influência da máxima atividade solar de janeiro/1990 (linhas grossas) e da mínima de janeiro/1998 (linhas finas).

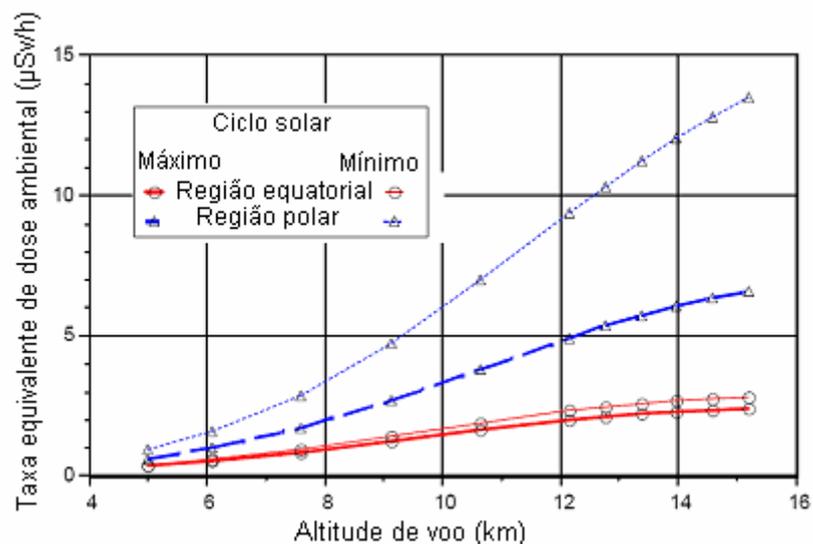


Figura 2.8: Taxa equivalente de dose ambiental ($\mu\text{Sv/h}$) x altitude de voo (km).

Fonte: Lindborg *et al* (2004).

Na figura anterior, a unidade de medida da taxa equivalente de dose ambiental está expressa em $\mu\text{Sv/h}$ (10^{-6} Sievert/hora). Sievert é uma unidade de radiação que leva em conta os danos que ela causa aos organismos vivos.

O histórico avião supersônico comercial Concorde, durante seus anos de operação, fazia voos transoceânicos a uma altitude de 18Km e latitudes entre 40°N

e 70°N. Essa aeronave possuía um instrumento que media a radiação cósmica em mrem/h (antiga unidade, equivale atualmente a 10 μ Sv/h), de forma que se este indicasse valores iguais ou superiores a 0,5 mSv/h, um alarme na cabine soaria e a aeronave teria que descer para um nível de vôo mais baixo, acordado previamente com o controle de tráfego (BAGSHAW *et al*, 1996). Entretanto, durante seu período de operação, tanto na British Airways como na Air France, nunca foi ativado este plano de emergência, mesmo em anos de máxima intensidade solar. As poucas vezes em que o equipamento indicou esses valores críticos, foi devido a erro de instrumento ou durante sobrevôo Vancouver–Pólo Norte-Vancouver (DAVIES, 1993).

As figuras 2.9 e 2.10 apresentam informações sobre horas voadas e taxas de dose média de radiação em voos do Concorde. A primeira figura contém dados para um período de 8 anos, entre 1976 e 1983, e dos anos de 1988, 1989 e 1990. Os dados mostram que a taxa de dose média mantém-se entre 10,0 e 12,2 μ Sv/h. A penúltima coluna da figura registra o percentual de voos que atingiram taxas de dose com valores entre 20 e 30 μ Sv/h, enquanto a última coluna apresenta o percentual de voos com taxas de dose média superiores a 30 μ Sv/h. Para este último caso, com exceção do ano de 1988, o percentual foi inferior a 1,0%.

Período	Horas voadas	Número de voos	Taxa de dose média (μ Sv/h)	% voos com mais de 20 μ Sv/h	% voos com mais de 30 μ Sv/h
1976 - 1983	-	-	11,2	< 3,0	< 1,0
1988	6288	2143	12,2	3,45	0,65
1989	6076	2029	11,6	4,53	1,28
1990	5888	1942	10,0	1,96	0,31

Figura 2.9: Radioatividade em voos do Concorde entre 1976 e 1983 e entre 1988 e 1990.

Fonte: Davies (1993).

Já a figura 2.10 mostra, para as tripulações de voo e de cabine, a média e o máximo de horas de voo por pessoa e as taxas de dose média, dose anual média e máxima dose anual nos anos de 1988, 1989 e 1990. Convém ressaltar que os valores da dose média estão expressos em μ Sv/h, enquanto que a unidade dos

dados das duas últimas colunas, dose anual média e máxima dose anual, é mSv/h (1 mSv/h = 1.000 μ Sv/h). A dose anual média é obtida multiplicando-se a taxa de dose média pela média de horas voadas por pessoa. Analogamente, a máxima dose anual é calculada multiplicando-se a taxa de dose média pelo máximo de horas por pessoa.

Período	Horas voadas	Média de horas por pessoa	Máximo de horas por pessoa	Taxa de dose média (μ Sv/h)	Dose anual média (mSv/h)	Máxima dose anual (mSv/h)
Tripulação de voo						
1988	6288	314	547	12,2	3,83	6,67
1989	6076	304	542	11,6	3,53	6,28
1990	5888	294	537	10,0	2,94	5,37
Tripulação de cabine						
1988	6288	222	422	12,2	2,71	5,15
1989	6076	214	418	11,6	2,48	4,85
1990	5888	207	413	10,0	2,07	4,13

Figura 2.10: Dados sobre horas de voo e doses para tripulações do Concorde no período de 1988 a 1990.

Fonte: Davies (1993).

2.3 INFLUÊNCIA DA RADIOATIVIDADE SOBRE OS SERES VIVOS

Atualmente, há diversos estudos sobre o risco-benefício causado por exposição à radiação, uma vez que a mesma é amplamente utilizada em radioterapias e diagnósticos médicos.

Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a dose média de radiação de fundo absorvida pela população mundial é cerca de 2,6 mGy/ano. Mesmo a radiação natural de fundo pode, probabilisticamente, causar danos a células. Os efeitos da radiação ionizante em um indivíduo são determinados, principalmente, pela intensidade da dose absorvida, pelo tempo de exposição e pelo órgão ou tecido exposto. Os efeitos biológicos da radiação sobre o corpo humano como um todo ou partes dele são resumidamente apresentados na figura 2.11.

Órgãos ou tecidos	Efeito	Limite de dose absorvida (mGy)	
		Exposição curta (dose única)	Doses anuais (repetidas por muitos anos)
Testículos	Esterilidade temporária	150	400
	Esterilidade permanente	3500-6000	2000
Ovários	Esterilidade	2500-6000	> 200
Lentes oculares	Opacidades detectáveis	500-2000	> 100
	Deficiência visual (catarata)	5000	> 150
Medula óssea	Comprometimento da hematopese	500	> 400
Pele	Eritema (descamação seca)	2000	----
	Descamação úmida	18000	----
	Epidérmica e necrose de pele profunda	25000	----
	Atrofia da pele com complicações e telangiectasia	10000-12000	1000
Corpo inteiro	Doença aguda por radiação (leve)	1000	----

Figura 2.11: Limites de dose absorvida e seus efeitos em órgãos e tecidos humanos.

Fonte: Valentin (2001).

Pessoas que, em suas atividades profissionais, são submetidas a baixas doses de radiação, estão sujeitas principalmente a efeitos estocásticos, os quais são descritos pela ICRP (ICRP, 1991) da seguinte maneira:

Quando uma célula irradiada sofre modificação ao invés de morrer, podem resultar efeitos estocásticos. Posteriormente, células somáticas modificadas podem desenvolver-se em câncer. Entretanto, há mecanismos de defesas e reparos que tornam isso bastante improvável. Todavia, a probabilidade de um câncer resultante de radiação aumenta com o incremento de dose. A severidade do câncer não é relacionada à dose, e sim, qual célula é afetada por ela. Caso o dano ocorra em células cuja função seja transmitir informação genética para as próximas gerações, qualquer efeito

resultante, que pode ser de diferentes tipos e severidades, manifestar-se-á no progênito do indivíduo exposto. Esse tipo de efeito estocástico é denominado hereditário.

Entretanto, vinte anos de estudos com 19.000 pilotos e engenheiros de voo de linhas aéreas europeias mostram que não há como afirmar uma relação direta entre o aumento do risco de mortalidade por câncer devido à exposição de doses mais elevadas (LANGNER *et al*, 2004).

Apenas a energia não é suficiente para caracterizar os danos provocados pela radiação ionizante em organismo vivos. Para isso, outra unidade foi introduzida: o sievert (Sv). Esta unidade expressa o **equivalente de dose** H e é obtida multiplicando-se a dose absorvida D_R por um fator de ponderação radioativa W_R que quantifica o efeito de cada tipo de radiação:

$$H_T = \sum_R W_R D_R.$$

A figura 2.12 apresenta os valores de W_R para diferentes radiações. Observe-se que as partículas α , as de menor alcance conforme mostrado na figura 2.4, são as que possuem o maior fator de ponderação radioativa, $W_R = 20$. Para nêutrons o fator de ponderação é obtido através de uma função dependente de sua energia.

Tipo de radiação	Fator de ponderação da radiação (W_R)
Fótons (X, γ)	1
Elétrons e múons	1
Prótons e píons carregados	2
Partículas α , fragmentos de fissão e íons pesados	20
Nêutrons	Uma função contínua da energia do nêutron

Figura 2.12: Valores do fator de ponderação radioativa W_R .

Fonte: ICRP-103 (2007).

Entretanto, a sensibilidade do organismo vivo às radiações depende dos tecidos e órgãos atingidos. Assim, faz-se necessário também introduzir uma unidade que leve em conta os efeitos biológicos através de um fator de ponderação W_T para

os tecidos e órgãos. Essa unidade é a **dose efetiva** E que equivale biologicamente à exposição de corpo inteiro e corresponde à soma das doses equivalentes ponderadas por um fator W_T para órgãos e tecidos

$$E = \sum_T W_T H_T.$$

A unidade de dose efetiva, assim como a de dose equivalente, é o sievert (Sv). A figura 2.13 apresenta os valores dos fatores de ponderação W_T para órgãos e tecidos.

Tecido	W_T	$\sum W_T$
Medula Óssea, cólon, pulmão, estômago, mama, demais tecidos*	0,12	0,72
Gônadas	0,08	0,08
Bexiga, esôfago, fígado, tireóide	0,04	0,16
Superfície óssea, cérebro, glândulas salivares, pele	0,01	0,04
Total		1,00

*Supra-renais, região extra torácica (ET), vesícula biliar, coração, rins, gânglios linfáticos, músculos, mucosa oral, pâncreas, próstata, intestino delgado, baço, timo, útero/cerviz.

Figura 2.13: Fatores de ponderação W_T para órgãos e tecidos.

Fonte: ICRP-103 (2007).

Considerando os efeitos da radiação sobre o homem, a *International Commission of Radiological Protection* (ICRP-103, 2007, p. 87) estabelece limites de doses efetivas para duas categorias distintas: pessoas em função ocupacional e o público em geral. Para os primeiros o limite de dose recomendada é de 20 mSv por ano, sendo a média calculada em períodos de 5 anos. Entretanto há uma condição adicional: a dose efetiva não deve exceder 50 mSv em nenhum desses 5 anos, individualmente. Nessa categoria, há restrições adicionais para mulheres grávidas. Para o público em geral, o limite de dose é de 1 mSv por ano, também calculado como uma média durante 5 anos. A dose efetiva pode eventualmente ser maior do que 1 mSv em um certo ano, mas a média sobre os 5 anos não deve exceder 1 mSv/ano.

Desde 1994, a FAA tem se mostrado ciente das possíveis consequências de uma exposição à radiação ionizante não controlada. Assim, a mesma considera a

tripulação de voo como trabalhadores ocupacionais, restringindo suas doses a 20 mSv/ano como mencionado no parágrafo anterior. Quando se trata de tripulantes grávidas, o limite aceitável é ainda menor, não podendo ultrapassar 1 mSv durante o período da gravidez, de forma que não seja maior que 0,5 mSv ao mês. Um fato importante a ser citado aqui é que, em toda história de operação do Concorde, o nível de radiação média de voo foi cerca de 10 μ Sv/h, ou seja 0,01 mSv/h, calculado pela razão do total de dose acumulada pelo número de horas voadas calço a calço (DAVIES, 1993).

3 MÉTODO DE PESQUISA

Para investigar um tema ou problema científico é necessário definir com clareza os objetivos da pesquisa e os instrumentos que serão utilizados para se chegar a uma resposta. Gil (2008) discute os pressupostos básicos sobre métodos e níveis de pesquisa nas ciências sociais, mas que também podem ser aplicados na área científica.

O presente trabalho, conforme classificação apresentada por Gil (2008), caracteriza-se como uma pesquisa explicativa, pois busca investigar as relações entre a intensidade da radioatividade com fatores como duração, altitude e rota de voos e, também, a natureza dessas relações e suas possíveis implicações na saúde de tripulações e passageiros frequentes. Outrossim, o método da pesquisa realizada é essencialmente experimental, uma vez que as principais medidas da radioatividade foram realizadas em um período fixo de tempo (1h) e em níveis de cruzeiro, em diferentes voos. Entretanto, não foi possível fazer um estudo experimental sistemático, pois não houve como controlar todas as variáveis ou mesmo variar altitudes ou rotas para realizar um grande número de medições.

Medidas de radiação ao nível do solo e em voos podem ser feitas com diferentes equipamentos de detecção, dentre os quais um contador Geiger, cujo princípio de funcionamento baseia-se na propriedade de ionização da radiação.

Basicamente, um contador Geiger é constituído de um tubo cilíndrico sensível à radiação conectado a uma bateria. Este tubo, conhecido como Geiger-Müller, tem um fio ao longo do seu eixo central conectado ao terminal positivo da bateria. Quando a radiação penetra no cilindro elétrons são arrancados do gás, os quais sofrem novas colisões provocando uma cadeia de ionizações. Assim, o gás torna-se condutor durante um curto intervalo de tempo e ocorre uma descarga elétrica. Esse sinal elétrico, após amplificação, é registrado no visor, deslocando um ponteiro na escala do aparelho analógico, ou ainda emitindo um sinal sonoro, ou registrando um

novo valor no visor no caso de um contador Geiger digital. A figura 3.1 apresenta o esquema básico desse tipo de detector de radiação.

A figura 3.2 é uma fotografia do contador Geiger utilizado neste trabalho para avaliar as diferenças na intensidade da radiação ao nível do solo e em voos. Cabe mencionar que, dentro da aeronave, o contador Geiger registra essencialmente a radiação γ , pois as partículas α e β são bloqueadas pela fuselagem do avião (PAVÃO, 2009).

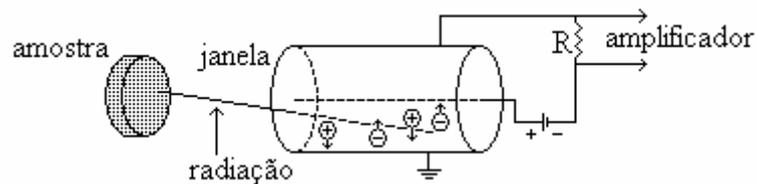


Figura 3.1: Esquema básico de um contador Geiger.

Fonte: Brückmann e Fries (1991).

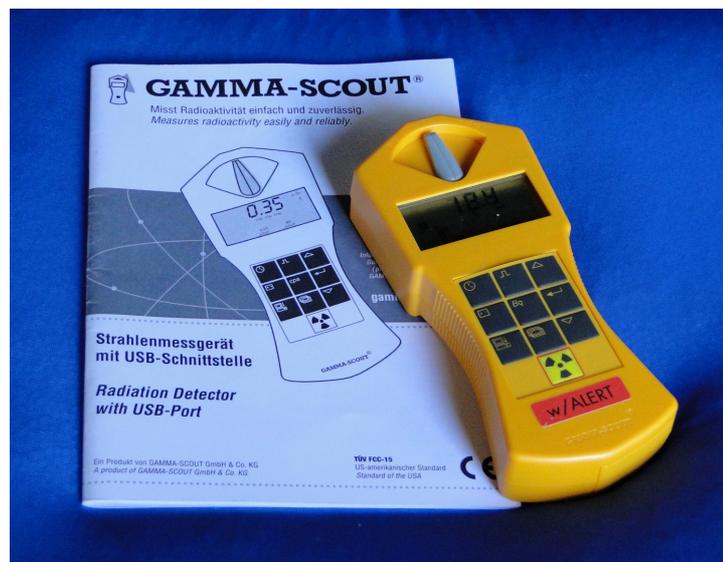


Figura 3.2: Fotografia do contador Geiger.

Fonte: O autor (2011).

Para obter dados sobre a radioatividade em diferentes altitudes foram realizadas medidas em voos comerciais domésticos e internacionais e em solo no período de junho a dezembro de 2010. Foram realizados dois tipos de registro da radioatividade local. Em um deles, o contador Geiger foi ajustado para medir pulsos/hora durante períodos de uma hora, ou seja, quantos raios α , β ou γ atingiram a janela do equipamento durante uma hora. As medidas foram realizadas nos níveis mais altos de voo, com pouca variação de altitude. No outro tipo, registrou-se a variação do equivalente de dose ($\mu\text{SV/h}$) em alguns procedimentos de descida e pouso.

Segundo o manual do equipamento de medida utilizado nesse trabalho, a conversão de pulsos por minuto para dose depende da intensidade do pulso inicial. Assim, para ambientes em que a radiação é da ordem de $0,2 \mu\text{Sv/h}$, pode-se utilizar como fator de conversão $142 \text{ pulsos/segundo} = 1,0 \mu\text{Sv/h}$.

Em muitos países, o cálculo da dose de radiação para tripulação em voo é feito utilizando-se programas computacionais especiais como, por exemplo, EPCARD, CARI, PC-AIRE, etc (Lewis *et al*, 2001). Esses programas são reconhecidos pela suas respectivas autoridades aeronáuticas (LBA, FAA, TCCA) e, alguns deles, podem ser encontrados em diferentes versões no próprio sítio do seu órgão regulador como, por exemplo, CARI-6 e CARI-6M. A figura 3.3 exemplifica os resultados obtidos através da utilização de dois diferentes programas: EPCARD e CARI-6.

Valores de dose efetiva E para determinadas rotas de voo e em datas que correspondem a períodos de grande intensidade da radiação solar, entre 1992 e 2001, são apresentados na figura 3.3. Uma comparação entre as duas últimas colunas mostra que, numa expressiva maioria dos voos indicados na figura, os valores calculados com a utilização do EPCARD são mais elevados do que os obtidos pelo CARI-6.

Rota do Voo	Data	Dose efetiva E EPCARD (μ SV)	Dose efetiva E CARI-6 (μ SV)
Helsinki – New York(JFK)	27/03/1998	49,7	37,5
Copenhagen - Bangkok	13/12/1998	30,2	26,3
Paris - Washington	14/01/1998	54,5	41,9
Paris – New York	21/08/1996	43,7	35,4
San Francisco - Paris	04/03/1996	76,2	62,4
Paris – San Francisco	03/03/1996	84,9	69,9
London – Tokyo 1997/06	Jun-Jul 1997	67,0	54,3
Prague - Dubai	14/05/1992	18,2	19,5
Prague - Moscow	17/12/1992	8,7	7,6
Prague - Stockholm	11/01/1993	7,6	6,3
Paris - Prague	31/01/1995	3,6	3,0
Oslo – Prague	29/01/1999	7,1	5,3
Frankfurt - Fairbanks	29/07/1997	50,8	40,6
Frankfurt – New York	27/10/1997	43,0	32,0
Frankfurt - Dakar	11/02/1998	16,0	17,1
Frankfurt - Bahrain	22/03/1998	15,9	14,9
Madri – Santiago de Chile	13/03/2001	27,5	34,4
Madri – México City	02/04/2001	41,3	38,6
Madri – Paris Orly	27/04/2001	3,5	3,5
Madri – New York	28/04/2001	24,3	21,9
Madri - Miami	13/06/2001	27,0	24,4
Madri - Johannesburg	11/08/2001	17,7	21,4
Madri – Stockholm	21/08/2001	12,0	11,8
Madri – Buenos Aires	12/09/2001	20,9	24,1
Dublin – Los Angeles	Ago-Out 2001		56,9

Figura 3.3: Comparação de doses de radiação em rotas.

Fonte: Lindborg et al (2004).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As medidas de radioatividade realizadas nesta pesquisa foram feitas nos voos domésticos Porto Alegre – São Paulo – Porto Alegre e nos internacionais São Paulo – Roma – Cairo - Alexandria e Porto Alegre –Montevidéu - Santiago.

A figura 4.1 apresenta as medidas de radioatividade feitas em aeroportos e voos Porto Alegre – São Paulo – Roma - Cairo – Alexandria em junho de 2010. Os valores na última coluna expressam o número de contagens radioativas durante o período de 1h, contada a partir do horário especificado na terceira coluna.

Altitude aproximada	Local	Data – Horário Z	Contagens (pulsos/hora)
3 m	Saguão Aeroporto de Porto Alegre	21/06/10 – 12h40	1.475
	Voo JJ3296 Porto Alegre- São Paulo	22/06/10 – 22h30	10.380
10.972 m	Voo AZ6675 São Paulo – Roma	23/06/10 – 05h	12.020
10.972 m	“	23/06/10 – 09h05	11.260
10.972 m	“	23/06/10 – 11h15	12.390
	Voo AZ0894 Roma - Cairo	23/06/10 – 20h30	14.080
	“	23/06/19 – 22h05	13.170
	Terminal 3 – Aeroporto do Cairo	24/06/10 - 02h10	657
	Aeroporto de Alexandria	25/06/10 - 18h45	627

Figura 4.1: Medidas da radiação total durante um intervalo de tempo de 1 hora em aeroportos e em voos comerciais (junho/2010).

Fonte: O autor (2010).

No voo São Paulo – Roma, pouco antes de iniciar o procedimento de descida e até o pouso completo, utilizou-se o contador Geiger para avaliar a variação do equivalente de dose. Verificou-se que os valores iniciais variaram entre 2,5 e 3 $\mu\text{Sv/h}$; durante a descida o valor foi baixando até 0,06 $\mu\text{Sv/h}$ e passou a aumentar quando da aproximação ao solo, permanecendo (inclusive no solo) com valores entre 0,10 e 0,18 $\mu\text{Sv/h}$.

A figura 4.2 apresenta os valores das medidas realizadas no aeroporto de Cairo e em voos Cairo – Roma – São Paulo - Porto Alegre em julho de 2010.

Local	Data – Horário Z	Contagens (pulsos/hora)
Terminal 1 – Aeroporto do Cairo	01/07/10 - 06h30	673
Terminal 1 – Aeroporto do Cairo	01/07/10 - 09h05	710
Terminal 1 – Aeroporto do Cairo	01/07/10 - 12h40	1815
Voo AZ0897 Cairo – Roma Última hora de voo incluindo procedimento de descida com 20 min de procedimento de solo (táxi e estacionamento)	01/07/10 - 16h50	6.601
Voo AZ0674 Roma – São Paulo 10.972 m sobre Oceano Atlântico	02/07/10 - 01h50	10.040
“	02/07/10 - 03h00	11.310
“ 10.972m	02/07/10 - 04h05	11.540
“ sobre a costa brasileira	02/07/10 - 05h07	12.690
Voo JJ3501 SBGR – SBPA	02/07/10 - 11h45	8.698

Figura 4.2: Medidas da radiação total durante um intervalo de tempo de 1 hora em aeroportos e em voos comerciais (julho/2010).

Fonte: O autor (2010).

Os dados das figuras acima mostram que a intensidade radioativa em voo pode ser bem maior do que o valor em solo. Comparando os valores nas duas primeiras linhas da figura 4.1, verifica-se que o número de contagens por minuto durante um intervalo de tempo de uma hora no voo JJ3296 Porto Alegre – São

Paulo é aproximadamente 7,2 vezes maior do que no saguão do aeroporto Salgado Filho. Veja-se, por exemplo, o valor medido em solo no aeroporto do Cairo (657 pulsos/h) e os valores obtidos em dois procedimentos de medida durante o voo Roma – Cairo (14.080 e 13.170 pulsos/h). Neste caso, os valores em voo são da ordem de vinte vezes o valor em solo.

Na figura 4.3 encontram-se as medidas realizadas durante voos de Porto Alegre a Santiago do Chile e em percursos rodoviários no deserto do Atacama. As três últimas linhas da figura mostram valores medidos na região de Foz do Iguaçu e em voo São Paulo – Porto Alegre. As medidas foram realizadas em dezembro de 2010. Os dados refletem, em média, o mesmo comportamento observado nas figuras 4.1 e 4.2.

Local	Data - Horário	Contagens
Voo Pluna PA-Montevideú	01/12/10 - 16h20	9.085
Voo Pluna Montevideú - Santiago	01/12/10 - 21h15	15.350
Santiago (Chile) - solo	02/12/10 - 07h (horário de Santiago)	835
Santiago (arredores da região metropolitana)	04/12/10 - 07h55	699
Estrada Costeira (depois de La Serena)	04/12/10 - 14h30	651
La Silla	04/12/10 - 16h30	1.006
La Silla (2.300 m de altitude) (European Southern Observatory)	04/12/10 - 17h55	1.041
La Vicuña (Observatório de Mamalluca)	05/12/10 - 15h55	1.143
Voo Pluna 402 Santiago – Montevideú (FL 370)	06/12/10 - 09h30	13.690
UNILA (Universidade Latino Americana) – Foz do Iguaçu (PR)	09/12/10 - 14h30	839
Aeroporto Foz do Iguaçu (PR)	11/12/10 - 17h00	829
Voo SBGR - SBPA	11/12/10 - 23h00	8.995

Figura 4.3: Medidas da radiação total durante um intervalo de tempo de 1 hora em aeroportos, em voos comerciais, em deslocamentos rodoviários na região do deserto do Atacama (Chile) e em Foz do Iguaçu (dezembro/2010).

Fonte: O autor (2010).

Os valores da tabela 4.3 mostram que no voo São Paulo – Porto Alegre o número de contagens radioativas foi aproximadamente dez vezes superior ao de contagens em solo e que em voos internacionais o fator de aumento de contagens radioativas é bem maior.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das medidas de radioatividade realizadas neste trabalho indicaram que a intensidade de radiação em níveis de cruzeiro de voos domésticos foi, em média, de sete a dez vezes superior ao valor em solo, nos aeroportos. Para voos internacionais, a intensidade de radiação em altitudes de cruzeiro foi, aproximadamente, vinte vezes superior à intensidade radioativa em solo. Utilizando dados da literatura pertinente à radioatividade e seus efeitos sobre a saúde humana, bem como as recomendações feitas pela *International Commission of Radiological Protection* sobre limites de dose efetiva para trabalhadores ocupacionais, pode-se estimar a relevância dos valores medidos durante os voos.

O valor médio da radiação natural varia com a altitude do local ou a presença de maior concentração de elementos radioativos, como no caso das areias monazíticas de Guarapari, no Espírito Santo. Segundo Okuno (1982) o valor da radiação natural em lugares habitados é da ordem de 1,25 mSv por ano, ou seja, cerca de 0,14 $\mu\text{Sv/h}$.

Levando em consideração que medidas realizadas com o contador Geiger em Porto Alegre indicaram um valor médio de aproximadamente 0,12 $\mu\text{Sv/h}$, pode-se fazer estimativas da dose de radiação mensal para porto-alegrenses. Calculando a multiplicação $0,12 \mu\text{Sv/h} \times 24\text{h/dia} \times 30 \text{ dias/mês}$ obtém-se o valor 86,4 μSv ao mês, ou seja, 86,4 $\mu\text{Sv/mês}$. Convém ressaltar que esse é um valor médio. Os níveis de radiação a que as pessoas estão diariamente sujeitas dependem também da concentração de elementos radioativos, como o Rn, em suas moradias e locais de trabalho e esses níveis variam de acordo com a composição geológica dos solos, as condições climáticas, as características da construção, hábitos de vida e tipos de ventilação, etc.

Assim, considerando que a população de Porto Alegre está sujeita a uma dose de radiação mensal de 86,4 $\mu\text{Sv}/\text{mês}$, pode-se calcular a dose anual, multiplicando esse número por 12. Portanto,

$$\text{dose de radiação anual} = 86,4 \mu\text{Sv}/\text{mês} \times 12 \text{ meses} = 1.036,8 \mu\text{Sv}/\text{ano} \approx 1,04\text{mSv}/\text{ano}.$$

Considerando-se o período de uma gravidez igual a 9 meses, pode-se estimar a dose de radiação para todo esse período, multiplicando-se 86,4 $\mu\text{Sv}/\text{mês}$ por 9, ou seja,

dose radioativa durante toda gravidez = 86,4 $\mu\text{Sv}/\text{mês} \times 9 \text{ meses} = 777,6 \mu\text{Sv}$.
Esse valor é apenas 22,4% inferior ao limite máximo (1 mSv = 1.000 μSv) estabelecido pela *International Commission of Radiological Protection* para todo o período de gravidez.

Cálculos análogos aos apresentados acima podem ser feitos para, por exemplo, passageiros frequentes e para tripulações de voo e de cabine. Entretanto, é preciso destacar que os resultados das medidas de radioatividade em voos apresentados no capítulo anterior foram realizados apenas durante períodos de uma hora, quando as aeronaves encontravam-se em nível de cruzeiro. Outras medidas foram feitas durante procedimentos de descida das aeronaves. Mas, para estimar-se com maior precisão, as doses de radioatividade para cada voo, seriam necessárias realizar várias medições de calço a calço.

Contudo, levando-se em consideração que durante uma hora de voo em altitude de cruzeiro tripulantes e passageiros estão sujeitos a uma dose de radioatividade, em média, sete vezes superior à do solo, isso significaria que um passageiro frequente que voasse 10h/mês nessa altitude estaria exposto a um acréscimo de aproximadamente 8,4 $\mu\text{Sv}/\text{mês}$, pois

$$7 \times 10\text{h} \times 0,12 \mu\text{Sv}/\text{h} = 8,4 \mu\text{Sv} \text{ durante o mês.}$$

Esse valor corresponde a um acréscimo na dose radioativa de aproximadamente 9,72%.

Sabe-se que esses valores estimados podem ser ainda maiores, dependendo de vários fatores, como altitude e rota do voo e também da data, devido aos efeitos das tempestades solares (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2000).

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, com o objetivo de avaliar os níveis de radiação cósmica em diversas altitudes de voo e seus prováveis efeitos sobre as tripulações ao longo da vida profissional, foram realizadas medidas da intensidade da radiação em solo e em diversos voos comerciais utilizando-se um contador Geiger. Os resultados, como esperado, apontaram uma contagem de pulsos por hora superior à radioatividade no solo. Essas intensidades de radiação podem representar um acréscimo em torno de 10% a 30% nos níveis de radioatividade a que estão expostos passageiros frequentes (em torno de dez horas por mês). Dependendo da carga horária mensal, esses acréscimos poderão ser bem superiores para tripulações de voo e de cabine.

Embora a exposição à radiação cósmica possa afetar os tecidos e órgãos humanos, modificando ou destruindo células, estudos recentes mostram que outros fatores de risco ocupacionais podem contribuir mais significativamente para a mortalidade de membros de tripulações de voo. Importante ressalva deve ser feita para gestantes, especialmente durante as primeiras semanas de gestação, quando ocorre expressiva multiplicação celular na formação inicial do feto. Assim, seria recomendável que membros femininos da tripulação realizassem, com frequência, teste de gravidez.

A *Internacional Commission of Radiological Protection* estabelece os valores máximos aceitáveis para exposição radioativa de trabalhadores ocupacionais e órgãos reguladores da aviação, em vários países, instituem regras para os limites de doses para tripulações. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgão superior de planejamento, orientação, supervisão e fiscalização, estabelece normas e regulamentos em radioproteção relativos à atividade nuclear no Brasil, com objetivos de garantir o uso seguro e pacífico da energia nuclear, desenvolver e disponibilizar tecnologias nuclear e correlatas. Porém, não encontramos na regulamentação aeroviária brasileira orientações específicas para os limites de intensidade radioativa em atividades aéreas.

Dentre as limitações do presente trabalho pode-se citar as dificuldades para realizar medidas de radioatividade de forma sistemática. As medidas que constam neste trabalho foram realizadas, na condição de passageiro, durante voos comerciais. Idealmente seria desejável realizar muitas medidas, em várias rotas domésticas e internacionais em diferentes altitudes, de forma a obter um conjunto completo de dados que permitisse fazer um tratamento estatístico dos mesmos.

Radioatividade é um “passageiro invisível” (BARISH, 1996) e sua presença em voos não pode ser menosprezada. É importante que as tripulações tenham conhecimento sobre a natureza e a intensidade das radiações a que estão submetidas durante suas atividades profissionais e que as condições do ambiente de trabalho em voo sejam avaliadas também sob este aspecto através, por exemplo, da utilização de dosímetros capazes de captar e registrar a radioatividade na aeronave.

REFERÊNCIAS

- BAGSHAW, M. , IRVINE, D. e DAVIES, D. M. **Exposure to cosmic radiation of British Airways flying crew on ultralonghaul routes.** Occupational and Environmental Medicine, v. 53, n. 7, 1996.
- BARISH, R. J. **The Invisible Passenger: Radiation Risks for People Who Fly.** Advanced Medical Pub., 1996.
- BRÜCKMANN, M. E. e FRIES, S. G. **Radioatividade**, Texto de Apoio ao Professor de Física, n. 2, 1991.
- DAVIES D. M. **Cosmic radiation in Concorde operations and the impact of new ICRP recommendations on commercial aviation.** Radiation Protection Dosimetry, v. 48, n. 1, 1993.
- EISBERG, R. e RESNICK, R. **Física Quântica**, 7ª ed., Rio de Janeiro: Campus, 1988.
- Federal Aviation Administration. **Crewmember Training on In-flight Radiation Exposure.** US Department of Transportation, FAA Advisory Circular 120–61A, 2004.
- FRAUENFELDER, H. e HENLEY, E.M. **Subatomic Physics**, New Jersey: Prentice-Hall, 1974.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** São Paulo: Atlas, 2008.
- HALLIDAY, D. ,RESNICK, R. e WALKER, J. **Fundamentos de Física**, v. 4, Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- HAZEN, W. E. e PIDD, R. W. **Física**, Cali: Editorial Norma, 1969.
- HEWITT, P.G. **Física Conceitual**, 9ª ed., Porto Alegre: Bookman, 2002.
- ICRP International Commission of Radiological Protection. *Publication 60 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* (Oxford: Pergamnpn Press, 1991).
- ICRP (International Commission of Radiological Protection) Publicación nº 103, Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, Editada por la Sociedad Española de Protección Radiológica com la autorización de la ICRP, 2007.
- LANGNER, I.,BLETTNER, M., GUNDESTRUP, M., STORM, H., ASPHOLM, R., AUVINEN, A., PUKKALA, E., HAMMER, G.P., ZEEB, H., HRAFNKELSSON, J.,

RAFNSSON, V., TULINIUS, H., De ANGELIS, G., VERDECCHIA, A., HALDORSEN, T., TVETEN, U., ELIASCH, H., HAMMAR, N. and LINNERSJÖ, A. **Cosmic Radiation and Cancer Mortality Among Airline Pilots: Results from a European Cohort Study (ESCAPE)**. *Radiat Environ Biophys* v. 42, 2004.

LEWIS, B.J., McCALL, M.J., GREEN, A.R., Bennett, L.G.I., Pierre, M., Schrewe, U.J., O'Briens, K. e Felsbergen, E. **Aircrew Exposure From Cosmic Radiation on Commercial Airline Routes. Radiation Protection Dosimetry**. v. 93, n. 4, 2001.

LINDBORG, I., BARTLETT, D., BECK, P., MCAULAY, I. R., SCHNUER, K., SCHRAUBE, H. e SPURNY, F. **Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew, Compilation of Measured and Calculated Data Report**. EURADOS WG 5, 2004.

MUKHIN, K. N. **Experimental Nuclear Physics**, v. 1, Moscow: Mir Publishers, 1987.

OKUNO, E., CALDAS, I. L. e CHOW, C. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**, São Paulo: Harper & How do Brasil, 1982.

OLIVEIRA FILHO, K.S. e SARAIVA, M.F.O. **Astronomia e Astrofísica**, Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2.000.

PAVÃO, A. C. **Revista de bordo não, mas o contador adverte: voar faz mal à saúde**. *Jornal da Ciência, SBPC*, 13 de janeiro de 2009.

TIPLER, P. A. **Física**, v. 2b, Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1984.

VALENTIN, J. **Radiation and your patient: a guide for medical practitioners**, *Annals of the ICRP, Supporting Guidance 2*, v. 31, n. 4, 2001.

WHEELER, J. A. **Cosmic Rays**, New York: Prentice-Hall, 1950