TÉCNICO LISBOA

Efeitos do Ambiente de Radiação Espacial em Missões Tripuladas a Marte

Ana Luísa Martins de Carvalho Casimiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Física Tecnológica

Orientadores: Professora Doutora Patrícia Carla Serrano Gonçalves
Professor Doutor Jorge Miguel de Brito Almeida Sampaio

Júri

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa Haderer de la Peña Stadler
Orientadora: Professora Doutora Patrícia Carla Serrano Gonçalves
Vogais: Professor Doutor Bernardo António Neto Gomes Baptista Tomé
Professora Doutora Maria Luísa Ferreira da Gama Velho Arruda

Junho 2016

Agradecimentos

A presente investigação deve muito a quem, a nível profissional e a nível familiar, me acompanhou e apoiou ao longo destes seis meses.

Assim, os meus primeiros agradecimentos são para os meus dois orientadores – Professora Doutora Patrícia Gonçalves, do LIP - Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas e do Instituto Superior Técnico, e Professor Doutor Jorge Sampaio, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e do LIP – pela sua permanente disponibilidade e pelo grande conhecimento científico transmitido.

Agradeço muito ao meu colega Marco Pinto o apoio sempre prestável e eficiente em momentos de dúvidas e dificuldades e pelas muitas discussões frutíferas. Agradeço também à Doutora Luísa Arruda, colega de gabinete no LIP, a sua ajuda e explicações sempre que me foi necessário.

No plano familiar, um obrigada à minha mãe, pelas sugestões e revisões de partes desta tese, assim como à minha irmã, ao meu pai e aos meus avós, pelo apoio moral. E ao meu namorado, Zé Fernandes, agradeço o apoio e ajuda de todas as horas e os comentários construtivos sobre este trabalho.

Finalmente, um agradecimento ao LIP, instituição que muito acolhedoramente me recebeu e providenciou as condições para uma mais eficiente e cuidada realização deste trabalho.

Resumo

As viagens tripuladas a Marte são o próximo passo na expansão humana no Sistema Solar. A NASA propõe-se iniciar estas missões a Marte na década de 2030. Um dos fatores que mais condiciona a viabilidade destas missões é o elevado risco de exposição à radiação. Para proteger, da melhor maneira possível os astronautas, é preciso estudar o ambiente de radiação espacial e os seus efeitos nos tecidos e órgãos humanos.

Neste trabalho, estudam-se os diferentes ambientes de radiação presentes numa missão a Marte, e utilizando a ferramenta Geant4, simula-se a interação da radiação com um fantoma antropomórfico de referência (esfera ICRU), para os diferentes ambientes de radiação espacial. A partir dos valores de energia depositada pelos diferentes tipos de partículas, quantifica-se, através dos conceitos de dose absorvida e dose equivalente, a exposição dos astronautas, nas diferentes fases de missão de três cenários propostos pela NASA.

Os resultados de dose equivalente obtidos para cada cenário de missão encontram-se fora das restrições de dose para astronautas, se não for considerada blindagem. No entanto, no caso de existência de blindagem, mesmo na ocorrência de um SEP similar ao de Dezembro de 2006, a missão a Marte será viável do ponto de vista da exposição à radiação por parte dos astronautas. Contudo, no caso da ocorrência de eventos SEP mais intensos, as doses equivalentes pode exceder as restrições estabelecidas. Isto exige mais esforços na otimização do design da blindagem e da escolha da trajetória para reduzir a exposição à radiação abaixo das restrições.

Palavras-chave: Ambiente de Radiação, Missão a Marte, Dose em astronautas, Missões Tripuladas, Simulações

Abstract

Manned missions to Mars are the next step in human exploration of the solar system. NASA plans to send a manned mission to Mars in the decade of 2030. One of the most limiting factors to this kind of missions is the radiation hazard. To provide a better protection of the crew it is necessary to fully understand the radiation environment in space and its effects of human organs and tissues.

In the present work, the different radiation environments that exist during a mission to Mars are discussed and the Geant4 simulation toolkit is used to simulate the interaction between radiation and the anthropomorphic computation phantom (ICRU sphere) for each spacial radiation environment. Starting with the determination of the deposited energy for each type of particle, the exposure of the astronauts to radiation through the concepts of absorbed dose and equivalent dose, during the different phases of the three missions profiles proposed by NASA.

The results for the absorbed dose and equivalent dose in each mission profile are not compatible with the dose restriction values provided by NASA, if shielding is not considered. However, even in the presence of a SEP event similar to the one of December, 2006, if spacecraft shielding is considered, the mission to Mars is viable in what concerns radiation hazard to astronauts. However, harder and more intense SEPs may exceed these limits. This calls for efforts in shielding design and trajectory optimization to reduce the radiation exposure below the dose constraints.

Keywords: Radiation Environment, Mars Mission, Dose in astronauts, Manned Missions, Simulations

Índice

Agradecimentos iii
Resumo v
Abstract vii
Lista de Tabelas xii
Lista de Figuras xv
Glossário xvii

1 Introdução **1**
1.1 Motivação e Objetivos 1
1.2 Estado da Arte 2
1.2.1 Ambientes de Radiação 2
1.2.2 Cenários das missões propostas 8

2 Grandezas Dosimétricas e Efeitos Biológicos da Radiação **13**
2.1 Grandezas Dosimétricas 13
2.1.1 Grandezas Físicas 13
2.1.2 Grandezas de Proteção 14
2.1.3 Grandezas Operacionais 15
2.2 Efeitos Biológicos da Radiação 16
2.2.1 Interação da Radiação com a Matéria 16
2.2.2 Danos Diretos e Indiretos 17
2.2.3 Efeitos Determinísticos e Estocásticos 17
2.2.4 Limites e Restrições de Exposição à Radiação 18

3 Métodos e Simulações **21**
3.1 Ferramentas de Simulação 21
3.1.1 Geant4 21
3.1.2 SPENVIS 21
3.1.3 dMEREM 22
3.2 Implementação da Simulação 23
3.2.1 Normalização absoluta e fator de ponderação dos espectros 23
3.2.2 *Input* Geant4 25

3.2.3 Implementação Geant4 26
3.2.4 *Output* Geant4 30
3.2.5 *Input* SPENVIS/dMEREM 30
3.2.6 Análise de Dados no ROOT 34
3.2.7 *Input* NASA 35

4 Resultados e Discussão **37**
4.1 Resultados sem Blindagem 37
4.1.1 Energia Depositada 37
4.1.2 Perda de Energia 40
4.1.3 Taxas de dose absorvida e dose equivalente 42
4.1.4 Dose absorvida e Dose equivalente por cenário de missão 46
4.2 Resultados com Blindagem 49
4.2.1 Energia Depositada 49
4.2.2 Perda de Energia 53
4.2.3 Taxas de dose absorvida e dose equivalente 54
4.2.4 Dose absorvida e Dose equivalente por cenário de missão 57

5 Conclusões **61**

Bibliografia **65**

Lista de Tabelas

1.1 a) Duração e b) fontes de radiação e intervalos de energia, para as diferentes fases dos três cenários de missão a Marte 11

2.1 Fator de peso da radiação, w_R, em função do tipo de radiação 15
2.2 Comparação de efeitos determinísticos e estocásticos 18
2.3 Limites anuais de dose para a população geral e para trabalhadores expostos e restrições anuais de dose para astronautas 19
2.4 Restrições de dose para astronautas em diferentes períodos de exposição 19
2.5 Restrições de dose para a carreira de astronautas, por género e idade 20

3.1 Comparação das partículas e intervalos de energia das fontes de radiação nos casos real e simulado 26

4.1 Taxas de dose absorvida na fase de saída da Terra da missão 42
4.2 Taxas de dose absorvida na fase de cruzeiro da missão 44
4.3 Taxas de dose absorvida na fase de estadia na superfície de Marte 45
4.4 Comparação das contribuições para a dose absorvida total de cada partícula constituinte para o caso de GCR no mínimo e máximo de atividade solar 46
4.5 Taxa de dose equivalente para as diferentes fases da missão 46
4.6 Dose absorvida para as diferentes fases dos cenários de missão propostos 47
4.7 Dose equivalente para as diferentes fases dos cenários de missão propostos 48
4.8 Taxas de dose absorvida na fase de saída da Terra da missão, considerando blindagem . 54
4.9 Taxas de dose absorvida na fase de cruzeiro da missão, considerando blindagem 55
4.10 Taxas de dose absorvida na fase de estadia na superfície de Marte, considerando blindagem 56
4.11 Taxa de dose equivalente para as diferentes fases da missão, considerando blindagem . 57
4.12 Dose absorvida para as diferentes fases dos cenários de missão propostos, considerando blindagem 58
4.13 Dose equivalente para as diferentes fases dos cenários de missão propostos, considerando blindagem 59
4.14 Comparação dos valores de dose equivalente entre os dois casos sem e com blindagem 60

5.1 Comparação dos valores de dose equivalente entre os dois casos sem e com blindagem 62

Lista de Figuras

1.1 Ciclos de atividade solar 2
1.2 *Flare* solar 3
1.3 Ejeção de massa coronal 3
1.4 Correlação entre a ocorrência de eventos SEP e os ciclos de atividade solar 4
1.5 Espectro de raios cósmicos obtido por várias experiências 5
1.6 Modulação do espectro de GCR nos mínimo e máximo de atividade solar 5
1.7 Correlação inversa entre a atividade solar e o fluxo de GCR 6
1.8 Comparação dos fluxos integrados de um evento SEP e de GCR, no mínimo e máximo de atividade solar 6
1.9 Configuração das cinturas de Van Allen 7
1.10 Comparação dos espectros integrais em função da energia para os diferentes ambientes de radiação 8
1.11 Configuração do cenário de missão de curta permanência 9
1.12 Configuração dos cenários de missão de longa permanência 10
1.13 Comparação das durações de cada fase para os três cenários de missão 11

2.1 Fator de peso para neutrões, w_R, em função da energia do neutrão 15
2.2 Feixe expandido e alinhado e esfera ICRU, gerada no Geant4 16
2.3 Mecanismos possíveis de dano numa célula por exposição a radiação ionizante 18

3.1 Elementos de órbita 22
3.2 Distribuição de protões aprisionados nas cinturas de Van Allen calculada com o modelo AP-8 22
3.3 Distribuição de eletrões aprisionados nas cinturas de Van Allen calculada com o modelo AE-8 23
3.4 Diagrama descritivo da implementação da simulação e análise 23
3.5 Representação e comparação dos espectros real e simulado 25
3.6 Espectro simulado dos protões na esfera ICRU simulados com uma distribuição $1/E$ num feixe expandido e alinhado 26
3.7 Casos de simulação considerados: a) sem e b) com blindagem 27

3.8 Simulação de 100 eletrões com energias entre 100 keV e 50 MeV a) sem e b) com blindagem . . . 27
3.9 Simulação de 100 protões com energias entre 1 MeV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem 28
3.10 Simulação de 100 partículas α com energias entre 1 MeV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem . . . 28
3.11 Simulação de 100 núcleos de Oxigénio com energias entre 1 MeV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem . . . 28
3.12 Simulação de 100 núcleos de Ferro com energias entre 1 MeV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem . . . 28
3.13 Simulação de 100 fotões com energias entre 1 keV e 90 MeV a) sem e b) com blindagem 30
3.14 Simulação de 100 neutrões com energias entre 1 eV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem 30
3.15 Espectro de protões e eletrões aprisionados nas cinturas de Van Allen . . . 31
3.16 Espectro de GCR, nos mínimo e máximo de atividade solar, por partícula constituinte . . 32
3.17 Espectro de protões num evento SEP . . . 32
3.18 Comparação do espectro de GCR, para protões e partículas α, nos mínimo e máximo solar, obtidos a 1 UA do Sol e numa órbita de Marte . . . 33
3.19 Espectros do evento SEP de 2006, medido pelo satélite GOES-11 . . . 33
3.20 Espectros à superfície de Marte, utilizando o espectro de GCR de a) protões e b) partículas α, como radiação primária . . . 34

4.1 Distribuição da energia depositada para o espectro de partículas aprisionadas nas cinturas de Van Allen . . . 38
4.2 Distribuição da energia depositada (para o espectro de GCR no mínimo solar para partículas primárias: a) protões, b) α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro . . . 38
4.3 Distribuição da energia depositada para o espectro de GCR no máximo solar para partículas primárias: a) protões, b) α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro . . . 39
4.4 Distribuição da energia depositada para protões do evento SEP . . . 39
4.5 Distribuição da energia depositada para os espectros em Marte para partículas primárias: a) fotões, b) eletrões, c) protões e d) neutrões . . . 41
4.6 Distribuição da energia depositada total em função da energia primária (espectro de GCR de protões no mínimo solar) . . . 41
4.7 Distribuição da energia depositada total em função da energia primária (espectro de GCR de núcleos de Ferro no mínimo solar) . . . 42
4.8 Dose absorvida para eletrões e protões aprisionados nas cinturas de Van Allen . . . 43
4.9 Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro de GCR nos a) mínimo e b) máximo solar . . . 44
4.10 Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro de radiação em Marte, provenientes de GCR de a) protões e b) partículas α . . . 45

4.11 Dose equivalente, para cada um dos três cenários propostos, por ambiente de radiação, nos a) mínimo e b) máximo solar 48
4.12 Distribuição da energia depositada para o espectro de partículas aprisionadas nas Cinturas de Van Allen, considerando blindagem 50
4.13 Distribuição da energia depositada (para o espectro de GCR no mínimo solar para partículas primárias: a) protões, b) α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro, considerando blindagem 50
4.14 Distribuição da energia depositada para o espectro de GCR no máximo solar para partículas primárias: a) protões, b) α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro, considerando blindagem 51
4.15 Distribuição da energia depositada para protões do evento SEP, considerando blindagem 51
4.16 Distribuição da energia depositada para os espectros em Marte para partículas primárias: a) fotões, b) eletrões, c) protões e d) neutrões, considerando blindagem 52
4.17 Distribuição da energia depositada total em função da energia primária (espectro de GCR de protões no mínimo solar), considerando blindagem 53
4.18 Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro partículas aprisionadas nas Cinturas de Van Allen, considerando blindagem 54
4.19 Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro de GCR nos a) mínimo e b) máximo solar, considerando blindagem 55
4.20 Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro de radiação em Marte, provenientes de GCR de a) protões e b) partículas α, considerando blindagem 56
4.21 Dose equivalente, para cada um dos três cenários propostos, por ambiente de radiação, nos a) mínimo e b) máximo solar, considerando blindagem 59

Glossário

BIRA	Belgian Institute for Space Aeronomy
CME	Coronal Mass Ejection (Ejeção de Massa Coronal)
ESA	European Space Agency
GCR	Galactic Cosmic Radiation (Radiação Cósmica Galáctica)
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiological Units and Measurement
LEO	Low Earth Orbit
LET	Linear Energy Transfer (Transferência Linear de Energia)
NASA	National Aeronautics snd Space Administration
SEP	Solar Energetic Particles (Partículas Solares Energéticas)
UA	Unidade Astronómica

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Objetivos

O planeta Marte será o próximo passo na expansão humana no Sistema Solar. A exploração futura deste planeta poderá trazer à Humanidade um conjunto respostas sobre a vida exterior à Terra. A fim de se progredir na exploração espacial, é essencial conhecer o comportamento do organismo humano quando sujeito às condições existentes no espaço. Nomeadamente, os efeitos da radiação espacial nos órgãos e tecidos humanos.

Nesse sentido, os astronautas a bordo da Estação Espacial Internacional têm vindo a providenciar informações fundamentais, as quais permitirão melhorar a proteção das tripulações numa futura missão. É fundamental prever com exatidão quais as condições existentes em Marte que a tripulação enfrentará, tanto ao nível gravítico, como atmosférico, como ainda ao nível do ambiente de radiação marciano. Para isso, veículos robóticos e sondas espaciais estão já em funcionamento na superfície e na órbita de Marte. O veículo robótico *Curiosity*, por exemplo, mediu os níveis de radiação na sua viagem de ida até ao planeta e fornece atualmente também medidas de radiação à superfície [1].

A NASA propõe-se enviar missões tripuladas a Marte na década de 2030. Para cada um três cenários propostos vão caracterizar-se as fontes principais de radiação e, os seus fluxos e distribuições no espaço e no tempo, e estimar a partir desta informação quais os seus efeitos nos astronautas. As principais fontes de radiação no espaço que afetam missões tripuladas, nomeadamente destinadas a Marte, são: radiação cósmica galáctica (GCR); cinturas de Van Allen, que rodeiam o planeta Terra e eventos de partículas solares energéticas (SEP), emitidas pelo Sol aleatoriamente. Uma descrição pormenorizada destes ambientes de radiação será feita na secção 1.2.1.

Para isso, neste trabalho determina-se a dose absorvida e a dose equivalente para os três cenários propostos, utilizando um modelo antropomórfico padrão representativo de um astronauta (esfera ICRU).

Uma vez conhecida a composição da radiação ionizante e estimadas as doses que atingem os astronautas, é possível compreender em que medida afetam a sua saúde.

Estas quantidades dosimétricas serão determinadas, utilizando a ferramenta Geant4, que permite simular a interação da radiação com a matéria, no intervalo de energias e composição relevantes no ambiente de radiação espacial que afeta as tripulações.

1.2 Estado da Arte

1.2.1 Ambientes de Radiação

Numa missão interplanetária, as diferentes fontes de radiação apresentam fatores de risco distintos, dependendo nomeadamente, do trajeto e dos períodos decorridos em cada fase. A maior fonte de perigo são os eventos de partículas solares energéticas, os quais embora raros, são produzidos de forma aleatória no Sol, implicando que a sua previsão seja muito difícil. A radiação cósmica galáctica constitui uma fonte de perigo, devido ao seu efeito cumulativo ao longo do tempo, pois apesar dos baixos fluxos, caracteriza-se por partículas geradas altamente energéticas e é a fonte à qual os astronautas estão expostos durante mais tempo num missão a Marte. As cinturas de Van Allen sujeitam os astronautas a doses elevadas, obrigando à escolha de uma trajetória que minimize o tempo de exposição.

Ciclos de Atividade Solar e Eventos de Partículas Solares Energéticas

O Sol emite radiação continuamente, o vento solar, constituído essencialmente por protões e eletrões. O vento solar dá origem à heliosfera, que é constituída por plasma solar e o campo magnético por este produzido, protegendo o Sistema Solar da radiação cósmica [2]. Este campo magnético varia com um período de 11 anos, entre mínimos e máximos de atividade solar, como mostra a figura 1.1. As energias das partículas que constituem o vento solar é muito baixa (entre 100 eV e 3.5 keV para os protões) pelo que não colocam nenhuma preocupação de risco radiológico.

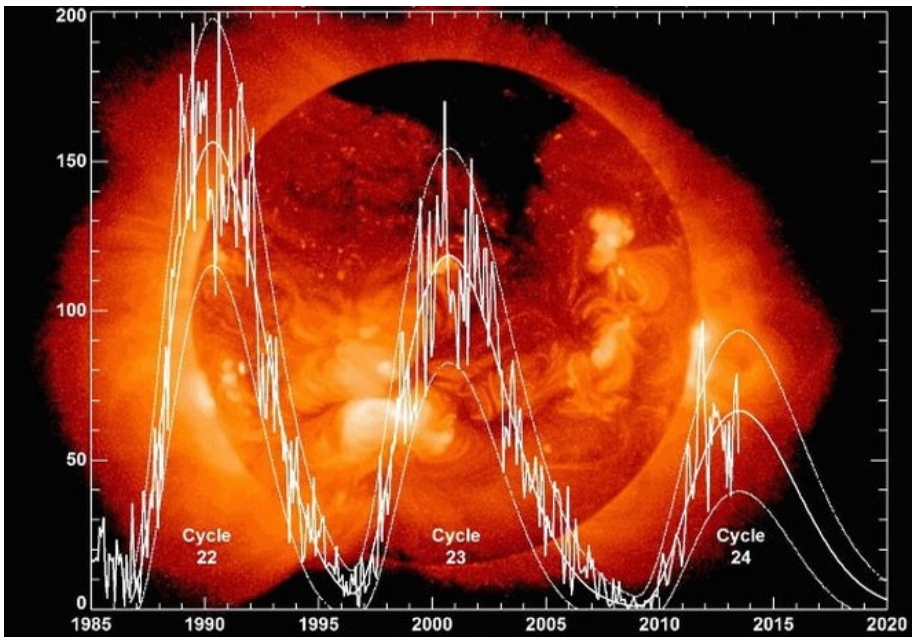


Figura 1.1: Ciclos de atividade solar [3].

Ocasionalmente, a superfície solar liberta grandes quantidades de energia, originando eventos de partículas solares energéticas (SEP). Os eventos SEP são essencialmente constituídos por protões com cerca de 5–10% de partículas α e 1% de núcleos pesados e eletrões [2]. Estes eventos podem ter origem em *flares* solares ou em ejeções de massa coronal (CME). As *flares* solares emitem radiação

γ, X e ondas rádio numa banda larga de frequências, com elevadas energias e à velocidade da luz. As CME aceleram partículas carregadas da coroa solar a energias até alguns GeV com fluxos elevados [4]. Uma comparação destes dois tipos de evento pode ser vista nas figuras 1.2 e 1.3.

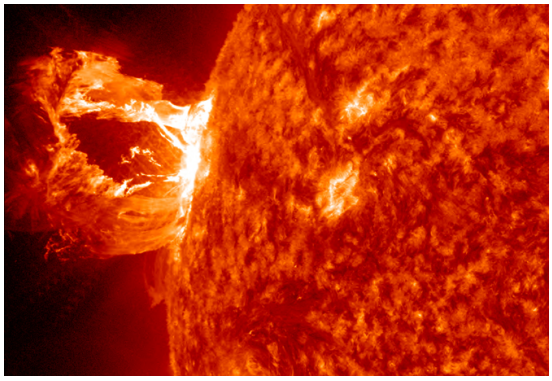


Figura 1.2: *Flare* solar [5].

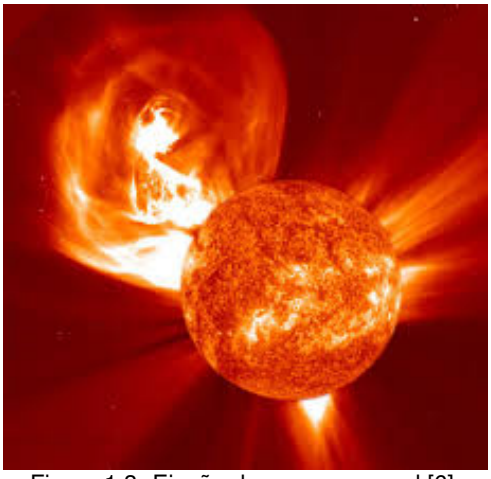


Figura 1.3: Ejeção de massa coronal [6].

Existem dois tipos de eventos SEP [7]:

- Eventos impulsivos – de pouca duração (normalmente inferior a um dia), essencialmente formados por protões; apesar de mais frequentes, não constituem perigo em termos de radiação, devido aos seus baixo fluxos;
- Eventos graduais – podem durar dias, têm fluxos maiores, são altamente difundidos em longitude, quando comparados com os anteriores, e associam-se a ejeções de massa coronal solar.

Atualmente não é possível prever a ocorrência dos eventos SEP, sabendo-se, no entanto, que a probabilidade de ocorrer um evento SEP aumenta quando o Sol se encontra num período de atividade mais intensa, também designado por máximo solar. Na figura 1.4 está representada a correlação entre a ocorrência de eventos SEP e os ciclos de atividade solar.

Do ponto de vista do risco radiológico estes eventos, embora esporádicos, representam uma grande fonte de perigo devido à sua imprevisibilidade e ao elevados fluxos e energias das partículas carregadas que os constituem. Contudo, estas partículas são deflectidas pelo campo magnético da Terra, pelo que em LEO (e à superfície) não são sentidos os seus efeitos.

Radiação Cósmica Galáctica

A radiação cósmica galáctica (GCR) é uma fonte contínua e isotrópica que consiste em núcleos de elementos químicos, acelerados a altas energias fora do Sistema Solar, mas ainda dentro dos limites da Via Láctea. Esta fonte é constituída cerca de 98% de bariões e 2% de eletrões, sendo que a componenete bariónica consiste em cerca de 85% de protões, acrescidos de cerca de 14% de partículas α (núcleos de Hélio) e cerca de 1% de outros elementos pesados [2].

O espectro de energia da radiação cósmica pode atingir os 10^{20} eV. Admite-se que estas partículas têm origem em explosões de supernovas, emissões por estrelas de neutrões, pulsares e outras objetos

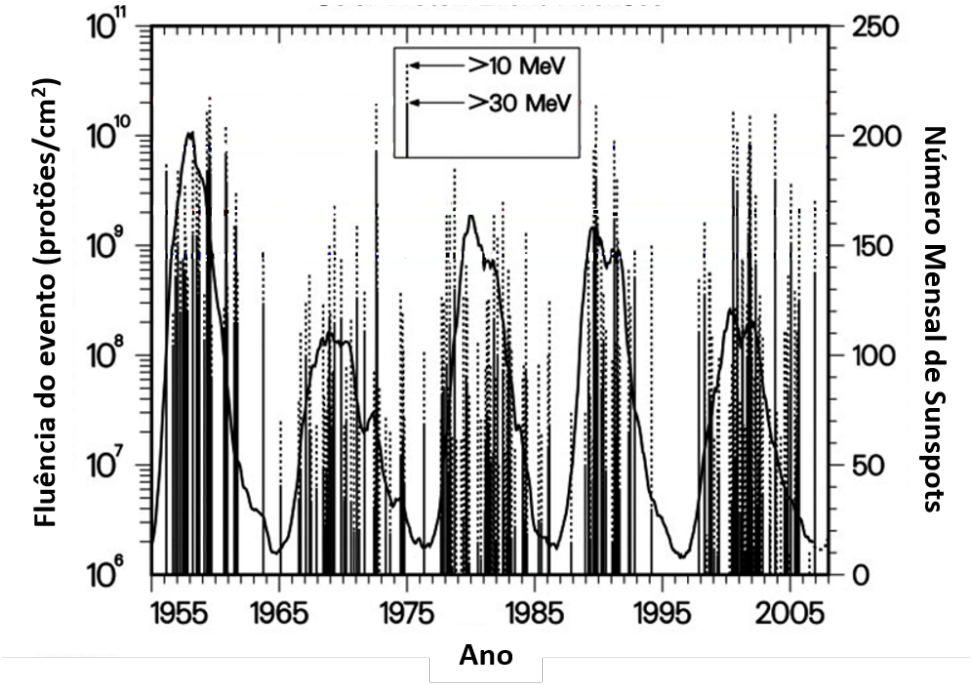


Figura 1.4: Correlação entre a ocorrência de eventos SEP e os ciclos de atividade solar [8].

estelares que emitem partículas com energias elevadas. A partir de energias da ordem de cerca de 10^{18} eV estima-se que a origem possa ser extragaláctica, pelo que GCR se consideram apenas abaixo deste valor [9].

Os efeitos na saúde das tripulações começam a ser sentidos a partir de algumas centenas de MeV/nucleão até alguns GeV/nucleão, pois acima destes valores de energias os fluxos são muito baixos e os efeitos sentidos muito pequenos. O limiar clássico dessa energia a partir do qual existem potenciais riscos para a saúde humana é de 10 MeV/nuc (proposto por Armstrong *et al*) [7].

A figura 1.5 mostra o espectro raios cósmicos (galácticos e extragalácticos) obtido com recurso a diversas experiências.

Este espectro de raios cósmicos é modulado até cerca de 10 GeV [2] pelos ciclos solares, como mostra a figura 1.6, para o caso de GCR. É possível observar, por exemplo, que para a energia de 10 MeV o fluxo, de protões, varia em mais de uma ordem de grandeza, sendo que num máximo de atividade solar, o fluxo é inferior ao fluxo observado durante os mínimos solares, isto é, a atividade solar e os fluxos dos GCR estão inversamente correlacionados, como mostra a figura 1.7. Esta modulação, deve-se ao facto de, num máximo de atividade solar o campo magnético do Sol ser mais intenso pelo que há um efeito de blindagem ao fluxo de GCR, o fluxo máximo é desviado para energias mais elevadas, uma vez que as partículas de menor energia não conseguem penetrar tão facilmente no sistema solar.

Na figura 1.8 está representada uma comparação dos fluxos integrados de um evento SEP (de 4 a 7 de Agosto de 1972) e de GCR, no mínimo e máximo de atividade solar, ao longo de uma semana.

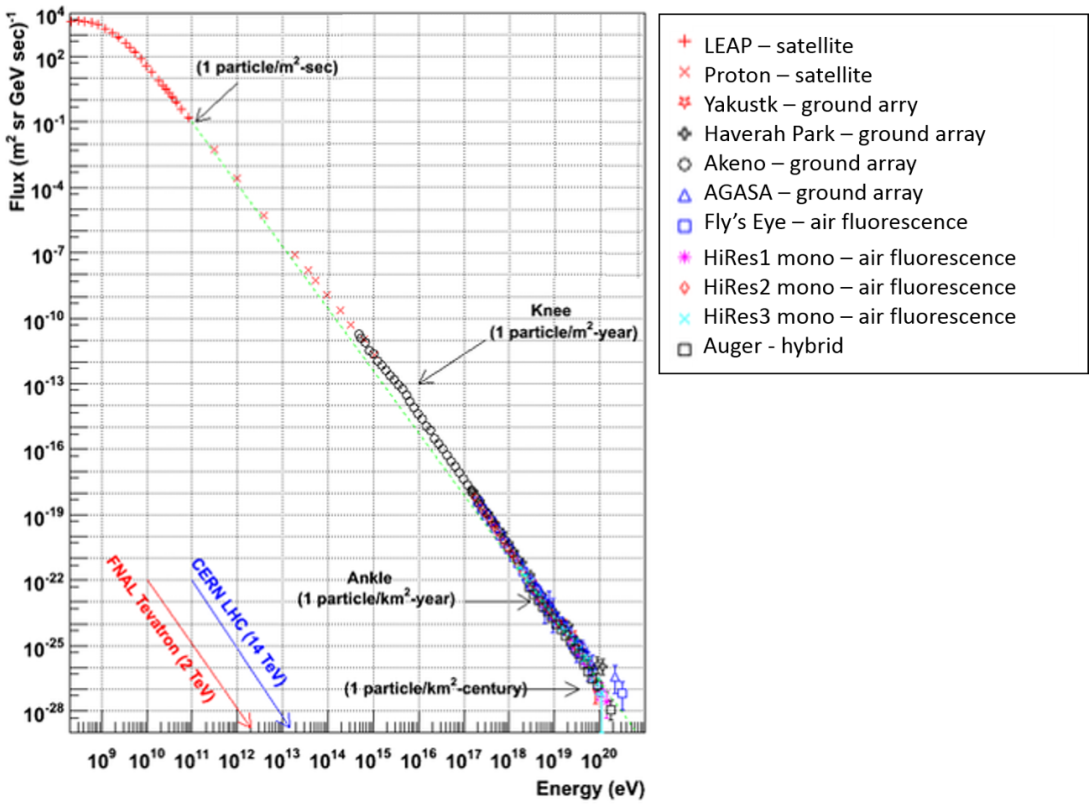


Figura 1.5: Espectro de raios cósmicos obtido por várias experiências (adaptado de [10]).

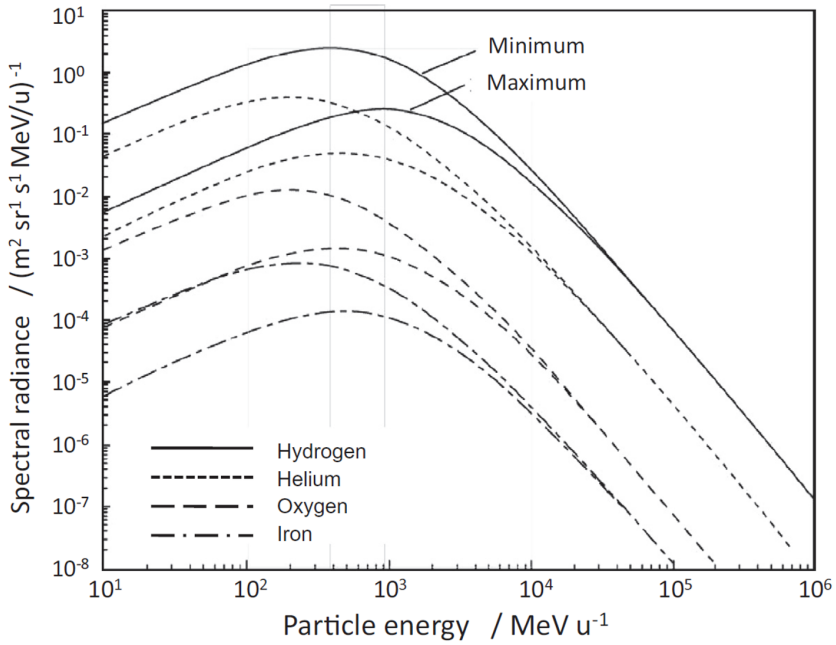


Figura 1.6: Modulação do espectro de GCR nos mínimo e máximo de atividade solar [11].

Cinturas de Van Allen

As duas cinturas de Van Allen são formadas por partículas carregadas, provenientes dos GCR e da radiação solar, bem como da sua interação com a atmosfera, que são capturadas no campo magnético terrestre. A cintura interior é constituída por eletrões e protões, resultantes do decaimento de neutrões

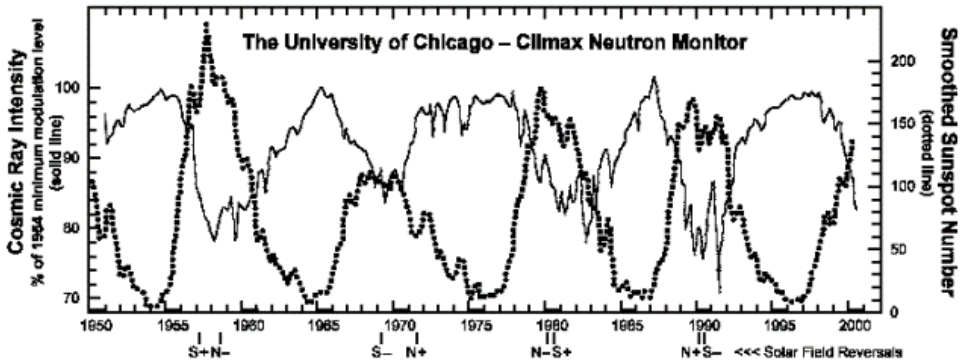


Figura 1.7: Correlação inversa entre a atividade solar e o fluxo de GCR [12].

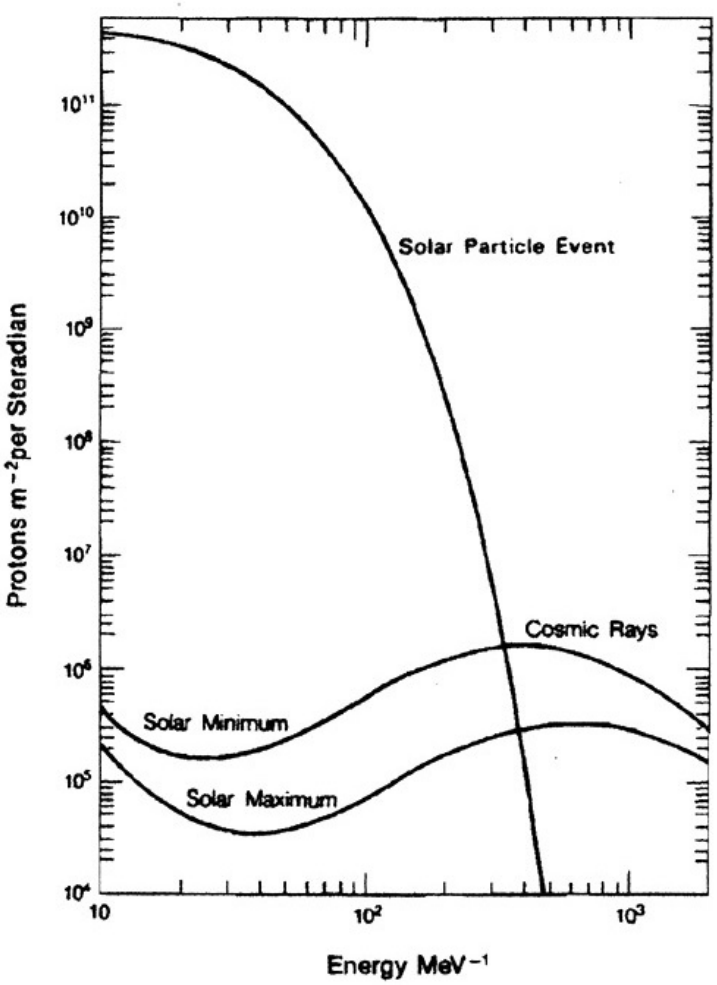


Figura 1.8: Comparação dos fluxos integrados (ao longo de uma semana) de um evento SEP e de GCR, no mínimo e máximo de atividade solar [12].

produzidos na interação dos raios cósmicos com a atmosfera. A cintura exterior é formada por partículas solares aprisionadas, sendo constituída essencialmente por eletrões. Durante as tempestades geomagnéticas, relacionadas com as erupções solares, as partículas de energia mais baixa conseguem penetrar as regiões interiores das cinturas e aí ficar aprisionadas. Existe uma considerável sobreposição entre as duas cinturas, cuja configuração esquemática é representada na figura 1.9. As cinturas de radiação situam-se entre 200 – 75 000 km em torno do equador geomagnético. A maior área de

exposição a esta radiação situa-se sobre o equador magnético da Terra, sendo a intensidade da radiação superior no centro de cada cintura. Embora, nos polos terrestres, a densidade de linhas de campo seja maior e exista o efeito de espelho magnético, pelo que há aumento da densidade de partículas carregadas nessa região. Os protões aprisionados têm energias superiores a 10 MeV, com fluxos da ordem de 10^5 cm^{-2} s^{-1}, e posicionam-se entre 1.5 e 2.5 raios terrestres, o que corresponde a 9 500 – 16 000 km acima da superfície terrestre. Quanto aos eletrões, as energias são superiores a 1 MeV, com fluxos da ordem de 10^6 cm^{-2} s^{-1} e posicionam-se entre 1 e 6 raios terrestres, o que corresponde a 6 300 – 38 000 km [7].

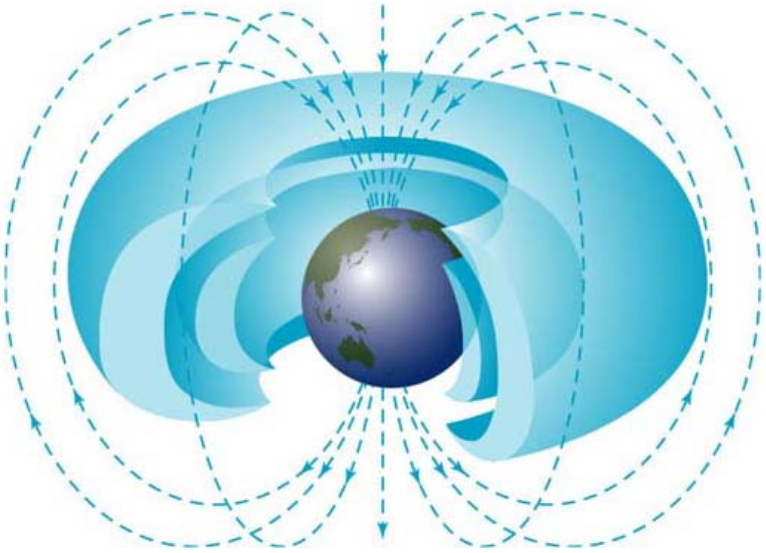


Figura 1.9: Configuração das cinturas de Van Allen [13].

Ambiente de Radiação na Superfície de Marte

Marte é desprovido de campo magnético intrínseco, o que faz com que, contrariamente ao caso da Terra, todas as partículas provenientes de eventos SEP e de GCR atingem a atmosfera do planeta.

A atmosfera de Marte é essencialmente constituída por dióxido de Carbono (cerca de 96%) com uma densidade de 600 Pa, que corresponde a cerca de 1% da atmosfera terrestre (100 000 Pa) que é cerca de 78% de Azoto. Esta diferença na densidade atmosférica proporciona um efeito de blindagem consideravelmente menor, cerca de 1.6% relativamente à Terra ($\sim$16 g cm^{-2} em vez de 1000 g cm^{-2}) [2].

Uma consequência direta destas disparidades nas características de ambos os planetas, reflete-se na exposição à radiação da superfície de Marte. O alcance de protões com energia de 150 MeV no Dióxido de Carbono é 17.8 g cm^{-2} [14], o que corresponde em média a espessura da atmosfera de Marte, o que significa que protões com energias inferiores a este valor são na sua maioria blindados pela atmosfera.

Da figura 1.6 pode concluir-se que os raios cósmicos com maior fluxo são atenuados nessa atmosfera, enquanto que os mais energéticos atingem a superfície. Quanto aos eventos SEP, são na sua

maioria absorvidos na atmosfera marciana, embora possa existir alguma penetração de partículas, no caso de eventos solares com fluxos significativos acima de 150 MeV.

A radiação de albedo é constituída por partículas secundárias, maioritariamente neutrões, emitidas após a interação das partículas provenientes da atmosfera com o solo da superfície de Marte.

Comparação

Uma comparação, dos espectros integrais em função da energia, para os diferentes ambientes de radiação representa-se na figura 1.10.

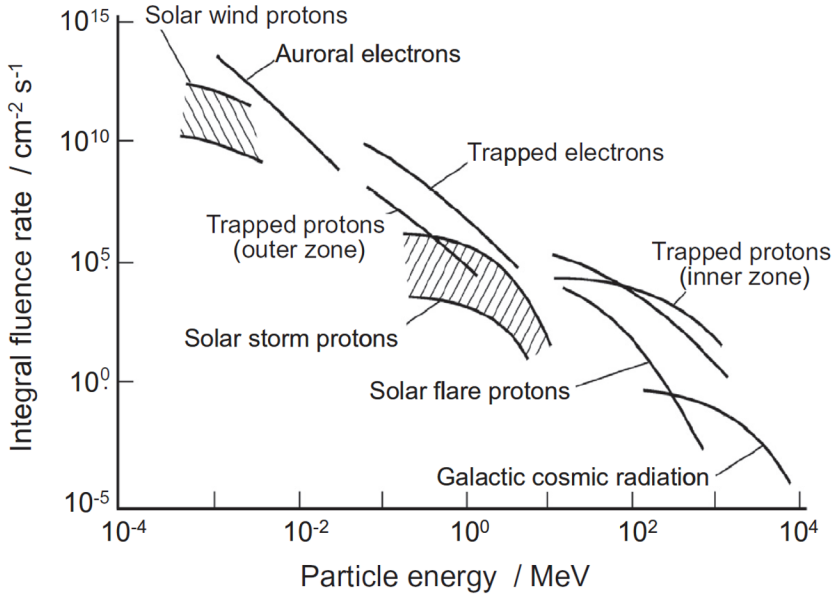


Figura 1.10: Comparação dos espectros integrais em função da energia para os diferentes ambientes de radiação presentes numa missão a Marte [11].

Observa-se na figura 1.10 que a zona que se encontra entre energias superiores a 10 MeV e fluxos inferiores a cerca de 10^4 cm^{-2} s^{-1} corresponde à comparação feita anteriormente, na figura 1.8, entre os espectros de um evento SEP e de GCR nos mínimo e máximo de atividade solar.

Também se concluí através da figura que os ambientes com espectros de maior fluxo e mais energético e que, consequentemente, representam maior risco radiológico, são os de partículas aprisionadas (eletrões e protões), com especial ênfase nos protões.

1.2.2 Cenários das missões propostas

Os diferentes cenários possíveis de missão tripulada a Marte propostos pela NASA para a década de 2030 baseiam-se em trajetórias distintas, assim como em diferentes tempos de permanência no espaço e na superfície do planeta (um cenário de curta permanência e dois de longa permanência, à superfície de Marte) [15]:

- Missão de curta permanência – estadia em Marte entre 30 e 90 dias, com um total de dias de viagem (ida e volta) entre 400 e 650.

Cerca de 90% do tempo de duração desta missão decorre no espaço a gravidade zero, em fase de cruzeiro. As fontes de radiação mais prejudiciais para a tripulação serão, então, os GCR e eventos SEP possíveis de ocorrer durante este período.

Uma grande quantidade de energia é despendida neste cenário mesmo aproveitando o ”impulso gravítico” (*swingby*) de Vénus devido à necessidade de utilizar intensivamente os propulsores para limitar as velocidades de entrada em Marte ou na Terra. Os aspetos principais que distinguem esta missão das seguintes são: a curta permanência na superfície de Marte resulta em pouco tempo para a tripulação recuperar na gravidade de Marte de 0.38g; a etapa de *swingby* de Vénus pode durar até 360 dias e ocorrer nas etapas inicial ou final da missão, dependendo das posições orbitais da Terra e Marte na altura do lançamento.

O *swingby* de Vénus atrairá a nave para o interior da órbita Vénus ($\sim$0.7 UA). Isto contribui para uma maior exposição da nave e, consequentemente, da tripulação, a intensa radiação solar, sendo necessário reforçar a blindagem para atuar como proteção da radiação. A maior desvantagem desta configuração de missão é que o aumento de massa da nave necessário para providenciar o aumento de blindagem requer ainda mais gastos energéticos, à partida já consideráveis neste cenário.

A representação esquemática da configuração desta missão pode ser vista na figura 1.11.

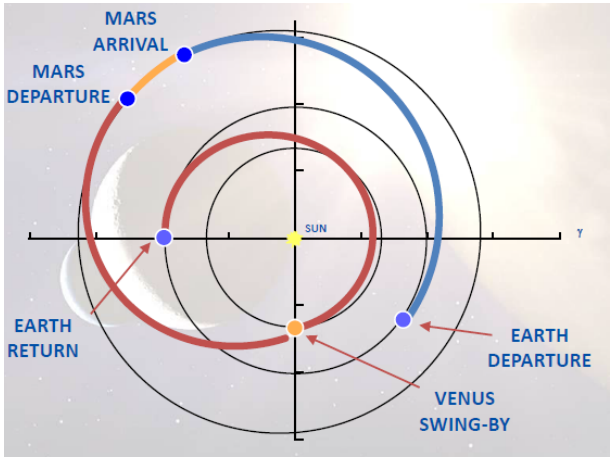


Figura 1.11: Configuração do cenário de missão de curta permanência [15].

- Missão de longa permanência (energia mínima) — estadia em Marte até 500 dias, com uma duração total de viagem de cerca de 900 dias.

  Este cenário exige o mínimo de gasto energético quanto comparado com os restantes. A solução de compromisso que o possibilita é um tempo de trânsito, longo, com cerca de 250 dias. Esta característica permite levar mais carga ou uma nave mais massiva com o mesmo custo de uma nave menor, o que diminui o número de lançamentos necessários e, mais uma vez, reduz o consumo energético da missão.

  Devido ao trânsito mais longo, os astronautas estarão sujeitos durante mais tempo ao ambiente de radiação no espaço. No entanto não deverá ser necessário a mesma quantidade de blindagem

como no caso da missão curta, uma vez que a nave nunca estará no interior da órbita da Terra.

Visto que grande parte do tempo total desta missão é passado na superfície de Marte, é necessário compreender de que modo a radiação cósmica galáctica e as partículas provenientes de eventos SEP afetarão a tripulação nesta fase. Neste cenário de missão, a nave não permanece em órbita terrestre, o que diminui o risco por exposição às partículas carregadas das cinturas de Van Allen.

A figura 1.12 representa a configuração esquemática para esta missão.

- Missão de longa permanência (trânsito rápido) — estadia em Marte superior a 600 dias, com um total de dias de viagem inferior a 900.

  Apesar dos gastos energéticos deste cenário de missão serem superior aos do anterior, são compensatórios no que toca à saúde da tripulação. O trânsito curto deste cenário implica um período mais curto de confinamento da tripulação na nave, o que tem vantagens em termos da saúde mental e física dos astronautas. Também o longo período de estadia pode permitir alguma produtividade à superfície, como construção de estruturas ou avaliação de condições no planeta mais aprofundadas.

  Os riscos para os tripulantes da exposição a radiação associados a este cenário são semelhantes ao anterior, visto que são ambos cenários de longa permanência. Porém, a exposição a GCR e eventos SEP no espaço durante a fase de cruzeiro é significativamente menor comparando com o primeiro caso, dado o tempo de trânsito também reduzido, o que faz com que esta missão beneficie de diminuição de riscos.

  A configuração esquemática para esta missão também está representada na figura 1.12.

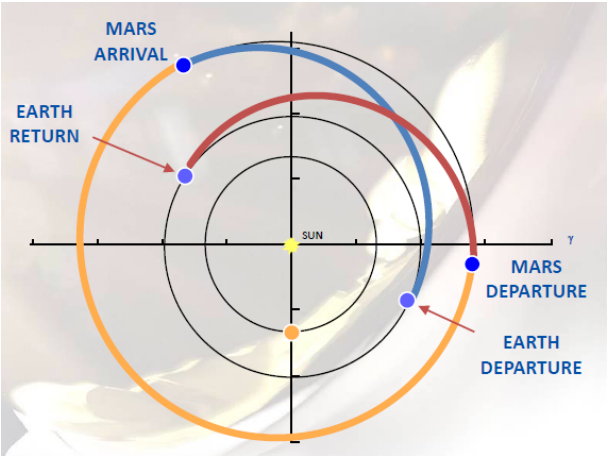


Figura 1.12: Configuração dos cenários de missão de longa permanência [15].

Uma comparação das durações em cada fase dos três cenários de missão está representada na figura 1.13.

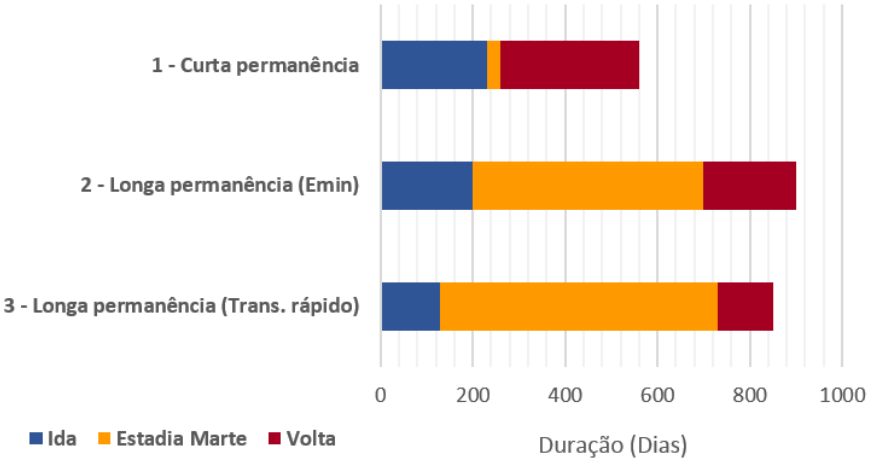


Figura 1.13: Comparação das durações de cada fase para os três cenários de missão [15].

A tabela 1.1 a) apresenta um resumo das durações das diferentes fases de cada cenário de missão a Marte e 1.1 b) contempla as principais características da radiação nos cenários de missão propostos.

a)

	MISSÃO	SAÍDA DA TERRA		FASE DE CRUZEIRO		SUPERFÍCIE DE MARTE	TOTAL
		LEO	Cinturas de Van Allen	Ida	Volta		
Duração	1 — Curta permanência	2.5 a 3 horas	1.5 horas	224 dias	291 dias	30 dias	545 dias
	2 — Longa permanência (E_{min})				237 dias	458 dias	919 dias
	3 — Longa permanência (trâns. rápido)			150 dias	110 dias	619 dias	879 dias

b)

	MISSÃO	SAÍDA DA TERRA		FASE DE CRUZEIRO	SUPERFÍCIE DE MARTE	
Fontes principais (+ eventuais SEP)	1, 2 e 3	GCR	Cinturas	GCR	GCR	Albedo
Tipos de partículas		Protões/ Iões pesados	Protões/ Eletrões	Protões/ Iões pesados	Protões/ Iões pesados	Neutrões
Energia		$\sim 10^2$ — 10^{12} MeV	$\geqslant$ 10 MeV/ $\geqslant$ 1 MeV	$\sim 10^2$ — 10^{12} MeV	$\geqslant$ 1 GeV	

Tabela 1.1: a) Duração e b) fontes de radiação e intervalos de energia, para as diferentes fases dos três cenários de missão a Marte.

Capítulo 2

Grandezas Dosimétricas e Efeitos Biológicos da Radiação

Neste capítulo descreve-se as grandezas dosimétricas e os efeitos biológicos da radiação.

2.1 Grandezas Dosimétricas

As grandezas dosimétricas subdividem-se em grandezas físicas, de proteção e operacionais. Os conceitos desta secção estão de acordo com as definições publicadas pelo ICRP - International Comission on Radiological Protection [11].

2.1.1 Grandezas Físicas

As grandezas físicas mais relevantes utilizadas em estudos dosimétricos de radiação são descritas de seguida.

- A fluência expressa o número de partículas dN a incidir na secção de uma esfera com área dA:

$$\psi = \frac{dN}{dA}. \tag{2.1}$$

  A fluência tem como unidade do sistema internacional (SI) o m^{-2}.

- O fluxo corresponde à taxa de fluência, ou seja, o número de partículas que atravessam uma determinada área num determinado intervalo de tempo dt:

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt}. \tag{2.2}$$

  A unidade no sistema internacional (SI) é m^{-2} s^{-1}.

- A transferência linear de energia (LET) corresponde à energia média perdida por uma partícula carregada num material devido a interações eletrónicas dE numa distância dl:

$$L = \frac{dE}{dl}. \tag{2.3}$$

A unidade de LET no sistema internacional (SI) é J m^{-1}, mas é usualmente utilizado o keV μm^{-1}.

- A dose absorvida corresponde à quantidade de energia total depositada E_{dep} na matéria de massa m:

$$D = \frac{E_{dep}}{m}. \tag{2.4}$$

A unidade do sistema internacional (SI) é J kg^{-1} = Gy, Gray.

2.1.2 Grandezas de Proteção

As grandezas de proteção são baseadas em doses médias absorvidas e relacionam-se com os riscos por exposição à radiação ionizante [11]. Estas grandezas não podem ser medidas diretamente em indivíduos e servem para estabelecer-se limites e constrangimentos de dose com base em modelos antropomórficos computacionais.

- A dose equivalente num órgão ou tecido $D_{T,R}$ é a soma, nos diferentes tipos de radiação R, da dose absorvida média desse tipo de radiação num determinado tecido T ponderada pelo fator de peso w_R, que reflete a eficácia biológica da radiação de elevado LET (por exemplo, protões e partículas alfa) quando comparada com partículas de baixo LET (normalmente usando raios-X como referência):

$$H_T = \sum_T w_R D_{T,R}. \tag{2.5}$$

A unidade do sistema internacional (SI) da dose equivalente é o J kg^{-1} = Sv, Sievert.

- A dose efetiva é a soma em todos os tecidos T da dose equivalente para cada tecido H_T, ponderada pelo fator w_T representativo da contribuição relativa de cada órgão ou tecido para o detrimento total resultante dos efeitos estocásticos da radiação:

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_T, R = \sum_T w_T H_T. \tag{2.6}$$

A unidade do sistema internacional (SI) da dose efetiva é também o J kg^{-1} = Sv, Sievert.

O fator de peso da radiação w_R depende desta, contudo é aplicado a todos os tecidos e órgãos do corpo humano, independentemente da degradação da radiação primária e da produção de secundários associada. Assim, o valor de w_R é tido em conta como uma média em todos os órgãos e tecidos e deve

ser aplicado para o caso de baixas doses [11]. Na tabela 2.1 estão quantificados os valores de w_R para os diferentes tipos de radiação. É de notar que o caso dos neutrões é particular, visto que w_R varia com a energia da partícula como mostra a figura 3.14.

Tipo de radiação	Fator de peso da radiação w_R
Fotões	1
Eletrões e muões	1
Protões e piões carregados	2
Partículas α e iões pesados	20
Neutrões	$2.5 + 18.2e^{-\frac{(ln(E_n))^2}{6}}, E_n <$ 1 MeV $5.0 + 17.0e^{-\frac{(ln(2E_n))^2}{6}}$, 1 MeV $\leqslant E_n \leqslant$ 50 MeV $2.5 + 3.25e^{-\frac{(ln(0.04E_n))^2}{6}}, E_n >$ 50 MeV

Tabela 2.1: Fator de peso da radiação, w_R, em função do tipo de radiação (adaptado de [11]).

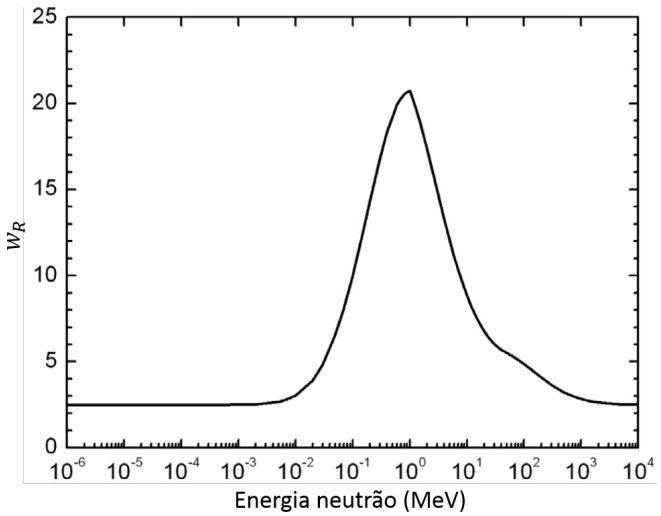


Figura 2.1: Fator de peso para neutrões, w_R, em função da energia do neutrão, em MeV (adaptado de [11]).

2.1.3 Grandezas Operacionais

As grandezas operacionais na monitorização prática da dose devido a exposições externas, sendo definidas a partir de medições em modelos antropomórficos padrão. Os valores destas grandezas servem para efetuar a calibração dos monitores de radiação e dosímetros [11].

- A grandeza base para definição das grandezas operacionais é o equivalente de dose H, definido como o produto da dose absorvida D pelo fator de qualidade para uma radiação específica Q:

$$H = QD. \tag{2.7}$$

A unidade do sistema internacional (SI) do equivalente de dose é o J kg^{-1} = Sv, Sievert.

- A esfera ICRU [11] é um fântoma computacional antropomórfico (representativo dos tecidos moles) com 30 cm de diâmetro e com densidade 1 g cm^{-3} constituída por:
  - 76.2% Oxigénio;
  - 11.1% Carbono;
  - 10.1% Hidrogénio;
  - 2.6% Azoto.

  Sendo a massa desta esfera de m=14.14 kg.

  A esfera ICRU é utilizada para definir quantidades operacionais para monitorização de radiação num determinado ponto do corpo humano. Por exemplo, o equivalente de dose de área $H*(d)$, é o equivalente de dose produzido num ponto por um campo de radiação expandido e alinhado na esfera ICRU à profundidade d. Para radiação muito penetrante define-se d=10 mm, enquanto que para radiação depositada à superfície define-se d=0.7 mm ou d=0.3 mm. O valor de $H*$(10) deve ser uma medida conservativa da dose efetiva que um indivíduo colocado nesse ponto deverá receber. Para poder utilizar esta calibração é necessário que o feixe utilizado para obter valores de dose a diferentes profundidades seja um feixe expandido e alinhado da radiação pretendida, como mostra a figura 2.2.

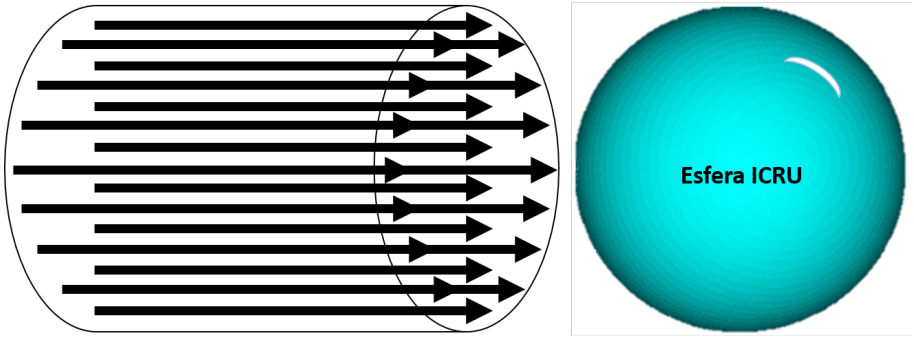


Figura 2.2: Feixe expandido e alinhado e esfera ICRU, gerada no Geant4.

2.2 Efeitos Biológicos da Radiação

2.2.1 Interação da Radiação com a Matéria

Radiação ionizante entende-se por aquela que possui energia suficiente para ionizar átomos e moléculas. O limite a partir do qual se considera a radiação com estas propriedades é de 10 eV. As partículas α (núcleos de Hélio), β (eletrões e positrões), raios γ e X e neutrões são exemplos deste tipo de radiação.

Esta categoria de radiação pode causar danos no corpo humano quando interage com os átomos das células, que formam os tecidos e os órgãos.

Estas interações com a matéria podem realizar-se através de diferentes processos:

1. Ionização – Um ou mais eletrões são removidos do átomo, fazendo com que este se torne um ião carregado;

2. Colisão com o núcleo – Várias partículas secundárias são geradas. É um evento raro com secção eficaz muito reduzida;

3. Excitação – Um eletrão transita para um nível de energia superior (neste caso não é ionizante, mas pode produzir raios-X secundários).

No primeiro caso, o facto de o átomo neutro passar a ião carregado pode quebrar ligações existentes. Assim, as moléculas podem sofrer alteração, assumindo um propósito totalmente diferente do inicial ou até, perderem totalmente a sua funcionalidade.

Quanto ao caso 2., a secção eficaz do evento é muito baixa, tornando-o menos relevante, ainda assim, quando acontece, o efeito nocivo pode ser significativo devido à geração de partículas secundárias provenientes da colisão.

No último caso 3., a excitação é temporária, visto que eventualmente o eletrão decairá para o estado de menor onde energia onde se encontrava; portanto, não há produção de efeitos nocivos significativos.

2.2.2 Danos Diretos e Indiretos

O facto de a radiação interagir com átomos no corpo humano, provoca dano direto ou indireto na integridade das células.

Diretamente, a radiação com LET elevada (tal como neutrões, protões, partículas α e núcleos pesados) pode afetar moléculas de DNA ou componentes celulares críticos, comprometendo a reprodução ou sobrevivência das células. Isto pode acontecer de tal modo que o DNA não se possa replicar ou que a informação nele contida esteja demasiado alterada, conduzindo a uma replicação defeituosa. Estes efeitos são menos frequentes, mas representam maior fonte de perigo no caso da célula sobreviver e se replicar, transmitindo o defeito.

Na forma indireta, a radiação pode interagir com a água dos tecidos, formando radicais livres que mais tarde serão absorvidos ou recombinados com outros elementos e podem, potencialmente, criar compostos tóxicos para a célula ou tecido. Estes efeitos são, geralmente, mais frequentes.

Na figura 2.3 estão representados os quatro mecanismos possíveis de dano por exposição à radiação ionizante de uma célula: reparação completa da célula; morte celular devido ao dano; morte da célula-filha após a replicação e não reparação do dano antes da reprodução, com propagação do dano para a célula-filha. Quando a mutação é propagada à célula-filha pode ocorrer formação de tumores.

Os iões pesados de alta energia produzem ionização intensa e localizada que pode causar a morte celular na grande maioria das células por eles atravessadas [17].

2.2.3 Efeitos Determinísticos e Estocásticos

Efeitos determinísticos caracterizam-se pela produção de um efeito cuja gravidade aumenta com a dose assim que esta ultrapasse um determinado limiar geralmente elevado. Este tipo de efeitos surgem no organismo, normalmente algumas horas ou semanas após a irradiação aguda de um órgão ou do corpo inteiro. No caso destes efeitos, ao nível celular pode ocorrer morte das células do órgão

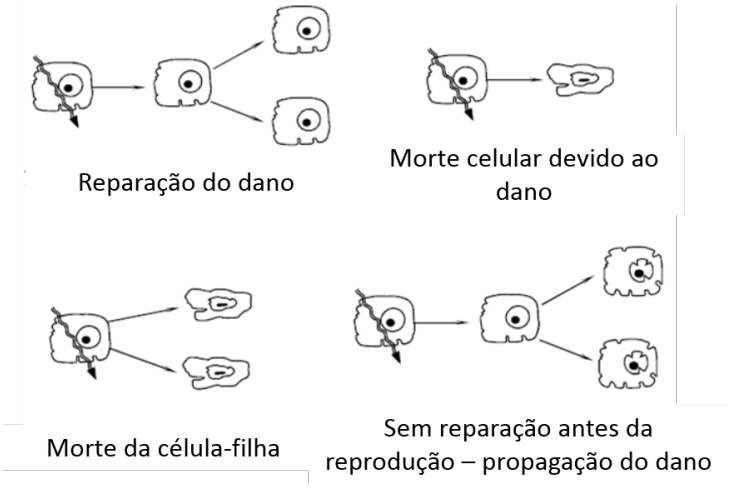


Figura 2.3: Mecanismos possíveis de dano numa célula por exposição a radiação ionizante [16].

ou impossibilidade de replicação celular o que leva a uma perda de funcionalidade do órgão. Há uma relação clara e causal entre a exposição a uma determinada dose de radiação por parte de um indivíduo e os efeitos produzidos nesse mesmo indivíduo [18].

Efeitos estocásticos são caracterizados por um aumento da probabilidade de ocorrência do efeito com a dose. Neste caso, qualquer valor de dose, mesmo pequeno, aumenta a probabilidade de ocorrência destes efeitos; ou seja, não há um limiar definido para o valor de dose, contrariamente ao que acontece no caso dos efeitos determinísticos. Os efeitos manifestam-se normalmente muitos anos após a irradiação, sendo que não há morte celular, mas sim uma mutação que após a replicação celular se pode associar à formação de tumores ou malformações nos descendentes. Também o facto destes efeitos terem uma natureza estocástica, ou seja, estatística faz com que se uma dada população for exposta a radiação, embora seja possível prever que alguns indivíduos vão ser afetados, desenvolvendo cancro, não é possível prever quais são os indivíduos [18].

Na tabela 2.2 resume-se e compara-se as características destes dois tipos de efeitos, determinísticos e estocásticos, por exposição à radiação.

	Efeitos Determinísticos	Efeitos Estocásticos
Efeitos sobre o organismo	Perda de funcionalidade	Alteração celular
Tempo de latência	Imediato ou curto	Longo ($>$20 anos)
Aumento de dose	Aumento da gravidade do efeito	Aumento da probabilidade de ocorrência
Limiar de dose	Sim	Não demonstrado

Tabela 2.2: Comparação de efeitos determinísticos e estocásticos.

2.2.4 Limites e Restrições de Exposição à Radiação

Os efeitos da radiação num ser humano dependem da profissão, da idade, do género, do estado de saúde e de outros fatores. É importante compreender que a mesma dose para diferentes tipos de radiação não representa o mesmo risco. As partículas α produzem maior dano do que partículas β, γ e

X, pois para uma determinada dose absorvida, depositam a energia de uma forma muito mais eficiente, isto é, têm uma LET maior. Pela mesma razão, estas partículas, são menos penetrantes, pelo que o dano é mais circunscrito a baixas energias.

A média global de dose anual das fontes radiação naturais (radiação cósmica, radiação terrestre de fundo, consumo de água e comida) e artificiais (aplicações médicas, produtos de consumo, exposição ocupacional, testes e acidentes nucleares) para uma pessoa é de 3.6 mSv, variando significativamente entre regiões do planeta. As normas internacionais [19, 20] permitem, contudo, práticas justificadas que conduzam a exposições individuais até 1 mSv/ano acima da radiação de fundo para membros do público e até 20 mSv/ano para trabalhadores expostos (por exemplo, trabalhadores de centrais nucleares), acima da radiação de fundo. No caso de missões espaciais, o limite permitido é maior. O considerado pela NASA para exposição em órbita perto da Terra é de 0.50 Sv/ano. Na tabela 2.3 estão comparados os valores de limite de dose anuais para as diferentes classes expostas consideradas.

Na tabela 2.3 apresentam-se os valores de limites de dose anuais para população em geral e para trabalhadores expostos e de restrições de dose anuais para astronautas, por órgão afetado.

	Limites Anuais (Sv)		
	Corpo inteiro	Olhos (0.3 cm)	Pele (0.01 cm)
População Geral	0.001	0.015	0.05
Trabalhadores Expostos	0.02	0.02	0.50
Astronautas	0.50	2.00	3.00

Tabela 2.3: Limites anuais de dose para a população geral e para trabalhadores expostos e restrições anuais de dose para astronautas, em Sv (a profundidade de penetração da radiação encontra-se entre parêntesis) [21].

As restrições de dose para astronautas podem considerar-se para períodos de 30 dias, 1 ano ou para toda a carreira, estes valores estão compilados na tabela 2.4, por tipo de órgão afetado.

	Intervalo exposição	Corpo inteiro	Olhos (0.3 cm)	Pele (0.01 cm)
Astronautas	30 dias	0.25	1.00	1.50
	Anual	0.50	2.00	3.00
	Carreira	1.00 - 4.00	4.00	6.00

Tabela 2.4: Restrições de dose, em Sv, para astronautas em diferentes períodos de exposição [21].

O valor de restrição de dose é mais baixo para astronautas mais novos, pois considera-se que estes viverão mais tempo do que astronautas mais velhos e poderão no futuro ter de se sujeitar a mais doses de radiação. Na tabela 2.5 uma comparação destes valores por idade e género [21].

Estes valores estabelecidos para restrições de exposição à radiação, em termos de valores de dose equivalente, serão utilizados na comparação com os valores de dose equivalente calculados após a modelação do ambiente de radiação espacial e simulação da interação da radiação com o fantoma computacional antropomórfico de referência (esfera ICRU), utilizando o Geant4.

A partir desta comparação é possível determinar a viabilidade de uma missão (em qualquer dos três cenários propostos pela NASA) a Marte, nos casos sem e com blindagem, do ponto de vista da

Idade (anos)	Sexo Masculino (Sv)	Sexo Feminino (Sv)
25	1.50	1.00
35	2.50	1.75
45	3.25	2.50
55	4.00	3.00

Tabela 2.5: Restrições de dose para a carreira de astronautas, por género e idade, segundo a NASA [21].

exposição de astronautas ao ambiente de radiação espacial.

Capítulo 3

Métodos e Simulações

Neste capítulo são discutidas as ferramentas computacionais e a metodologia utilizadas nas simulações da interação da radiação como o modelo antropomórfico (esfera ICRU) para os diferentes campos de radiação na missão a Marte.

Conhecendo-se as fontes de radiação e os intervalos de energias relevantes a simular pode passar-se a uma discussão mais detalhada das metodologias de cálculo escolhidas.

3.1 Ferramentas de Simulação

3.1.1 Geant4

O programa Geant4 (GEometry ANd Tracking) [22] [23] possibilita a simulação das interações da radiação com a matéria, através do método Monte Carlo. As simulações podem ser realizadas com todo o tipo de materiais (homogéneos e heterogéneos) em geometrias de complexidade arbitrária, usando modelos físicos detalhados das interações eletromagnética e hadrónica, num intervalo de energias bastante alargado até ao TeV. Esta ferramenta resulta de uma colaboração mundial de físicos e engenheiros de *software*, foi implementada na linguagem de programação C++ e utiliza, como base, a programação orientada por objetos. Tem aplicações em diferentes áreas tais como: Física de Partículas, Física Nuclear, *design* de aceleradores, Engenharia Espacial e Física Médica.

3.1.2 SPENVIS

A ferramenta SPENVIS (the SPace ENVironment Information System) [24], utilizada na obtenção dos espectros primários de GCR, partículas aprisionadas nas cinturas de Van Allen e evento SEP, é uma ferramenta desenvolvida pela ESA em colaboração com o BIRA para aquisição de espectros em diferentes altitudes e para diferentes trajetórias de naves espaciais, por exemplo, sendo ou não possível considerar campos magnéticos.

Para uma melhor compreensão dos conceitos relacionados com determinação de trajetórias orbitais, a figura 3.1 representa esquematicamente alguns desses conceitos utilizados na descrição de órbitas:

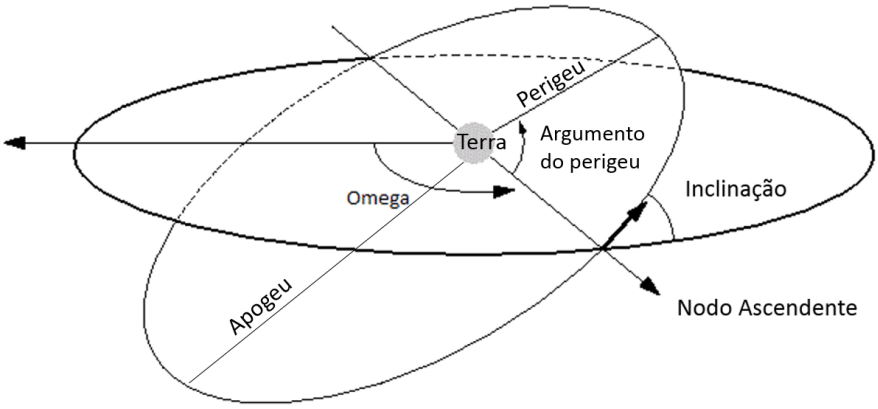


Figura 3.1: Elementos de órbita (adaptado de [25]).

Os modelos implementados no SPENVIS para as partículas aprisionadas, que se encontram descritos em [26], estão representados nas figuras 3.2 e 3.3; para os GCR estão descritos em [27].

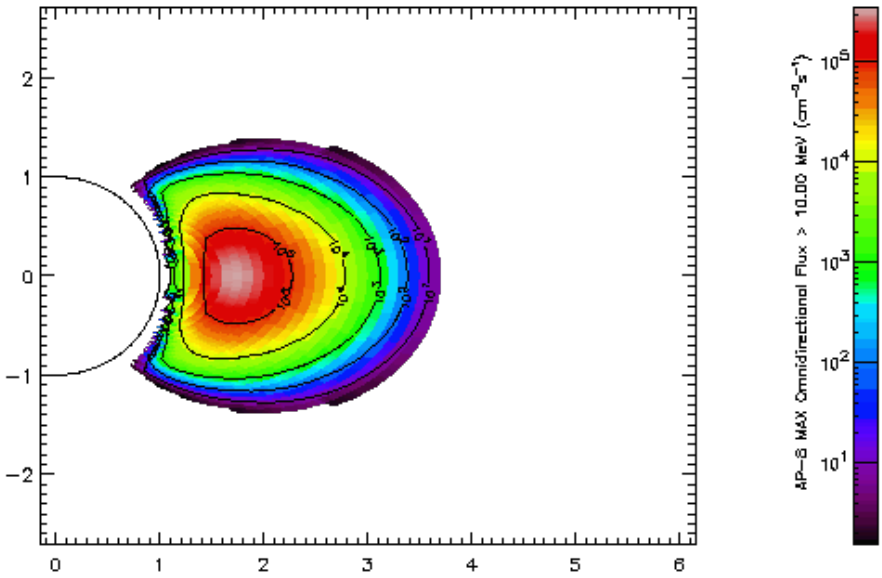


Figura 3.2: Distribuição de protões aprisionados nas cinturas de Van Allen calculada com o modelo AP-8 (unidades de raios da Terra) [26].

3.1.3 dMEREM

A ferramenta dMEREM (detailed Martian Energetic Radiation Environment Models) [28], utilizada na obtenção dos espectros após a interação de GCR com a atmosfera e o solo de Marte, foi desenvolvida para tratar detalhadamente o ambiente de radiação à superfície de Marte e no interior da sua atmosfera, bem como nas suas luas Phobos e Deimos. O modelo é uma aplicação em Geant4 baseada em métodos de simulação Monte Carlo e permite simular em grande detalhe as interações de ionização e nucleares para todas as partículas primárias e secundárias.

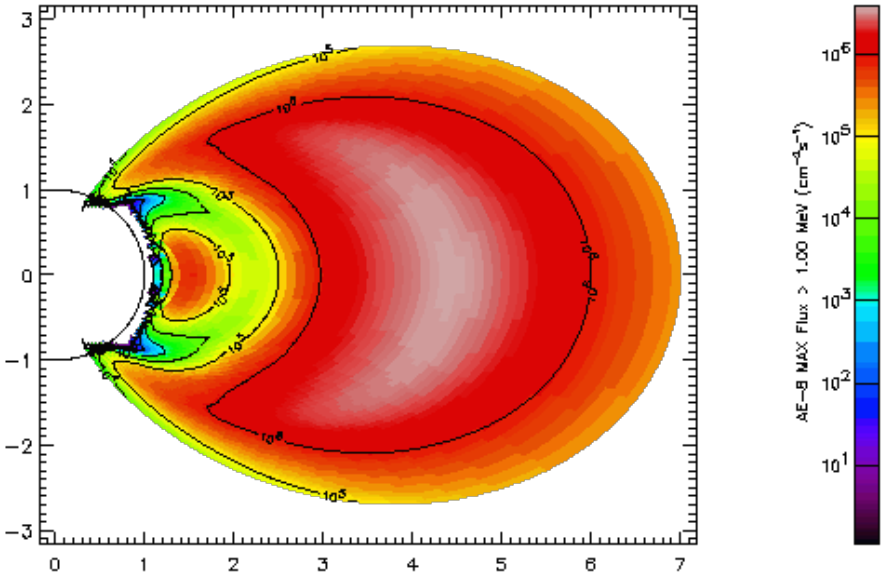


Figura 3.3: Distribuição de eletrões aprisionados nas cinturas de Van Allen calculada com o modelo AE-8 (unidades de raios da Terra) [26].

3.2 Implementação da Simulação

O esquema 3.4 ilustra o processo e os métodos utilizados para obter os resultados finais deste trabalho.

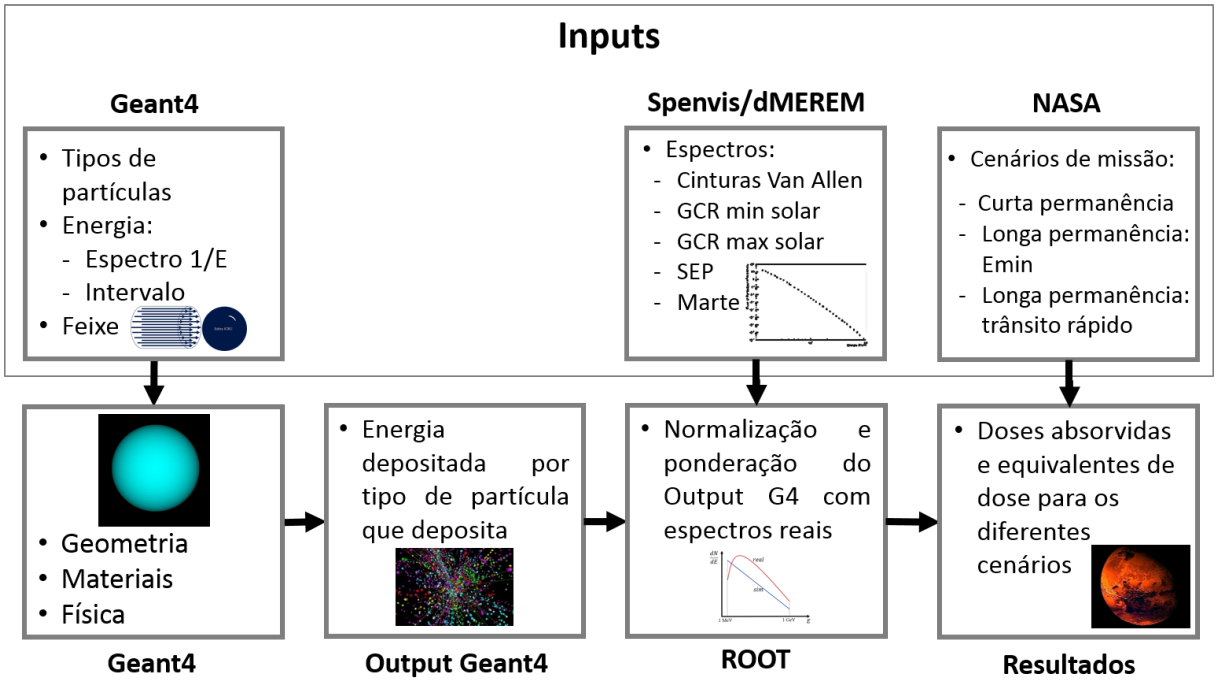


Figura 3.4: Diagrama descritivo da implementação da simulação e análise.

3.2.1 Normalização absoluta e fator de ponderação dos espectros

Tendo em conta os diferentes tipos de radiação encontrados no espaço, nomeadamente numa viagem Terra-Marte (como discutido na secção 1.2.1 do capítulo 1), seria necessário simular diferentes espectros para GCR (protões, partículas α, núcleos de Oxigénio e núcleos de Ferro), cinturas de Van Allen

(protões e eletrões) e eventos SEP. Para evitar os tempos de computação desnecessários, simula-se unicamente cada tipo de partícula com um espectro genérico com a dependência $1/E$:

$$\frac{dN}{dE} = k\frac{1}{E}. \tag{3.1}$$

Sabendo-se que os resultados obtidos a partir das simulações com um espectro $1/E$ não são idênticos aos que se obteriam caso tivesse sido utilizado o espectro real, é necessário proceder à normalização que relaciona o espectro real com o espectro simulado.

A normalização absoluta, a considerar, relaciona-se com o número de partículas geradas no intervalo de energias do espectro. Para um espectro da forma:

$$\frac{dN}{dE} = \frac{1}{G_E}\frac{1}{E}., \tag{3.2}$$

o número total de partículas geradas num intervalo de energia entre E_{min} e E_{max} é:

$$N_{gen} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} dN = \frac{1}{G_E}\int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{1}{E}dE = \frac{1}{G_E}[\log(E_{max}) - \log(E_{min})]. \tag{3.3}$$

De onde se conclui que o fator de normalização absoluta resulta em:

$$G_E = \frac{\log(E_{max}) - \log(E_{min})}{N_{gen}}. \tag{3.4}$$

Para cada simulação, o intervalo de energia utilizado é diferente, pelo que a normalização absoluta depende da simulação considerada.

A partir da normalização absoluta obtém-se o fator de ponderação de cada evento para cada energia, ou seja, o fator que é necessário multiplicar pelos eventos simulados para cada energia de modo a obter-se o número de eventos reais se a simulação tivesse utilizado o espectro real. Este fator, w_E, é determinado pela relação:

$$\begin{aligned} \varphi_{real} = \left(\frac{dN}{dE}\right)_{real} &= w_E\left(\frac{dN}{dE}\right)_{sim} = w_E\frac{1}{G_E}\frac{1}{E}, \\ w_E &= \varphi_{real}(E)G_E E. \end{aligned} \tag{3.5}$$

Uma representação esquemática e comparação entre um espectro real genérico e o espectro simulado $1/E$ encontram-se representadas na figura 3.5.

Sendo o espectro real dado em unidades de Número de partículas/cm^2/sr/s/MeV, é necessário um fator de normalização à área efetiva de incidência, onde o raio, r, corresponde ao raio do círculo de irradiação que coincide com o da esfera ICRU:

$$
\begin{aligned}
G_A &= \pi r^2 4\pi, \quad r = 15 \text{ cm} \\
G_A &\simeq 8882.66 \text{ cm}^2.
\end{aligned} \tag{3.6}
$$

O fator πr^2 corresponde à área efetiva de irradiação, enquanto que o fator 4π corresponde à normalização angular. O fator G_A é fixo para cada simulação, sendo que só depende do tipo de irradiação.

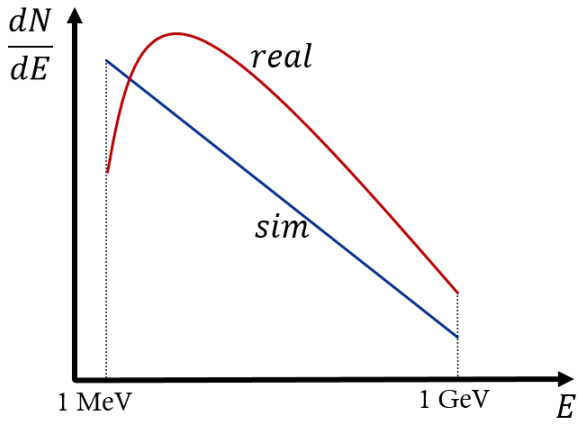


Figura 3.5: Representação e comparação dos espectros real e simulado.

3.2.2 *Input* Geant4

Os *inputs* fornecido à ferramenta Geant4 são os tipos de partículas a simular, os seus espectros e intervalo de energias, bem como o tipo de irradiação (isotrópica, em feixe, ...).

Simularam-se irradiações de protões, eletrões, partículas α, núcleos de Oxigénio e de Ferro. Os núcleos de Oxigénio e de Ferro representam os núcleos pesados existentes nos GCR. Os protões e as partículas α foram simulados com energias entre 1 MeV e 100 GeV, enquanto que os núcleos de Oxigénio e Ferro foram simulados com energias entre 1 MeV e 1 GeV. Os eletrões foram simulados com energias entre 100 keV e 50 MeV. Todas as partículas primárias foram simuladas com uma distribuição em energia com a forma $1/E$. Esta diferença nos intervalos de energias escolhidos para as simulações de diferentes partículas reside no facto de os eletrões, mesmo a baixas energias, sofrerem um elevado número de interações com o meio de que é constituído o detetor sensível, neste caso, a esfera ICRU. Na figura 3.6 pode observar-se o resultado da simulação do número de protões primários detetados no volume da esfera ICRU em função da energia primária, mostrando o comportamento $1/E$ da distribuição considerada.

Nas simulações, para se obter os resultados finais, foram utilizadas 10^6 partículas primárias, excepto as simulações para protões e partículas α entre 1 GeV e 100 GeV que foram simuladas com 40 000 e 50 000 partículas primárias, respetivamente.

Na tabela 3.1 comparam-se, entre o caso real e a simulação, as partículas constituintes, bem como os intervalos de energia, para as fontes de radiação acima descritas.

Para além destas partículas, também foram simulados fotões e neutrões como partículas primárias, pois estas constituem partículas secundárias resultantes da interação dos GCR com a atmosfera de Marte, que vão atingir a superfície e, consequentemente, os astronautas durante a sua estadia. Consideram-se na simulação neutrões entre 1 eV e 1 GeV, devido ao processo de termalização, que leva a um aumento significativo da secção eficaz de captura a baixas energias. As energias dos fotões simulados variam entre 1 keV e 90 MeV, sendo este o intervalo de energias dos fotões secundários provenientes da interação dos GCR com a atmosfera e solo de Marte, obtidos com o dMEREM.

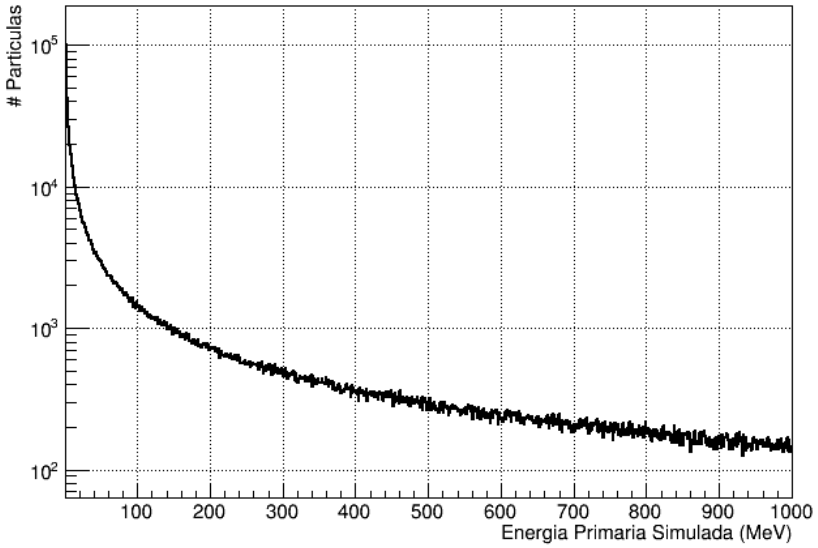


Figura 3.6: Espectro simulado dos protões primários detetados na esfera ICRU simulados com uma distribuição $1/E$ num feixe expandido e alinhado.

Fontes de radiação	Partículas Constituintes		Intervalo de Energia	
	Real	Simulação	Real	Simulação
GCR	90% Protões 9% Partículas α 1% Iões Pesados	Protões Partículas α Núcleos O e Fe	$\sim$ 1 — 10^{12} MeV	1 — 10^5 MeV
Cinturas de Van Allen	Protões	Protões	$\geqslant$ 10 MeV	1 – 10^3 MeV
	Eletrões	Eletrões	$\geqslant$ 1 MeV	0.1 – 50 MeV
Eventos SEP	Protões	Protões	$\leqslant 10^3$ MeV	1 – 10^3 MeV
	Eletrões			
Marte (adicional)	Fotões	Fotões	–	10^{-3} – 90 MeV
	Neutrões	Neutrões		10^{-6} – 10^3 MeV

Tabela 3.1: Comparação das partículas e intervalos de energia das fontes de radiação nos casos real e simulado.

3.2.3 Implementação Geant4

Definido previamente o tipo de irradiação desejada, é preciso escolher de que modo a interação da radiação com a matéria é feita. Para tal recorre-se a pacotes internos da ferramenta Geant4 designados por *PhysicsList*. Nestas *PhysicsList* estão implementados os tipos de interação que se pretende simular e os modelos físicos da interação com a matéria, para cada tipo de partículas. A *PhysicsList* utilizada foi a *QGSP_BERT_HP*, que contém modelos físicos para as interações eletromagnéticas (Cascata de

Bertini) e hadrónicas, complementados por um modelo que descreve as interações dos neutrões com energia inferior a 20 MeV.

Também a geometria e os materiais com a qual a radiação interage, nomeadamente os detetores sensíveis, ou seja, os volumes onde se recolhe informação das interações das partículas com os seus constituintes, são definidos no Geant4. Neste caso, como detetor sensível foi utilizado o fantoma esfera ICRU, definida na secção 2.1.3 do capítulo 2.

Procedeu-se a dois casos de simulação: um caso de irradiação direta da esfera ICRU utilizando a configuração de feixe expandido e alinhado, para cada tipo de radiação primária considerada e um caso de irradiação a interagir primeiramente com um disco de Alumínio com 10 cm de espessura (27.8 g cm^{-2}), que representa a blindagem da nave. Tipicamente, os estudos de blindagem são feitos recorrendo a Alumínio e tendo em conta espessuras equivalentes deste material, sabendo que a sua densidade é de 2.78 g cm^{-3}. Neste caso, a espessura de 10 cm Alumínio corresponde a uma espessura equivalente de 27.8 g cm^{-2}. A figura 3.7 representa os dois casos de simulação considerados.

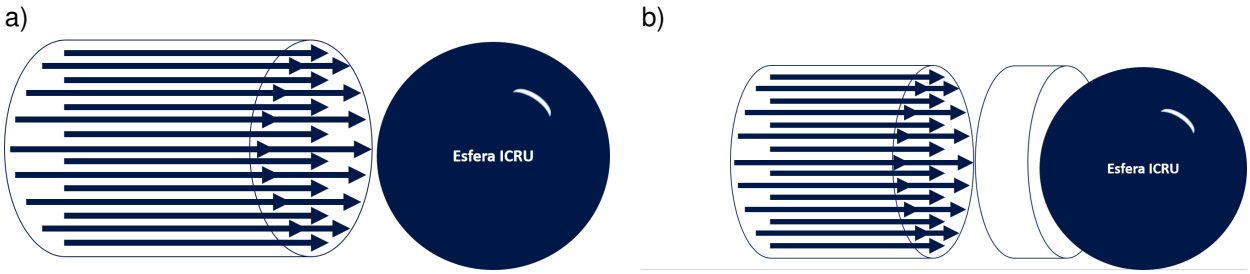


Figura 3.7: Casos de simulação considerados: a) sem e b) com blindagem de 10 cm de Alumínio.

Como exemplo de visualização, e para se tornar mais claro como se procedeu à simulação, as figuras 3.8 a 3.12 representam sequencialmente casos de simulação, a) sem e b) com blindagem, com a esfera ICRU envolvida em vácuo e com irradiações em feixe expandido e alinhado de 100 partículas: eletrões, protões, partículas α, núcleos de Oxigénio e núcleos de Ferro. Estas figuras foram obtidas com a ferramenta Geant4, descrita na secção 3.1. Os traços azuis representam partículas positivamente carregadas, neste caso, protões e núcleos de Ferro. Os traços vermelhos e verdes representam, respetivamente, partículas com carga negativa e neutras. O feixe expandido e alinhado tem origem num círculo de raio igual ao da esfera ICRU (15 cm) e a sua distância ao plano do centro da esfera é de 50 cm.

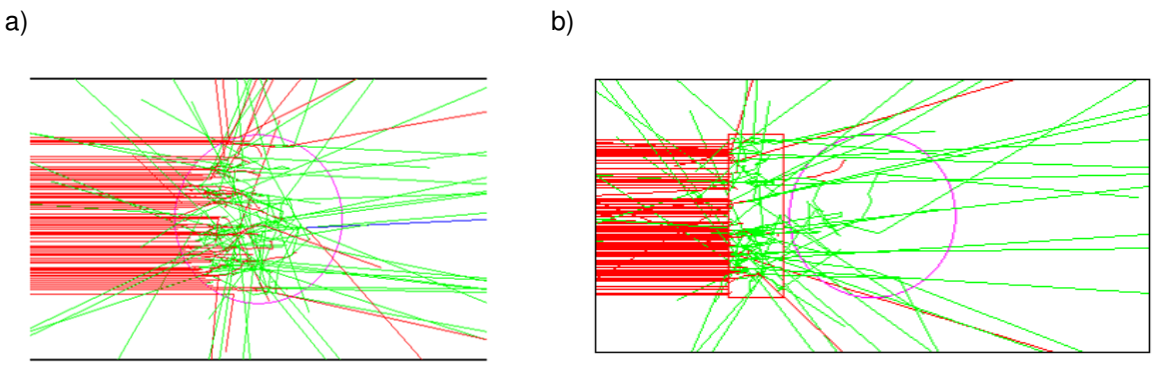


Figura 3.8: Simulação de 100 eletrões com energias entre 100 keV e 50 MeV a) sem e b) com blindagem.

a) b)

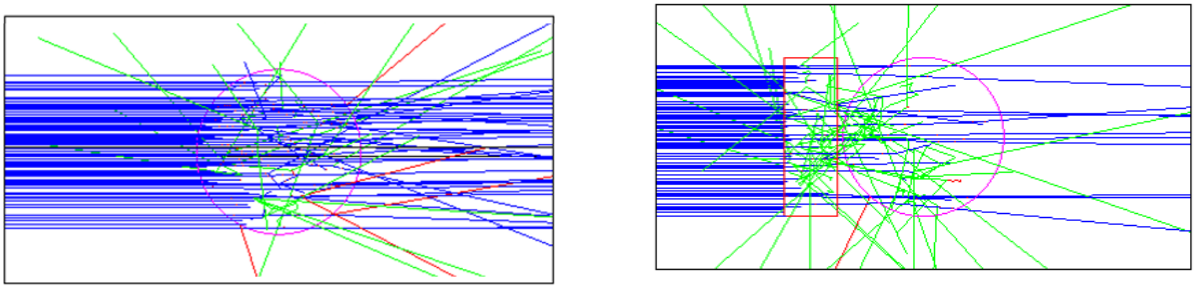


Figura 3.9: Simulação de 100 protões com energias entre 1 MeV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem.

a) b)

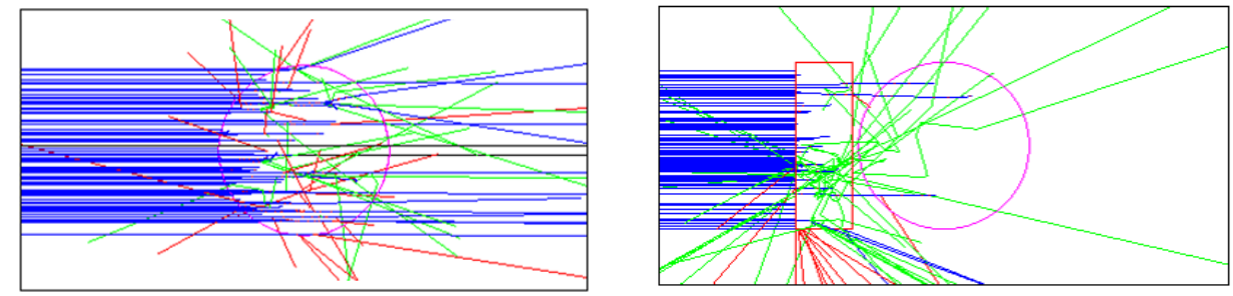


Figura 3.10: Simulação de 100 partículas α com energias entre 1 MeV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem.

a) b)

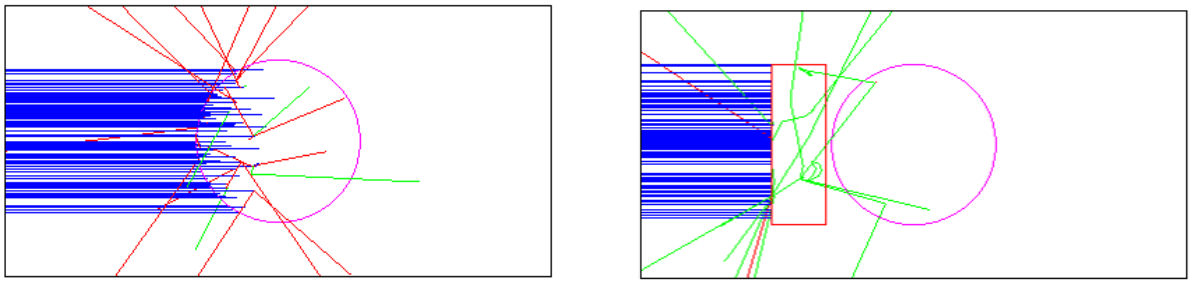


Figura 3.11: Simulação de 100 núcleos de Oxigénio com energias entre 1 MeV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem.

a) b)

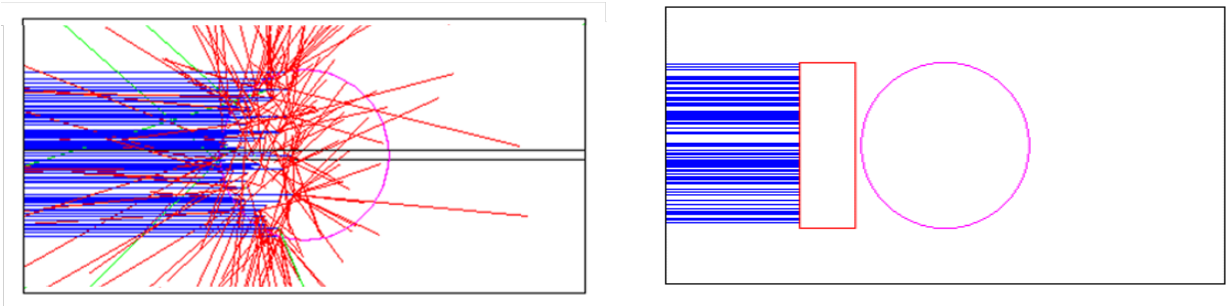


Figura 3.12: Simulação de 100 núcleos de Ferro com energias entre 1 MeV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem.

Comparando as figuras 3.9 a), 3.10 a), 3.11 a) e 3.12 a) concluí-se que há uma diminuição dos alcances até onde os núcleos atravessam o material da esfera ICRU, à medida que aumenta o número atómico, z do núcleo. É possível explicar este facto, observando a Fórmula de Bethe-Bloch, em que a perda de energia na matéria, dE/dx varia com z^2 do núcleo em questão, pelo que para os núcleos Hélio (partículas α), Oxigénio e Ferro temos uma perda de energia 4, 64 e 676 vezes superiores ao protão, respetivamente.

Nas figuras 3.9 b), 3.10 b), 3.11 b) e 3.12 b) é clara a diferença entre os casos anteriores, onde se observa que a penetração dos núcleos é amplamente reduzida devido à blindagem de 10 cm de Alumínio. A perda de energia, dE/dx, no Alumínio, dada também pela Fórmula de Bethe-Bloch, mas onde o Z do material é quase o dobro do anterior (Z_{Al}=13 e Z_{ICRU}=7), o que faz com que a perda de energia seja quase duas vezes maior, pelo que para um mesmo percurso atravessado é perdida o dobro da energia da partícula.

Os núcleos de Ferro, no máximo, penetram $\sim$0.2 mm (para energias da ordem de 1 GeV) a blindagem de Alumínio, o que significa que não atingem a esfera e qualquer deposição de energia considerada na esfera será feita por partículas secundárias, provenientes da interação dos núcleos de Ferro com o Alumínio. Embora, para o caso dos núcleos de Ferro a penetração na esfera ICRU, por irradiação direta, fosse $\sim$0.5 mm (ver figura 3.12).

Para os núcleos de Oxigénio no caso com blindagem, também é verdade que a energia depositada na esfera vem de secundários, uma vez que mesmo as partículas de mais alta energia não atravessam os 10 cm de blindagem. As particulas α e, mais consideravelmente, ainda, os protões, não tem este comportamento, conseguindo, para energias suficientemente altas atravessar a barreira de Alumínio e depositar diretamente (também com contribuição de secundários gerados) parte da sua energia.

Para os fotões e neutrões que foi necessário simular devido à sua importância para o ambiente de radiação em Marte, estão apresentados nas figuras 3.13 e 3.14, exemplos de visualização a) sem e b) com blindagem.

Os fotões menos energéticos são absorvidos pela blindagem de Alumínio, como se observa na figura 3.13 b), havendo uma diminuição da energia total depositada na esfera ICRU por estas partículas e os secundários que lhe estão associados.

Para os neutrões não há uma notória diferença entre os casos sem e com blindagem, como mostra a figura 3.14 a) e b). Sem blindagem os neutrões muito energéticos, sofrem pouca interação e colisões com os átomos dos elementos presentes na esfera ICRU pelo que a atravessam não depositando praticamente energia no meio. No caso com blindagem, os neutrões sofrem uma perda de energia por interação com o Alumínio e ao terem menos velocidade vão sofrer mais interações com a esfera, depositando aí mais energia e criado partículas secundárias.

a) b)

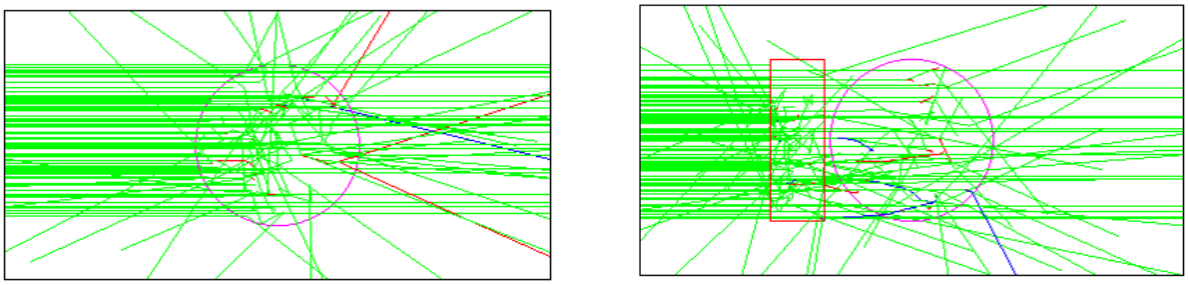


Figura 3.13: Simulação de 100 fotões com energias entre 1 keV e 90 MeV a) sem e b) com blindagem.

a) b)

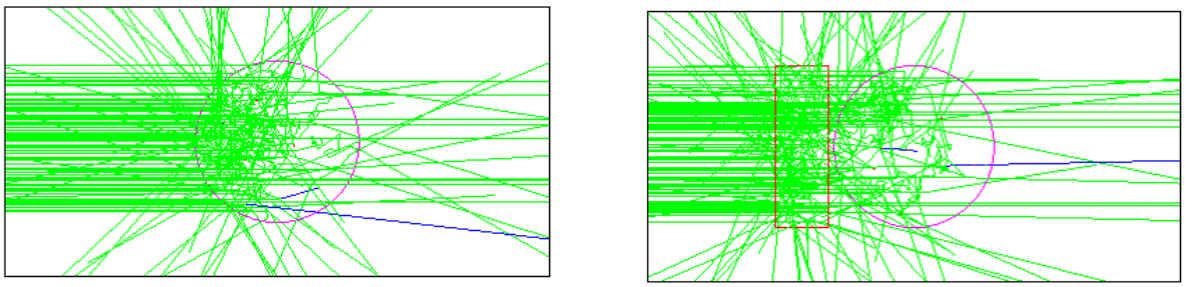


Figura 3.14: Simulação de 100 neutrões com energias entre 1 eV e 1 GeV a) sem e b) com blindagem.

3.2.4 *Output* Geant4

Como a diversidade de *outputs* que se pode obter através da ferramenta Geant4 é muito grande, torna-se essencial selecionar os resultados que se pretende. Neste caso, a escolha de *output* foram as energias depositadas por todas as partículas, por fotões, por eletrões, por protões, por neutrões e por partículas α.

3.2.5 *Input* SPENVIS/dMEREM

Para proceder ao método de normalização descrito em 3.2.1 é necessário fornecer os espectros de entrada adequados às fontes de radiação reais que se encontram presentes numa missão espacial a Marte: a radiação cósmica galáctica, a radiação aprisionada nas cinturas de Van Allen e os eventuais acontecimentos de partículas solares energéticas.

Nas figuras 3.15, 3.16 e 3.17 observam-se, respetivamente, o espectro de GCR para o mínimo e máximo de atividade solar para as diferentes partículas constituintes; o espectro de partículas aprisionadas (protões e eletrões) nas cinturas de Van Allen e o espectro de um evento SEP constituído por protões.

Para adquirir através do SPENVIS os espectros de protões e eletrões aprisionados nas cinturas de Van Allen é necessário fornecer à ferramenta uma órbita terrestre adequada; os valores considera-

dos são uma média ao longo dessa mesma órbita. Tendo em vista uma eventual comparação com a referência [29] [1], foram escolhidas as seguintes coordenadas de órbita (ver figura 3.1):

- Apogeu: 574 344 km;
- Perigeu: 6 600 km;
- Inclinação: 31.383° ;
- Longitude do nodo ascendente: 358.380° ;
- Deslocamento do nodo ascendente: 0° ;
- Argumento do perigeu: 4.412° .

Comparando as figuras 3.15, 3.16 e 3.17 concluí-se que o ambiente de radiação que contribui com fluxos mais altos são as cinturas de Van Allen, onde considerando os fluxos máximos para protões e eletrões estes variam entre 10^7 e 10^8 # Partículas/cm^2/sr/s/MeV, enquanto que para protões provenientes de eventos SEP o fluxo máximo é cerca de 10^2 e para GCR (também protões) de cerca de 2×10^{-4}. É de notar que o fluxo máximo para as cinturas de Van Allen corresponde a uma energia de 0.1 MeV e de seguida o espectro decai até fluxos da ordem de 10^{-3} para uma energia de 300 MeV, e considerando que a simulação tem em conta energias a partir de 1 MeV, concluí-se que o fluxo máximo utilizado é 10^6. No caso do evento SEP o espectro também é sempre decrescente até 10^{-4} para 700 MeV. O espectro de GCR é crescente até ao seu máximo, que é atingido a cerca de 320 MeV e depois decresce até ao mínimo de 5×10^{-9} para energias de 10 GeV.

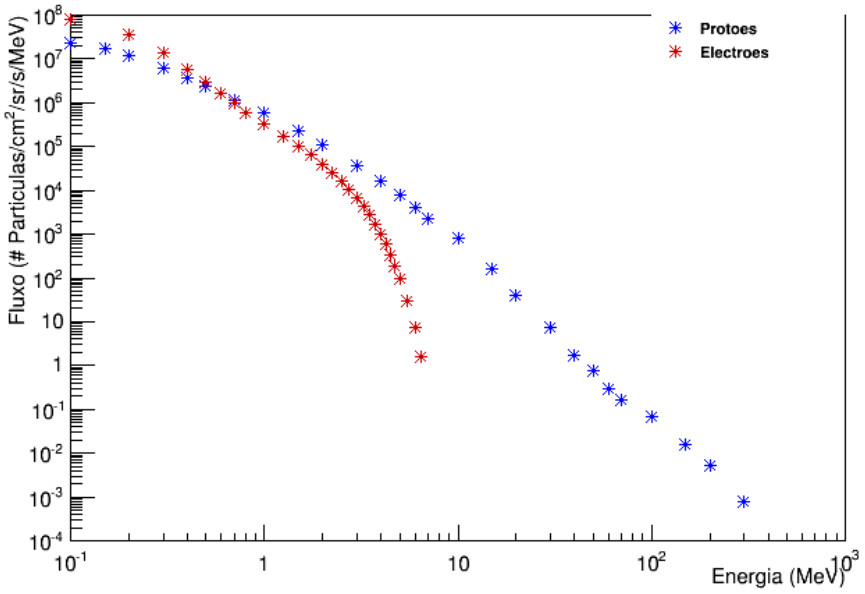


Figura 3.15: Espectro de protões e eletrões aprisionados nas cinturas de Van Allen.

[1] Esta comparação não foi feita nos resultados finais, pois [29] não considerava os espectros das cinturas de Van Allen individualmente, o espectro considerado, obtido com o CREME2009, inclui as cinturas de Van Allen e os GCR.

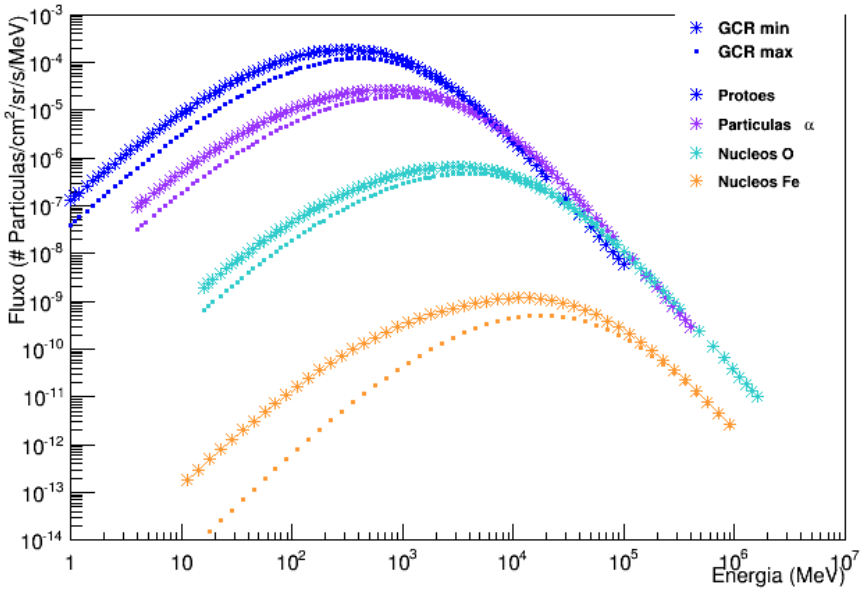


Figura 3.16: Espectro de GCR, nos mínimo e máximo de atividade solar, por partícula constituinte.

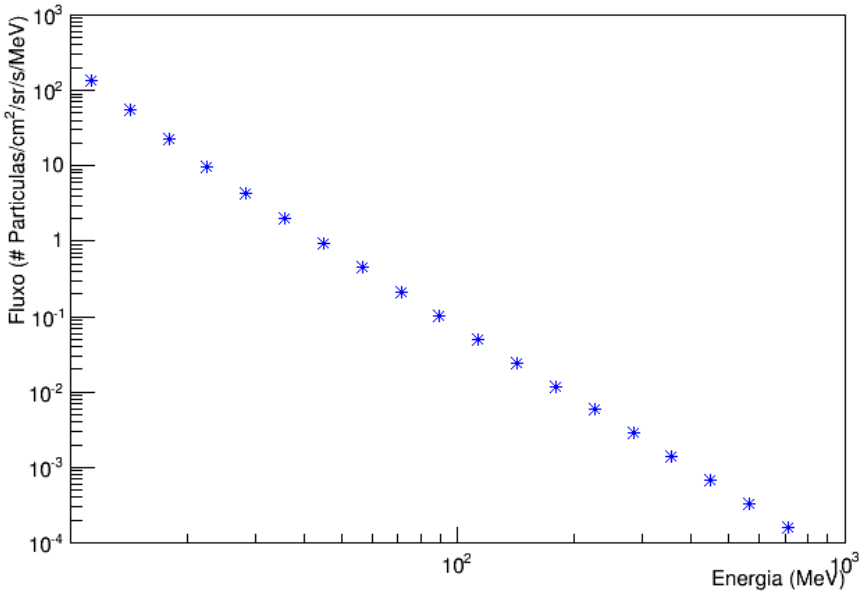


Figura 3.17: Espectro de protões num evento SEP.

Na figura 3.18 comparam-se os espectros de GCR obtidos em diferentes posições no espaço: a 1 UA do Sol e numa órbita perto de Marte, para protões e partículas α. Ao observar a figura 3.18 concluí-se que no máximo os espectros variam entre si de mais de uma ordem de grandeza, o que acontece para o caso de GCR de partículas α no máximo de atividade solar para energias até cerca de 1 GeV. Apesar desta diferença entre os dois casos considerados, é de notar que a blindagem da nave absorve estas partículas com energias inferiores a 167 MeV para protões e 696 MeV para partículas α, pelo que na região de energias em que as diferenças entre os dois casos são maiores, não é significativo o seu impacto na energia depositada no fantoma. Deve ser ainda salientado que o espetro de GCR

é modulados ao longo da trajetória, conforme a nave está mais perto ou longe do Sol, sendo que nos cálculos deste trabalho esta variação foi aproximada por um espetro médio definido como o espetro de GCR a 1 UA do Sol.

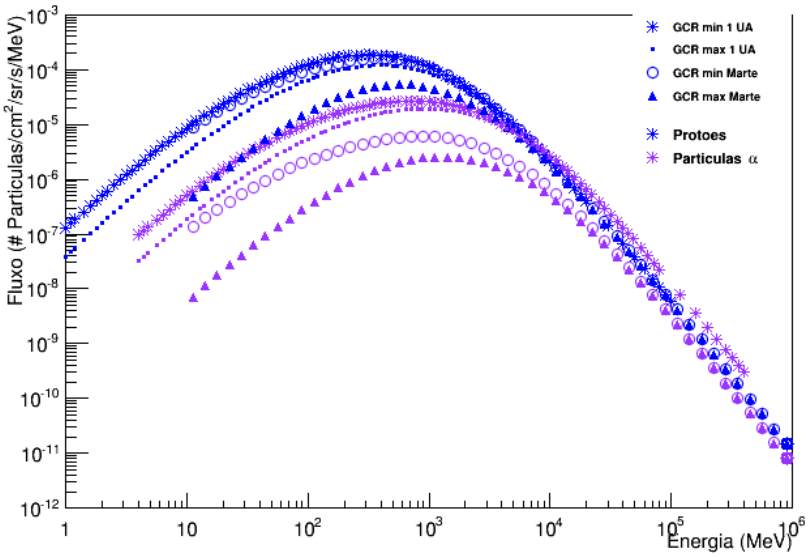


Figura 3.18: Comparação do espectro de GCR, para protões e partículas α, nos mínimo e máximo solar, obtidos a 1 UA do Sol e numa órbita de Marte.

O evento SEP considerado foi o evento que ocorreu em Dezembro de 2006 com duração de cerca de 14 dias tendo um máximo de aproximadamente 2 dias. Os espectros, acima de diferentes valores de energia, desse evento medido pelo satélite GOES-11 está apresentados na figura 3.19.

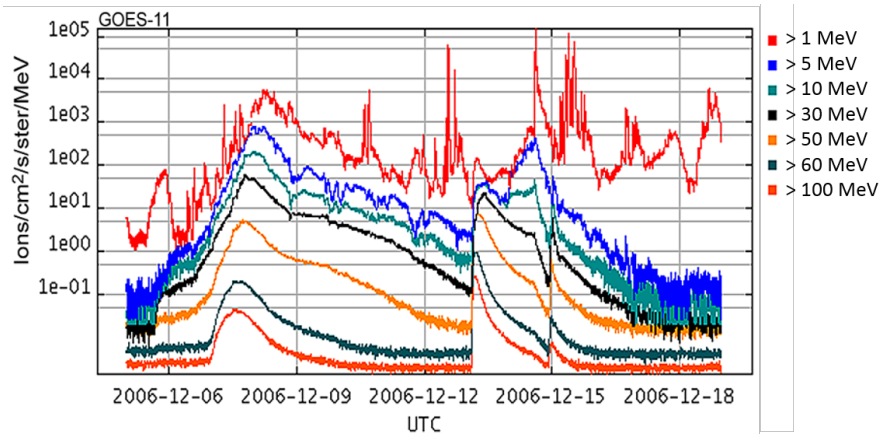


Figura 3.19: Espectros do evento SEP de 2006, medido pelo satélite GOES-11, acima de diferentes energias.

Os espectros primários utilizados como entrada na análise com o ROOT [30], para calcular as quantidades de dose absorvida e dose equivalente em Marte, foram obtidos a partir dos espectros produzidos pelo dMEREM. Estes espectros têm em conta as interações de partículas com a atmosfera e no solo marcianos e estão representados na figura 3.20.

a) b)

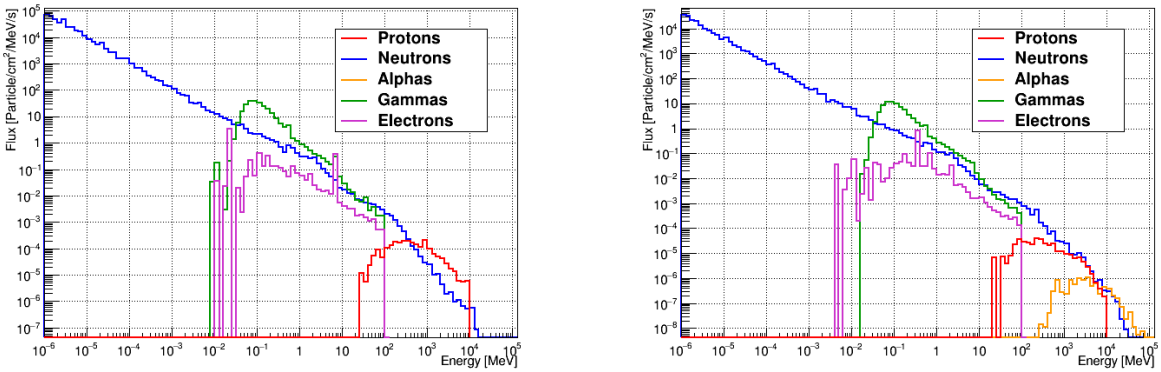


Figura 3.20: Espectros à superfície de Marte, obtidos com a ferramenta dMEREM, utilizando o espectro de GCR de a) protões e b) partículas α, como radiação primária.

A radiação de albedo de neutrões é relevante à superfície do planeta, porque existe uma elevada produção de secundários quando as partículas primárias interagem com o solo. O espectro desta radiação após a interação de uma radiação primária de protões é também obtido recorrendo ao dMEREM, tendo agora em conta esta interação das partículas com o solo de Marte [7].

É de notar que, como referido na secção 1.2.1 do capítulo 1, o espectro de GCR é modulado pelos ciclos solares e é necessário ter em atenção ambos os casos. Para isso, e tendo em consideração as datas sugeridas para as três missões da NASA [15], selecionou-se espectros de GCR representativos das duas fases mais relevantes: mínimo e máximo solares. Sendo que, coincidentemente, as datas para as partidas das missões (saída da Terra) estavam entre 15/1/2014 e 1/2/2014 (variando por cenário de missão) e encontram todas elas perto de um máximo solar, foi a escolhida a data de 30 de Janeiro de 2014 para representar o espectro de máximo solar. O espectro de GCR, representativo da situação de mínimo de atividade solar, escolhido, foi o de 30 de Janeiro de 2009, ano do último mínimo solar ocorrido. O espectro do evento SEP considerado é um espectro integrado num período de 14 dias relativo ao evento SEP ocorrido em 2006. Os espectros utilizados como entrada para GCR e para eventos SEP obtiveram-se através da base de dados do SPENVIS.

3.2.6 Análise de Dados no ROOT

O *output* do Geant4 é pós-processado através da ferramenta ROOT [30] e são feitas a normalização absoluta e a ponderação aos espectros reais fornecidos pelo SPENVIS e pela ferramenta dMEREM, como explicado na secção 3.2.5 são também gerados histogramas de *output* e os valores de taxas de dose absorvida associados a cada geração de partícula primária e aos diferentes tipos de partículas (primárias e secundárias) que depositam energia no volume da esfera ICRU.

Os valores das taxas de dose absorvida e de dose equivalente foram determinadas a partir da energia depositada na esfera ICRU, utilizando as equações 2.4 e 2.5 das secções 2.1.1 e 2.1.2 do capítulo 2. Este cálculo foi implementado diretamente no ROOT, fornecendo os valores em unidades de de Gy/s e Sv/s, respetivamente. A estes valores estão associados valores de incerteza estatística ε_D determinada utilizando a equação 3.7.

$$\varepsilon_D = \frac{D\sqrt{N_{dep}}}{N_{dep}} \tag{3.7}$$

onde D é o valor de dose e N_{dep} o número de partículas de determinada espécie que depositaram energia no volume da esfera ICRU.

3.2.7 *Input* NASA

Para calcular os resultados de doses absorvidas e doses equivalentes para cada uma das fases de cada cenário é preciso utilizar os intervalos de tempo de duração das missões propostos pela NASA em cada uma dessas mesmas fases e multiplicá-los pelas taxas de doses obtidas. Estes intervalos de tempo podem ser consultados em detalhe na tabela 1.1.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Após a descrição dos métodos de simulação, cálculo e análise de dados, no capítulo 3, são apresentados e discutidos, no presente capítulo, os resultados obtidos.

4.1 Resultados sem Blindagem

4.1.1 Energia Depositada

Com base na taxa de partículas em função da energia depositada na esfera ICRU são calculadas taxas de dose absorvida e dose equivalente (ver equação 2.4 no capítulo 2) para as diferentes fontes de radiação consideradas nas três fases dos cenários de missão a Marte.

Saída da Terra

A figura 4.1 a) representa a distribuição de energia depositada por protões das cinturas de Van Allen e a figura 4.1 b) a energia depositada por eletrões. No caso dos protões as partículas secundárias criadas são fotões, eletrões, outros protões e partículas α; no caso dos eletrões primários não há criação de partículas secundárias hadrónicas, tal como seria de esperar. É de notar na figura 4.1 a) uma subida de quase quatro ordens de grandeza no número normalizado(ver equação 3.5 da secção 3.2.1 do capítulo 2) de protões e total de partículas para uma energia de 1 MeV, esta subida abrupta está relacionada com a simulação de partículas primária ter como energia mínima este valor, pelo que se assume que para energias mais altas estejam contabilizadas partículas primárias a depositar diretamente energia bem como partículas secundárias. No caso da figura 4.1 b) para a curva correspondente a eletrões observa-se o mesmo comportamento, mas com um aumento no número de partículas normalizado de cerca de uma ordem de grandeza, também para o valor mínimo de energia considerada nas simulações, 100 keV.

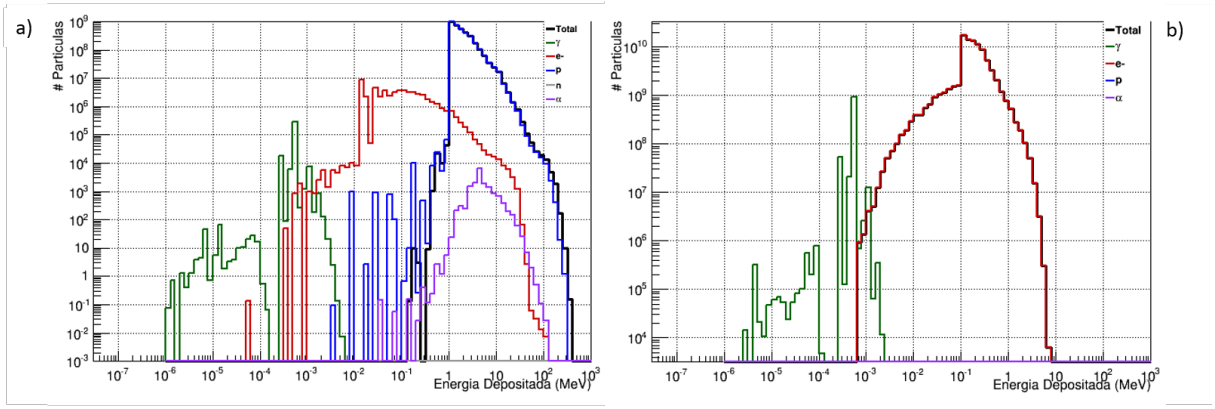


Figura 4.1: Distribuição da energia depositada, em MeV, para o espectro de partículas aprisionadas nas cinturas de Van Allen por cada tipo de partícula secundária que deposita, para partículas primárias: a) protões e b) eletrões.

Fase de Cruzeiro

As figuras 4.2 e 4.3 representam as distribuições de energia depositada para cada uma das partículas primárias dos GCR: a) protões, b) partículas α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro, em condições de mínimo e máximo de atividade solar, respetivamente.

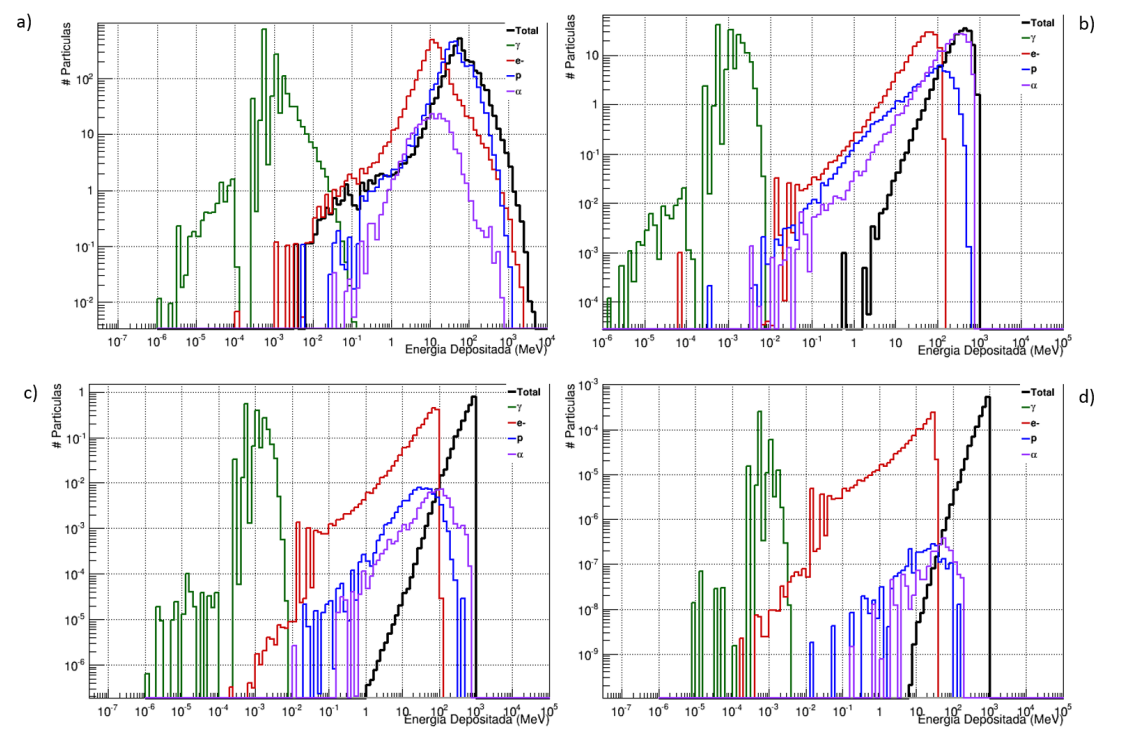


Figura 4.2: Distribuição da energia depositada, em MeV, para o espectro de GCR no mínimo solar por cada tipo de partícula secundária que deposita, para partículas primárias: a) protões, b) α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro.

Comparando as figuras 4.2 e 4.3 concluí-se que a intensidade do máximo da energia depositada varia em todos os casos, aumentando no mínimo de atividade solar, embora varie de forma mais significativa, cerca de uma ordem de grandeza, para núcleos de Ferro. Esta diferença está relacionada

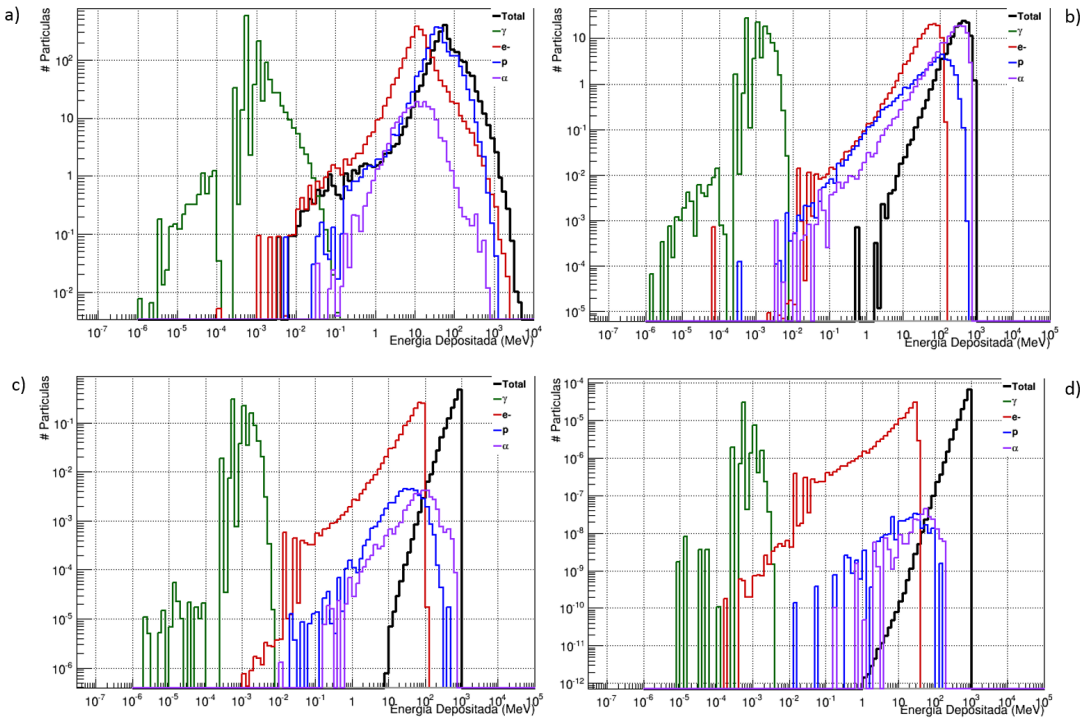


Figura 4.3: Distribuição da energia depositada, em MeV, para o espectro de GCR no máximo solar por cada tipo de partícula secundária que deposita, para partículas primárias: a) protões, b) α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro.

com a modulação do espectro de GCR para núcleos de Ferro (ver figura 3.16), que contrariamente às restantes partículas primárias referidas, em que a modulação é baixa, difere de cerca de uma ordem de grandeza, entre as duas condições solares, para energias inferiores a cerca de 1 GeV.

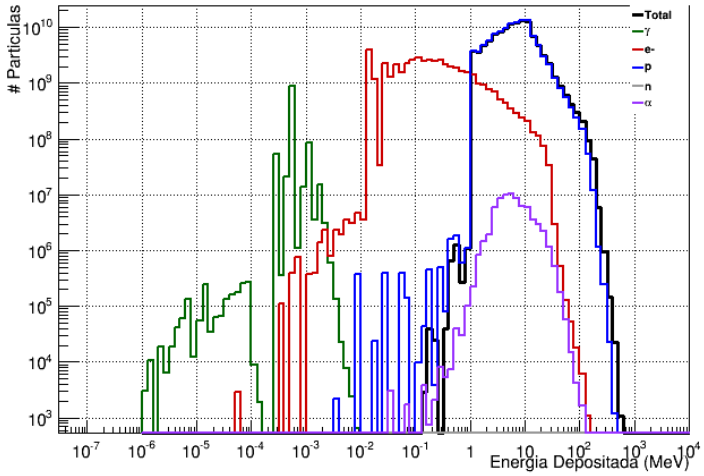


Figura 4.4: Distribuição da energia depositada, em MeV, para protões do evento SEP, por cada tipo de partícula secundária que deposita.

A figura 4.4 representa a distribuição de energia depositada para o evento SEP descrito no capítulo 3.

Superfície de Marte

A figura 4.5 representa a distribuição de energia depositada no caso do ambiente de radiação à superfície de Marte, originados por protões de GCR. Os protões são injetados no modelo que descreve a atmosfera e o solo de Marte (dMEREM) e são extraídos os espectros, à superfície, das partículas secundárias: a) fotões, b) eletrões, c) protões e d) neutrões. Por sua vez, essas partículas secundárias são usadas como primárias na simulação com a esfera ICRU. É claro que para o caso da superfície de Marte as formas das distribuições variam quando comparadas com as figuras atrás discutidas. O espectro de neutrões (figura 4.5 d)) altera a distribuição de energia depositada pelas partículas carregadas, nomeadamente protões, passando a contribuir para energias mais baixas (a partir de cerca de 1 eV). Este alargamento nas distribuições está relacionada com a secção eficaz relativamente elevada dos neutrões com os elementos que constituem a esfera ICRU (Z baixo), através de reações (n,p) e (n,γ), a baixas energias.

As partículas secundárias, observadas nas figuras de topo, são originadas por fotões e eletrões (figuras 4.5 a) e b)) como resultado da cascata eletromagnética (eletrões e fotões), existindo, também, algumas (poucas) interações que dão origem a protões e partículas α que vão depositar consideravelmente menos energia que os eletrões. Contrariamente ao caso descrito acima, nas duas figuras de baixo, onde a esfera é irradiada por protões e neutrões (figuras 4.5 c) e d)), acabam por ser os protões (primários e secundários) que dominam a quantidade de energia depositada. Os histogramas representativos dos casos de espectros em Marte originados por GCR de partículas α não foram apresentados devido ao seu comportamento ser semelhante e a sua contribuição para a energia depositada ser cerca de 20% da contribuição dos protões.

Comentários Adicionais

Em todas as figuras de 4.1 a 4.5, os fotões têm máximos de deposição a energias mais baixas (aproximadamente entre 1 eV e 100 keV) dos que as partículas carregadas (que variam entre 100 keV e 1 GeV, aproximadamente).

Verifica-se que nas figuras 4.1 a 4.5, o histograma representado por "Total" não corresponde à soma das restantes componentes (fotões ("γ"), eletrões ("e-"), protões ("p") e partículas "α"). A diferença resulta do facto de algumas partículas secundárias que depositam energia na esfera ICRU não terem sido explicitamente consideradas devido à sua contribuição não ser significativa quando comparada com a das partículas consideradas. Feita uma análise utilizando uma irradiação com feixe expandido e alinhado de 100 protões, concluiu-se que das partículas pesadas, mais significativas, são os núcleos de ^{16}O, de ^{12}C e piões neutros (π^0).

4.1.2 Perda de Energia

Nas figuras 4.6 e 4.7 estão representadas as distribuições de energia depositada total E_{dep}^{tot} em função da energia primária E_{prim}. O gradiente de cor indica a taxa de número de partículas em cada ponto E_{prim}–E_{dep}^{tot}. O número de partículas representado não corresponde ao número de partículas simuladas, mas sim ao número de partículas normalizado, com o fator w_E, ao espectro de GCR para protões

e núcleos de Ferro primários, no mínimo solar, respetivamente.

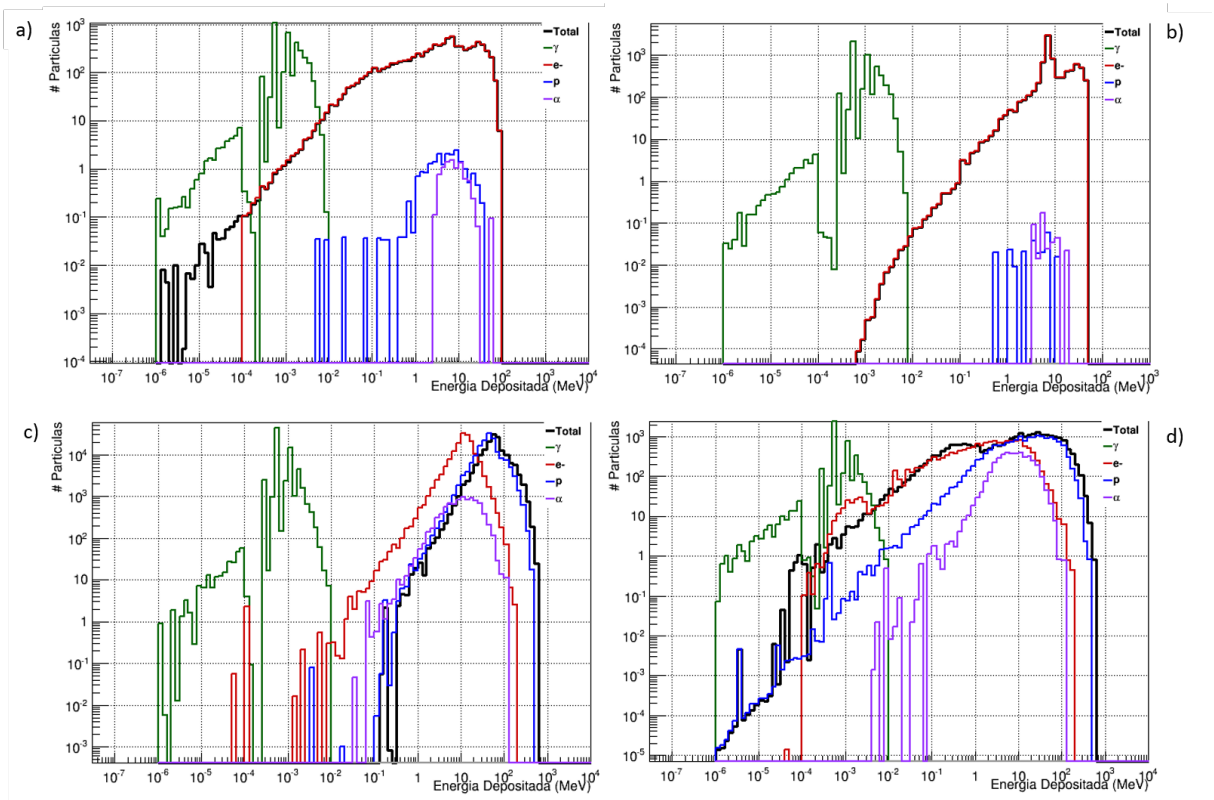


Figura 4.5: Distribuição da energia depositada, em MeV, para os espectros em Marte, originados a partir de um espectro de GCR de protões, por cada tipo de partícula secundária que deposita, para partículas primárias: a) fotões, b) eletrões, c) protões e d) neutrões.

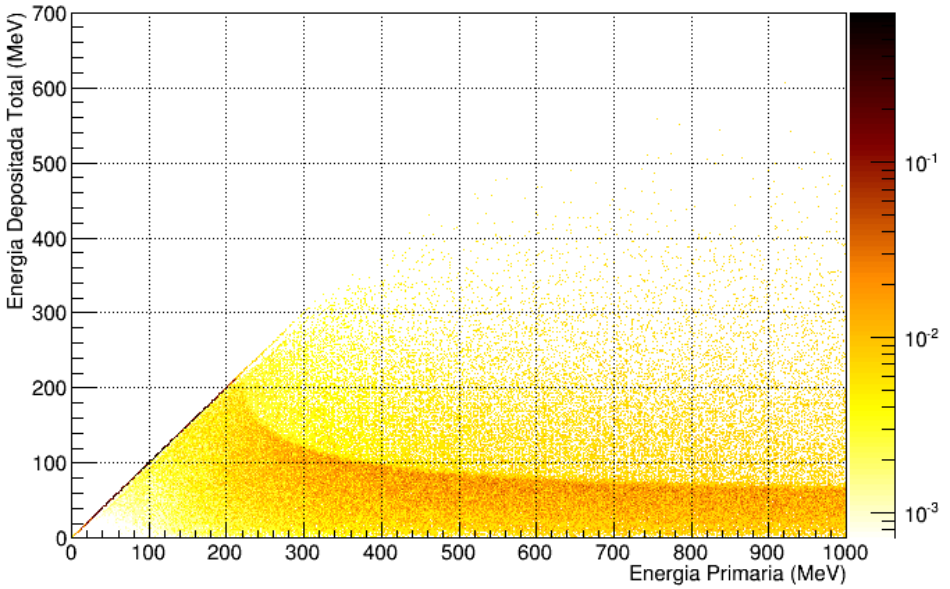


Figura 4.6: Distribuição da energia depositada total, em MeV, em função da energia primária, em MeV, onde o gradiente de cor indica o número de partículas normalizado, com w_E ao espectro de GCR de protões no mínimo solar.

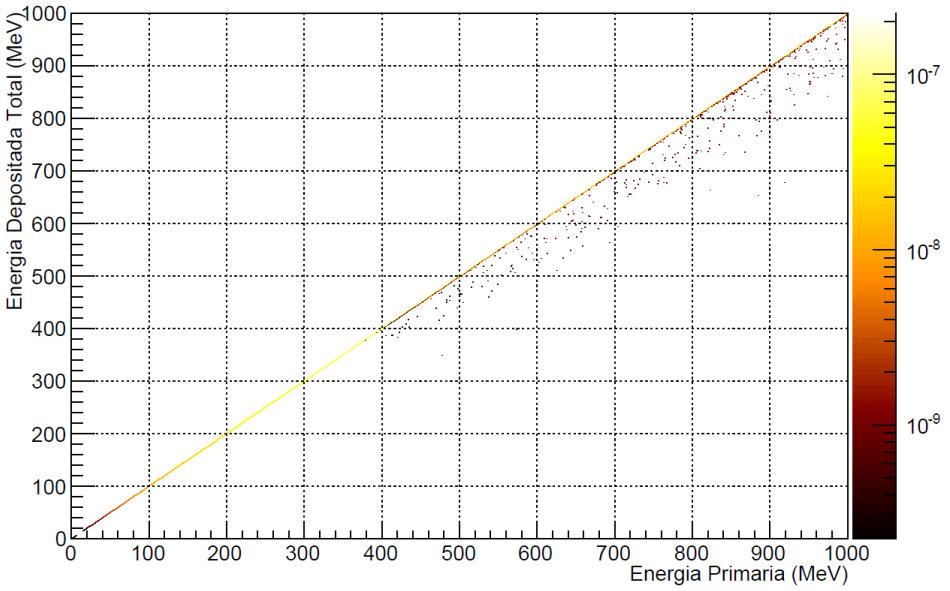


Figura 4.7: Distribuição da energia depositada total, em MeV, em função da energia primária, em MeV, onde o gradiente de cor indica o número de partículas normalizado, com w_E ao espectro de GCR de núcleos de Ferro no mínimo solar.

4.1.3 Taxas de dose absorvida e dose equivalente

As taxas de dose absorvida, em Gy/s, para cada fonte de radiação por tipo de partícula primária encontram-se compiladas nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, para as fases de saída da Terra, cruzeiro e estadia na superfície de Marte, respetivamente. Em cada coluna estão representadas as taxas para as diferentes partículas primárias, sendo que na primeira linha está a contribuição total e nas restantes as contribuições para cada tipo de partícula que deposita energia na esfera ICRU.

	SAÍDA DA TERRA		
	Cinturas de Van Allen		
	Protões	Eletrões	**Total**
Total	1.71E-4	4.52E-4	**6.23E-4**
γ	3.71E-12	1.26E-8	1.28E-8
Eletrões	2.45E-7	4.52E-4	4.52E-4
Protões	1.70E-4	—	1.70E-4
Partículas α	1.79E-9	—	1.79E-9

Tabela 4.1: Taxas de dose absorvida, em Gy/s, para as fontes presentes na fase de saída da Terra da missão, por tipo de partículas constituintes e por tipo de partículas que deposita.

A figura 4.8 representa as doses absorvidas totais e as componentes em partículas (primárias e secundárias) que contribuem para a deposição de energia no volume da esfera ICRU, para protões e eletrões primários aprisionados nas cinturas de Van Allen.

A figura 4.9 representa as doses absorvidas totais e as componentes em partículas (primárias e

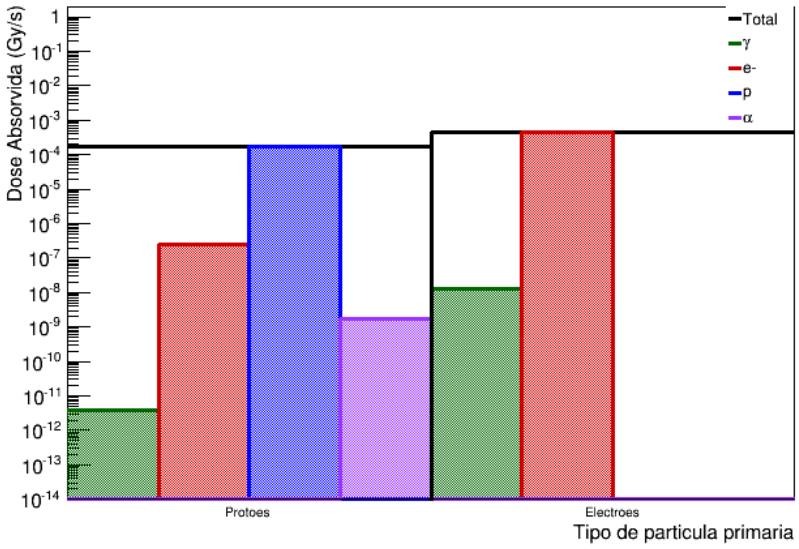


Figura 4.8: Dose absorvida para eletrões e protões aprisionados nas cinturas de Van Allen.

secundárias) que contribuem para a deposição de energia no volume da esfera ICRU, para as diferentes partículas primárias de GCR em condições de mínimo e máximo solar, respetivamente.

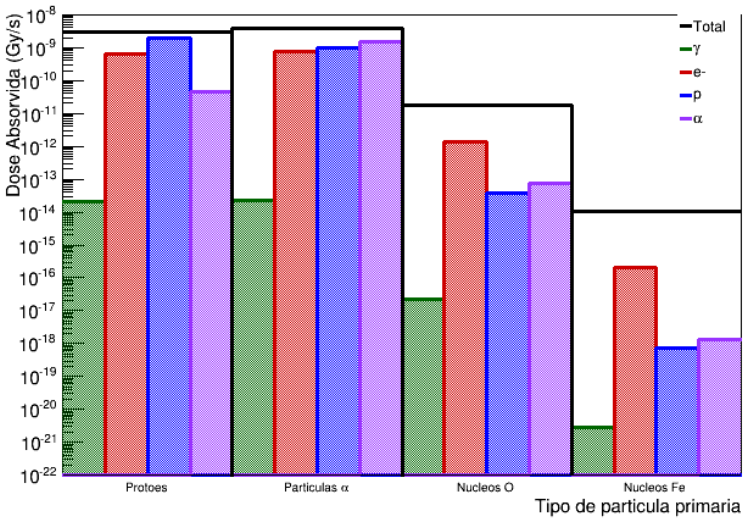
Para o caso da exposição aos GCR no espaço interplanetário (fase de cruzeiro) na condição de mínimo solar pode comparar-se os valores de dose absorvida total da tabela 4.2 com [7] (figura 4 - 0 g cm^{-2}). Convertendo os resultados de [7] de mGy/d em Gy/s, para haver uma comparação direta, obtém-se um valor de 3.99E-9 Gy/s o que corresponde a uma diferença relativa de 25% entre este valor e o valor obtido de 5.30E-9 Gy/s, neste trabalho. Esta comparação foi feita considerando a dose absorvida total correspondente aos GCR. Também as doses depositadas por protões e partículas α podem ser comparadas. De [7] obtêm-se 1.91E-9 e 8.68E-10, respetivamente, que podem ser comparados com os valores 2.25E-9 e 3.04E-9, obtidos neste trabalho. As diferenças relativas entre os valores obtidos e os valores de [7] são, respetivamente para protões e partículas é α, 15% e 71%, respetivamente. Os núcleos pesados de Oxigénio e Ferro não são comparáveis pois não foram simulados com energias superiores a 1 GeV, apesar disso a sua contribuição é ordens inferior, pelo que a sua contribuição não e significativa. Também os outros núcleos pesados até Z=26 são tidos em conta em [7], contrariamente ao caso deste trabalho. Globalmente, os valores de dose absorvida determinados neste trabalho são superiores a [7]. Uma das principais razões para esta diferença está relacionada com o fantoma utilizado em [7], que tem um raio de 25 cm em vez dos 15 cm da esfera ICRU. Isto resulta numa esfera com massa maior e, portanto, menor dose absorvida para a mesma energia depositada. Assim, a comparação com [7] é meramente indicativa de que os valores calculados neste trabalho encontram-se na mesma ordem de grandeza.

A figura 4.10 representa as doses absorvidas totais e as componentes em partículas (primárias e secundárias) que contribuem para a deposição de energia no volume da esfera ICRU, para as diferentes partículas que atingem a superfície de Marte, provenientes, respetivamente, de GCR de protões e de GCR de partículas α.

	FASE DE CRUZEIRO										
	GCR min					GCR max					SEP
	Protões	Partículas α	Núcleos O	Núcleos Fe	**Total**	Protões	Partículas α	Núcleos O	Núcleos Fe	**Total**	**Protões**
Total	2.25E-9	3.04E-9	9.88E-12	1.19E-15	**5.30E-9**	2.84E-9	3.66E-9	1.72E-11	1.05E-14	**6.52-9**	**2.65E-6**
γ	1.76E-14	1.93E-14	1.31E-17	3.39E-22	3.69E-14	2.103.63E-14	2.21E-14	2.24E-17	2.79E-21	4.31E-14	8.26E-13
Eletrões	5.41E-10	6.31E-10	7.61E-13	2.48E-17	1.17E-9	6.57E-10	7.38E-10	1.31E-12	2.04E-16	1.40E-9	4.88E-8
Protões	1.45E-9	8.79E-10	2.18E-14	8.44E-20	2.33E-9	1.89E-9	1.01E-9	3.73E-14	7.08E-19	2.90E-9	2.59E-6
Partículas α	3.74E-11	1.20E-9	4.43E-14	1.50E-19	1.23E-9	4.39E-11	1.54E-9	7.58E-14	1.29E-18	1.58E-9	5.69E-10

Tabela 4.2: Taxas de dose absorvida, em Gy/s, para as fontes presentes na fase de cruzeiro da missão, por tipo de partículas constituintes e por tipo de partículas que deposita.

a)



b)

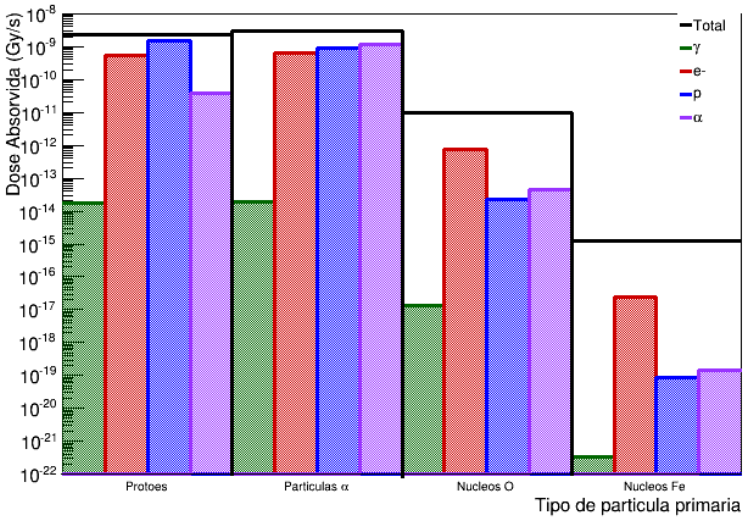
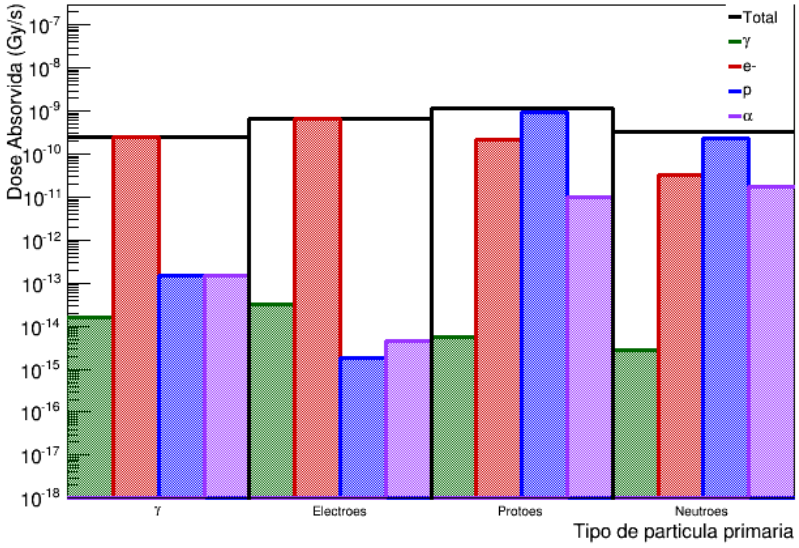


Figura 4.9: Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro de GCR nos a) mínimo e b) máximo solar.

	SUPERFÍCIE DE MARTE												
	GCR Protões						GCR Partículas α						TOTAL
	γ	Eletrões	Protões	Neutrões	Partículas α	**Total**	γ	Eletrões	Protões	Neutrões	Partículas α	**Total**	
Total	2.48E-10	6.44E-10	1.17E-9	3.20E-10	—	**2.39E-9**	6.39E-11	6.51E-11	1.66E-10	1.39E-10	1.15E-12	**4.36E-10**	**2.82E-9**
γ	1.59E-14	3.14E-14	5.46E-15	2.75E-15	—	5.55E-14	4.18E-15	3.12E-15	7.13E-16	1.13E-15	3.50E-18	9.15E-15	6.47E-14
Eletrões	2.48E-10	6.44E-10	2.13E-10	3.20E-11	—	1.14E-9	6.38E-11	6.51E-11	2.88E-11	1.50E-11	1.64E-13	1.73E-10	1.31E-9
Protões	1.45E-13	1.85E-15	9.19E-10	2.34E-10	—	1.15E-9	3.56E-14	4.34E-16	1.33E-10	1.01E-10	8.50E-14	2.34E-10	1.39E-9
Partículas α	1.47E-13	4.55E-15	1.03E-11	1.77E-11	—	2.81E-11	3.70E-14	1.12E-15	1.19E-12	7.32E-12	8.37E-13	9.38E-12	3.75E-11

Tabela 4.3: Taxas de dose absorvida, em Gy/s, para as fontes presentes na fase de estadia na superfície de Marte da missão, por tipo de partículas constituintes e por tipo de partículas que deposita.

a)



b)

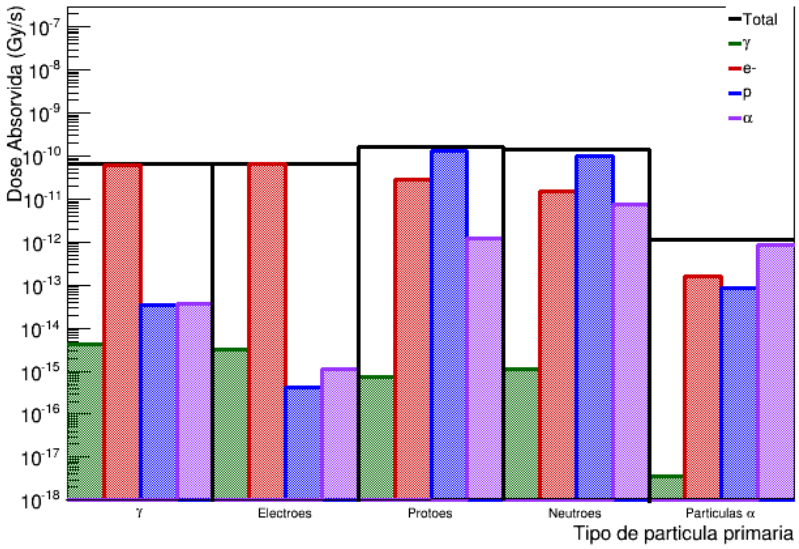


Figura 4.10: Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro de radiação em Marte, provenientes de GCR de a) protões e b) partículas α.

Comparando, os valores destas tabelas, as doses absorvidas para uma mesma fonte, mas para diferentes tipos de partículas originadas na esfera ICRU, observa-se que existem partículas que causam mais danos, apesar de poderem ter uma abundância baixa. Por exemplo, no caso dos GCR, constituídos essencialmente por protões, mas com cerca de 10% de partículas α e cerca de 1% de outros núcleos de elementos pesados contribuem em proporções diferentes para a dose total absorvida, como se mostra na tabela 4.4. É também de notar no caso dos GCR, que tanto nos casos de mínimo como de máximo solar, a contribuição das partículas α é superior à contribuição dos protões embora a sua abundância nesta fonte de radiação seja maior. Esta consideração está relacionada com o facto de que para energias primárias superiores a 1 GeV existe maior deposição de energia.

Partículas	GCR (Mínimo Solar) (%)	GCR (Máximo Solar) (%)
Protões	43.57	42.42
Partículas α	56.17	57.39
Núcleos O	0.26	0.19
Núcleos Fe	1.60E-4	2.24E-5

Tabela 4.4: Comparação das contribuições, em %, para a dose absorvida total de cada partícula constituinte para o caso de GCR no mínimo e máximo de atividade solar.

A tabela 4.5 resume os valores de taxa de dose equivalente, em Sv/s (excepto para o SEP, que estão em Sv), calculados a partir das tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, recorrendo à fórmula para a dose equivalente apresentada na equação 2.5 e aos valores de w_R apresentados na tabela 2.1 da secção 2.1 do capítulo 2.

SAÍDA DA TERRA	**FASE DE CRUZEIRO**			**SUPERFÍCIE DE MARTE**
Van Allen	**GCR min**	**GCR max**	**SEP**	**GCR (Protões e Partículas α)**
7.93E-4	6.55E-8	7.93E-8	5.29E-6	6.28E-9

Tabela 4.5: Taxa de dose equivalente, em Sv/s, para as diferentes fases da missão.

4.1.4 Dose absorvida e Dose equivalente por cenário de missão

Para se calcular a dose absorvida e a dose equivalente para cada cenário de missão a Marte tem de se multiplicar os valores de taxas de dose pelas durações de cada fase de missão (tabela 1.1 do capítulo 3). Obtiveram-se, as doses absorvidas e as doses equivalentes para cada cenário de missão e por cada fase de missão. A compilação desses resultados apresenta-se nas tabelas 4.6 e 4.7, respetivamente. Os valores finais apresentados na tabela 4.6 tem uma incerteza estatística relativa associada de 0.32% para a condição de mínimo solar e 0.33% no máximo solar, enquanto que os valores finais apresentados na tabela 4.7 tem uma incerteza estatística associada de 0.40% para o mínimo solar e 0.42% para o máximo. Os valores de dose absorvida e dose equivalente correspondentes ao evento SEP tem uma incerteza estatística relativa associada de 0.10%.

		SAÍDA DA TERRA					FASE DE CRUZEIRO				SUPERFÍCIE DE MARTE	TOTAL		SEP
		LEO		Cinturas de Van Allen			Ida		Volta					
Fontes Principais		GCR*				Cinturas	GCR				GCR			
Condições Solares		Min	Max	Min	Max	—	Min	Max	Min	Max	Max	**Min**	**Max**	
Missão	1	6.46E-5	5.24E-5	3.52E-5	2.86E-5	3.36	1.26E-1	1.03E-1	1.64E-1	1.33E-1	7.31E-3	**3.66**	**3.61**	**3.20**
	2								1.34E-1	1.08E-1	1.12E-1	**3.73**	**3.68**	
	3						8.46E-2	6.87E-2	6.20E-2	5.04E-2	1.51E-1	**3.66**	**3.63**	

Tabela 4.6: Dose absorvida, em Gy, para as diferentes fases dos cenários de missão propostos (* espectro considerado em meio interplanetário, estimativa por excesso).

A figura 4.11 representa as doses equivalentes para cada um dos três cenários por ambiente de radiação considerado, nas condições de mínimo e máximo solar, respetivamente.

Os valores de dose equivalente para a estadia na superfície de Marte, apresentados na tabela 4.7, também podem ser comparados com os resultados obtidos em [7] (tabela 2). Para o máximo solar tendo em conta 14 dias de exposição, em [7] obtêm-se valores que variam entre 4.5 e 8.9 mSv, dependendo do modelo utilizado. O valor apresentado na coluna correspondente a Marte da tabela 4.7 para cenário de curta permanência (30 dias na superfície de Marte): 1.63E-2 Sv, reduzido a metade para comparar com os 14 dias é: 8.15 mSv, este valor é diretamente comparável com os valores de [7] acima apresentados e conclui-se que os valores são consistentes entre si. É de notar que [7] faz o cálculo de equivalente de dose ambiente (medido a 10 mm da superfície da esfera ICRU), $H^{\star}(10)$ enquanto que os valores apresentados neste trabalho são calculados fazendo uma média em todo o volume da esfera.

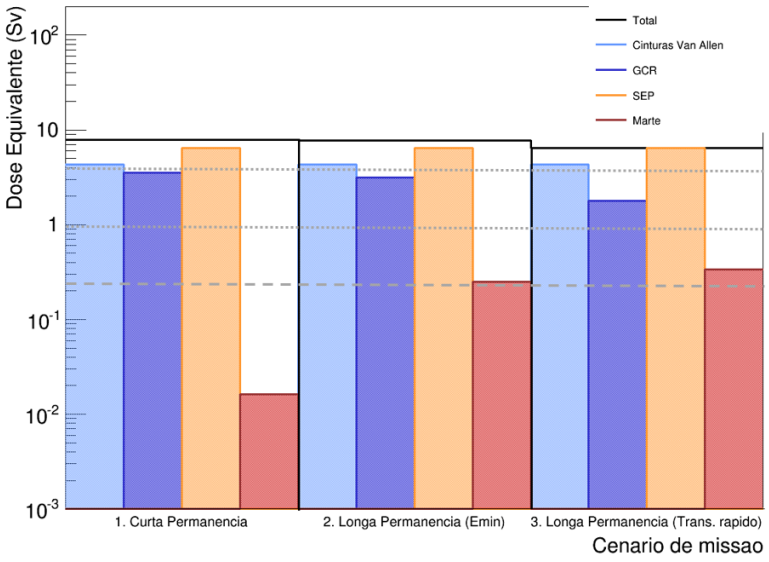
Os valores de dose equivalente são os que podem ser diretamente comparados com os valores de restrição de dose apresentados nas tabelas 2.4 e 2.5 da secção 2.2 do capítulo 2. Destes valores, os passíveis de comparação são os de restrição de dose na carreira dos astronautas. Os valores totais apresentados na tabela 4.7, entre 6.09 e 7.83 Sv/missão, tanto para mínimo como para máximo solares e para os três cenários considerados, encontram-se fora das restrições acima mencionadas (ver figura 4.11), que variam entre 1.00 e 4.00 Sv/carreira, dependendo do género e idade do astronauta como mostra a tabela 2.5 da secção 2.2 do capítulo 2, sendo o limite inferior (1.00 Sv) para astronautas do sexo feminino com 25 anos e o limite superior (4.00 Sv) para astronautas dos sexo masculino com 55 anos. Os valores de dose equivalente totais ultrapassam a restrição máxima (4.00 Sv) permitida pela NASA em cerca de 77%. Ainda assim, no caso da ocorrência de um evento SEP semelhante ao de Dezembro, 2006, a dose equivalente total passa a ultrapassar a restrição máxima por um fator de 3.37. O que significa que no caso em que a blindagem não é considerada, o que também não corresponde ao caso realista, a viabilidade da missão está comprometida.

Neste caso, a fonte de radiação que mais contribui para a dose equivalente total são as partículas aprisionadas nas cinturas de Van Allen com cerca de 61% (média considerando os três cenários e as duas condições solares). Sendo que a contribuição desta fonte é tão elevada e que os GCR em LEO e perto das cinturas de radiação sofrem atenuação e blindagem por parte destas, não se produ-

		SAÍDA DA TERRA					FASE DE CRUZEIRO				SUPERFÍCIE DE MARTE	TOTAL		SEP
		LEO		Cinturas de Van Allen			Ida		Volta					
Fontes Principais		GCR*				Cinturas	GCR				GCR			
Condições Solares		Min	Max	Min	Max	—	Min	Max	Min	Max	Max	**Min**	**Max**	
Missão	1	7.85E-4	6.48E-4	4.28E-4	3.54E-4	4.28	1.54	1.27	1.99	1.65	1.63E-2	**7.83**	**7.22**	**6.40**
	2								1.62	1.34	2.48E-1	**7.69**	**7.14**	
	3						1.03	0.85	0.75	0.62	3.36E-1	**6.40**	**6.09**	

Tabela 4.7: Dose equivalente, em Sv, para as diferentes fases dos cenários de missão propostos (* espectro considerado em meio interplanetário, estimativa por excesso).

a)



b)

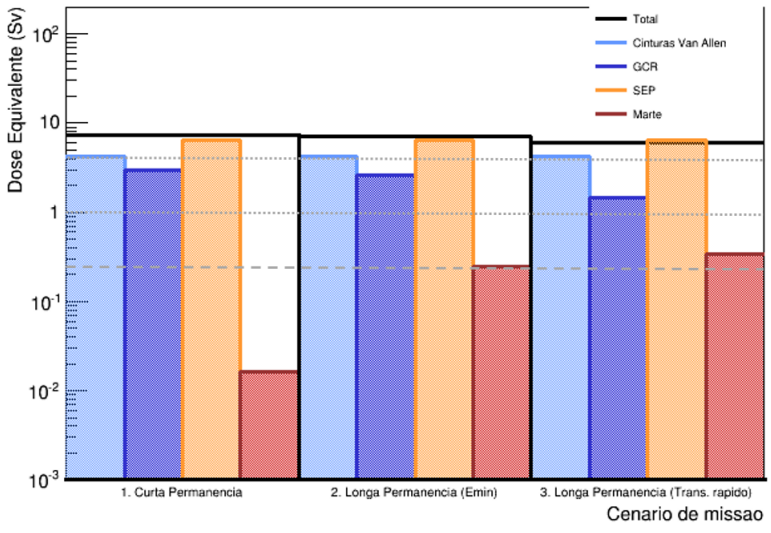


Figura 4.11: Dose absorvida, para cada um dos três cenários propostos, por ambiente de radiação, nos a) mínimo e b) máximo solar (onde as linhas a tracejado fino representam o intervalo de restrições de dose de carreira para astronautas e o tracejado largo a restrição de dose em 30 dias).

ziram os espectros de GCR considerando esta atenuação, utilizando-se o espectro de GCR no meio interplanetário (a 1 UA do Sol) como anteriormente. Assim, a escolha deste espectro de GCR em vez de um espectro de GCR atenuado (pelas cinturas) é uma estimativa por excesso e sendo que a sua contribuição é baixa devido à curta duração desta fase da missão, esta diferença não é significativa. Uma possibilidade para tentar diminuir estes valores de dose equivalente correspondentes às cinturas de Van Allen podia ser a otimização da trajetória de passagem da nave nessa zona. Embora, o trajeto mais curto pareça a opção mais óbivia, esta escolha está restringida à não passagem pelos pólos, porque nessa região há uma acumulação de linhas de campo, o que aumenta a dose.

Não há diferenças significativas entre a dose equivalente total no mínimo e no máximo de atividade solar para qualquer dos três cenários de missão. Estes resultados não têm em conta a estrutura da nave espacial (o estudo incluindo a blindagem da nave será discutido na secção 4.2).

Ao considerar os valores integrados nos períodos de tempo de exposição, correspondentes obtém-se cerca de 0.59 Sv para a exposição total aos GCR durante toda a missão e uma dose de 6.40 Sv para o evento SEP em 14 dias, o que corresponde a uma dose quase 1.5 vezes maior num período de tempo cerca de 56 vezes menor. Os GCR produzem efeitos estocásticos nos orgãos dos astronautas, sendo o seu impacto cumulativo ao longo da duração da missão, estando estes dentro dos limites aceitáveis de risco por exposição radiológica. O evento SEP, devido à elevada dose associada é um tipo de acontecimento que pode produzir efeitos determinísticos.

Por outro lado, a blindagem da nave deve reduzir significativamente a dose nos astronautas, esperando-se que cause uma redução considerável na dose correspondente à passagem nas cinturas de Van Allen (ver secção 4.2).

4.2 Resultados com Blindagem

4.2.1 Energia Depositada

Saída da Terra

A figura 4.12 a) representa a energia depositada por protões das cinturas de Van Allen e a figura 4.1 b) a energia depositada por eletrões, no caso em que se considera blindagem. Esta figura deve ser comparada com a figura 4.1 da secção 4.1. Onde para ambos os casos a) e b) se observa uma diminuição do máximo de deposição de energia de seis e quatro ordens de grandeza, respetivamente. Enquanto que esse máximo para o caso a) (protões primários) sofre um deslocamento em energia, passando de 1 MeV para 100 MeV, o caso b) (eletrões primários) mantém-se em cerca de 0.1 MeV. Também neste caso, os protões criam, como partículas secundárias, fotões, eletrões, outros protões e partículas α; enquanto que para os eletrões primários não há criação de partículas secundárias hadrónicas.

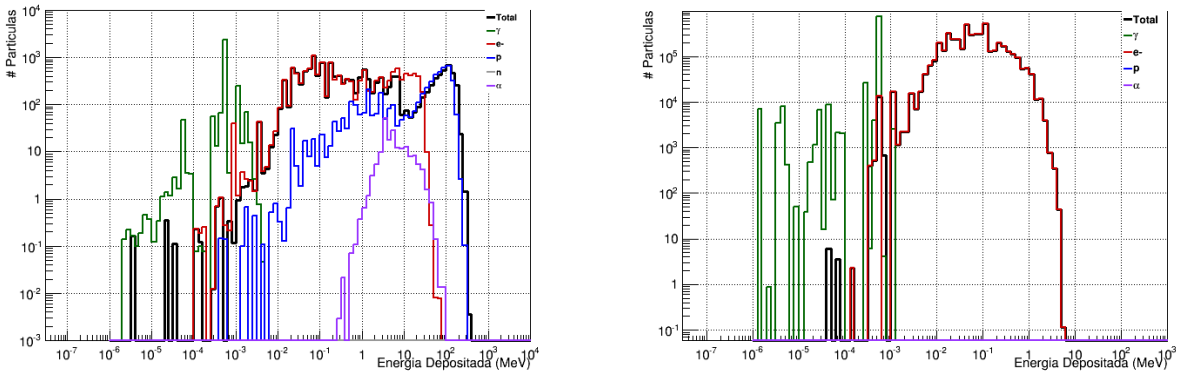


Figura 4.12: Distribuição da energia depositada, em MeV, para o espectro de partículas aprisionadas nas Cinturas de Van Allen por cada tipo de partícula secundária que deposita, para partículas primárias: a) protões e b) eletrões, considerando blindagem.

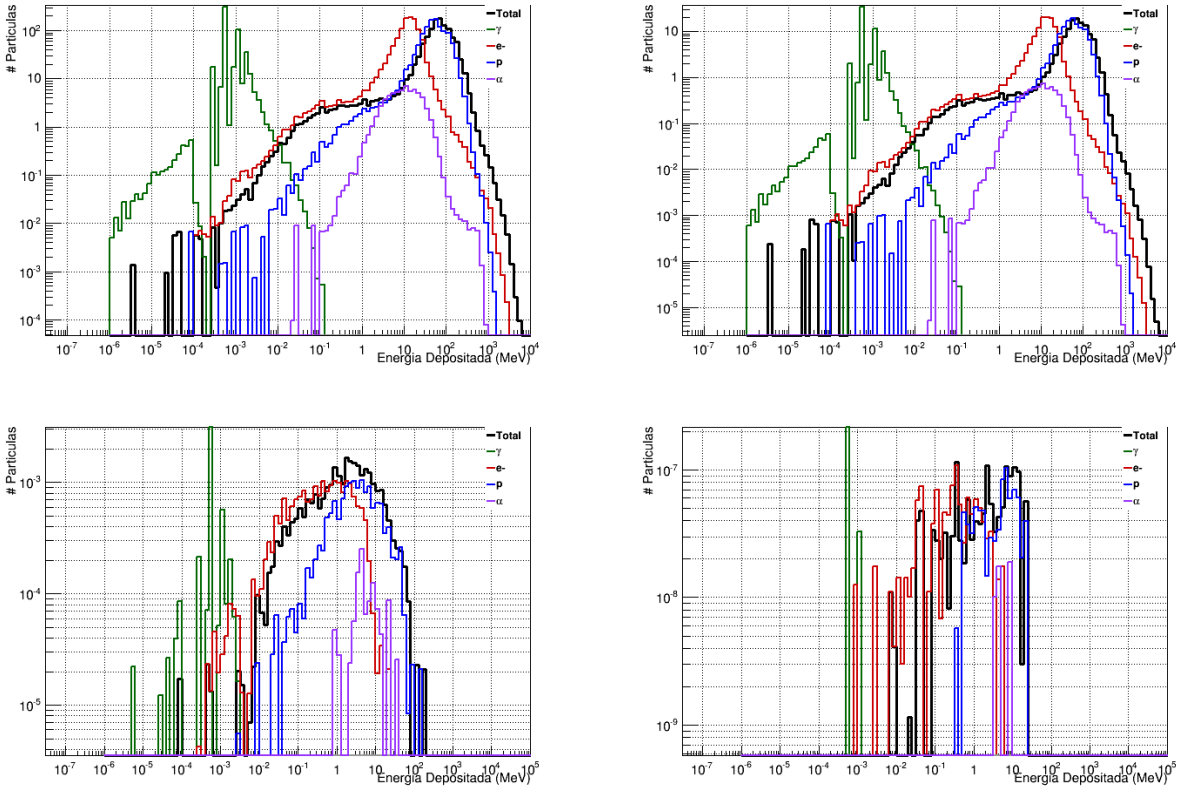


Figura 4.13: Distribuição da energia depositada, em MeV, para o espectro de GCR no mínimo solar por cada tipo de partícula secundária que deposita, para partículas primárias: a) protões, b) α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro, considerando blindagem.

Fase de Cruzeiro

As figuras 4.13 e 4.14 representam as distribuições de energia depositada para cada uma das partículas primárias dos GCR: a) protões, b) partículas α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro, em condições de mínimo e máximo de atividade solar para o caso em que se considera blindagem, respetivamente. Estas figuras são diretamente comparáveis com as figuras 4.2 e 4.3, donde se concluí que para os casos a) e b) (protões e partículas α) não se verifica alterações significativas no máximo de deposição, tanto em número de partículas como em valor de energia, enquanto que para o caso c)

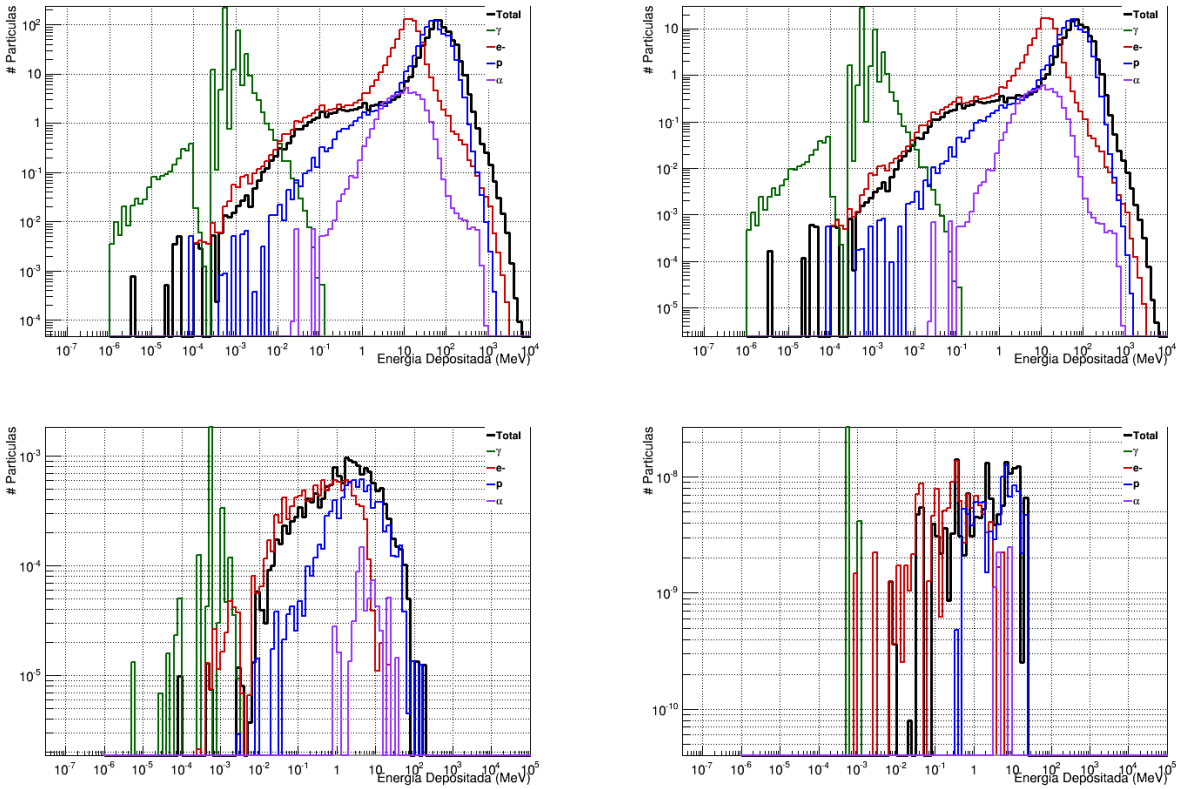


Figura 4.14: Distribuição da energia depositada, em MeV, para o espectro de GCR no máximo solar por cada tipo de partícula secundária que deposita, para partículas primárias: a) protões, b) α, c) núcleos de Oxigénio e d) núcleos de Ferro, considerando blindagem.

há uma diminuição de três ordens de grandeza no máximo e uma deslocação em energia também de três ordens de grandeza e no caso d) uma diminuição de quatro ordens de grandeza no máximo e uma deslocação em energia de duas.

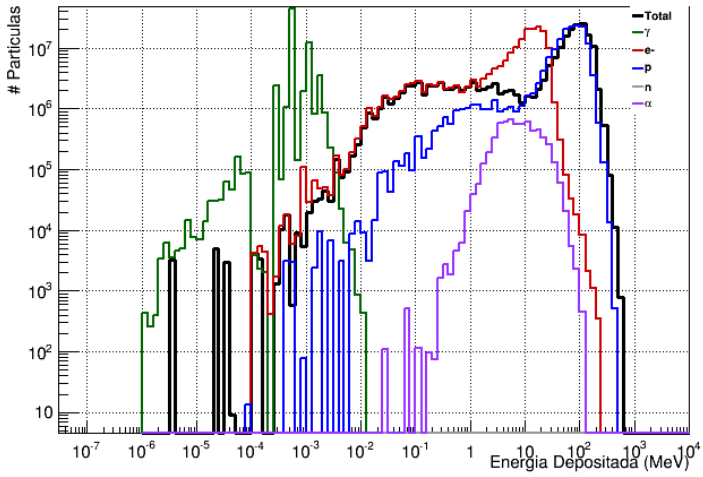


Figura 4.15: Distribuição da energia depositada, em MeV, para protões do evento SEP, por cada tipo de partícula secundária que deposita, considerando blindagem.

A figura 4.15 representa a distribuição de energia depositada para o evento SEP e compara-se com a figura 4.4. O máximo de deposição de energia diminui de quase uma ordem de grandeza,

mas sofre uma deslocação em energia de ordem de grandeza superior. Sendo que o espectro de energia depositada total, se estende, neste caso, até energias mais baixas ($\sim 10^{-6}$ enquanto que sem blindagem era $\sim 10^{-1}$ MeV).

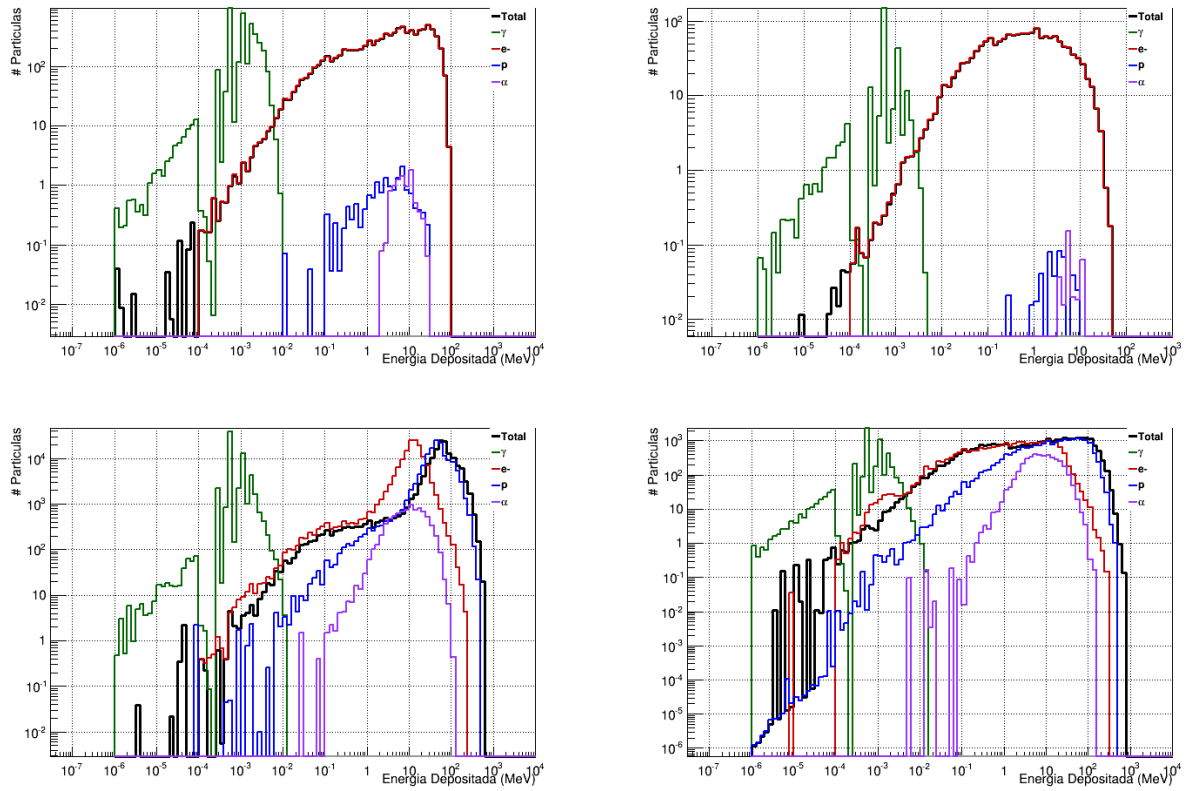


Figura 4.16: Distribuição da energia depositada, em MeV, para os espectros em Marte, originados a partir de um espectro de GCR de protões, por cada tipo de partícula secundária que deposita, para partículas primárias: a) fotões, b) eletrões, c) protões e d) neutrões, considerando blindagem.

Superfície de Marte

A figura 4.16 representa a distribuição de energia depositada no caso do ambiente de radiação à superfície de Marte, originados por protões de GCR.

O espectro de neutrões (figura 4.16 d)) altera a distribuição de energia depositada carregadas, nomeadamente protões, passando a contribuir para energias mais baixas (a partir de cerca de 1 eV). Este alargamento nas distribuições está relacionada com a secção eficaz elevada dos neutrões com os elementos que constituem a esfera ICRU (Z baixo), através de reações (n,p) e (n,γ), tal como no caso anterior sem blindagem.

Também no caso com blindagem, para as figuras de topo, que são originadas por fotões e eletrões, as partículas secundárias são na maioria resultado da cascata eletromagnética. Para o caso a) (fotões) o máximo de deposição de energia permanece praticamente inalterado, enquanto que para b) (eletrões) há um deslocamento em energia de mais uma ordem de grandeza e em número de partículas uma diminuição de quase duas. Contrariamente ao caso descrito acima, nas duas figuras de baixo, onde a esfera é irradiada por protões e neutrões, são novamente os protões (primários e secundários) que

dominam a quantidade de energia depositada, embora quando considerada blindagem, há um alargamento de cerca de uma ordem de grandeza do espectro de protões para o caso c). O espectro que se mantém menos modificado é o de neutrões, o que se deve à pouca diferença que a blindagem provoca na distribuição de neutrões primários (ver secção 3.2 do capítulo 3).

Os histogramas representativos dos casos de espectros em Marte originados por GCR de partículas α não foram apresentados devido ao seu comportamento ser semelhante, tal como no caso sem blindagem.

4.2.2 Perda de Energia

Na figura 4.17 está representada a distribuição de energia depositada total $E_{dep_{tot}}$ em função da energia primária E_{prim}. O gradiente de cor indica a taxa de número de partículas em cada ponto E_{prim}-$E_{dep_{tot}}$. O número de partículas representado não corresponde ao número de partículas simuladas, mas sim ao número de partículas normalizado, com o fator w_E, ao espectro de GCR para protões primários, no mínimo solar, considerando blindagem.

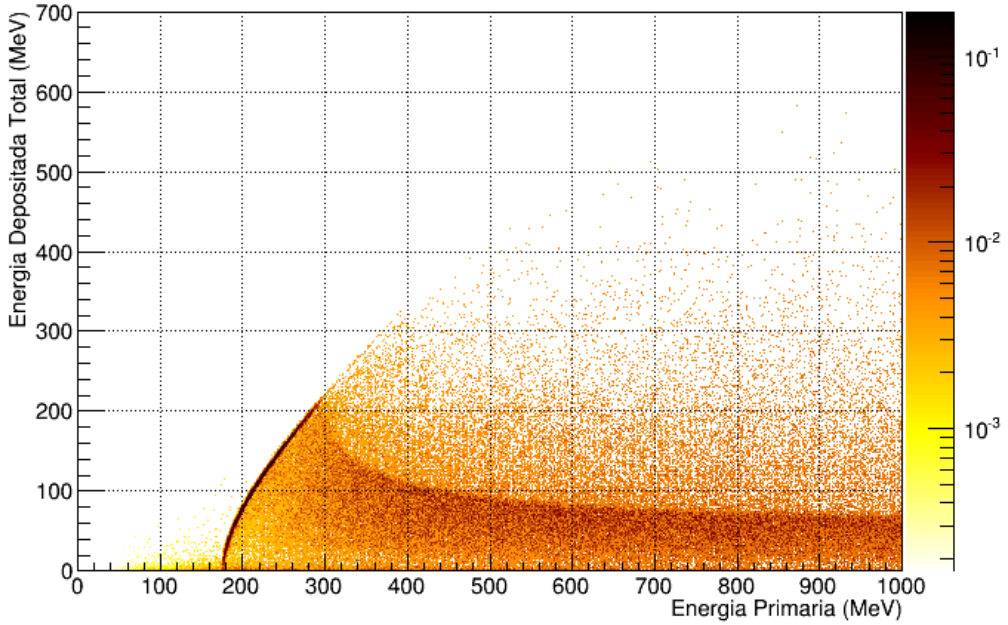


Figura 4.17: Distribuição da energia depositada total, em MeV, em função da energia primária, em MeV, onde o gradiente de cor indica o número de partículas normalizado, com w_E ao espectro de GCR de protões no mínimo solar, considerando blindagem.

Comparando com a figura 4.6 é claro que para energias primárias inferiores a cerca de 175 MeV há um número muito reduzido de partículas a depositar energia. Para protões com energia primária de 167 MeV o alcance no Alumínio é de 10 cm, o que corresponde exatamente à espessura de blindagem considerada [14]. E portanto, protões com energia inferior a este valor sofrem blindagem.

4.2.3 Taxas de dose absorvida e dose equivalente

As taxas de dose absorvida, em Gy/s (excepto para o SEP, que estão em Gy), para cada fonte de radiação por tipo de partícula primária encontram-se compiladas nas tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, para as fases de saída da Terra, cruzeiro e estadia na superfície de Marte, respetivamente. Em cada coluna estão representadas as taxas para as diferentes partículas primárias, sendo que na primeira linha está a contribuição total e nas restantes as contribuições para cada tipo de partícula que deposita energia na esfera ICRU.

	SAÍDA DA TERRA		
	Cinturas de Van Allen		
	Protões	Eletrões	**Total**
Total	7.52E-9	1.46E-8	**2.21E-8**
γ	4.11E-14	9.54E-12	9.58E-12
Eletrões	1.13E-9	1.46E-8	1.57E-8
Protões	6.30E-9	—	6.30E-9
Partículas α	3.23E-11	—	3.23E-11

Tabela 4.8: Taxas de dose absorvida, em Gy/s, para as fontes presentes na fase de saída da Terra da missão, por tipo de partículas constituintes e por tipo de partículas que deposita, considerando blindagem.

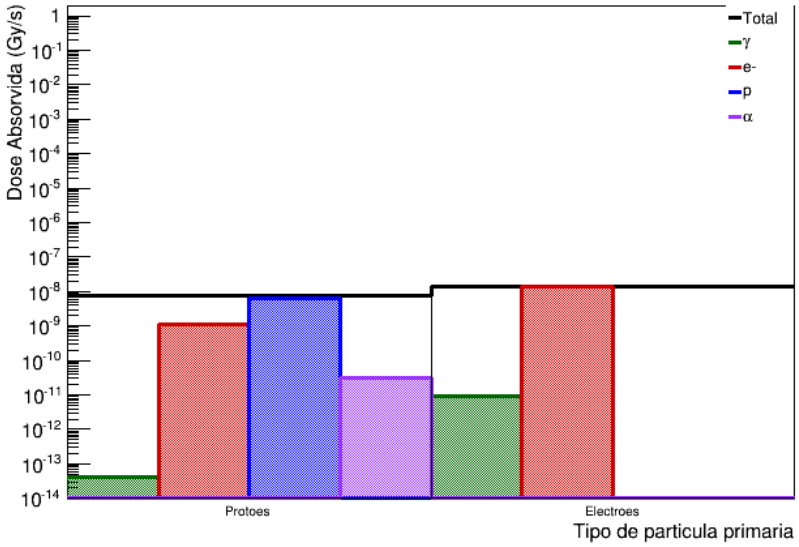


Figura 4.18: Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro partículas aprisionadas nas Cinturas de Van Allen, considerando blindagem.

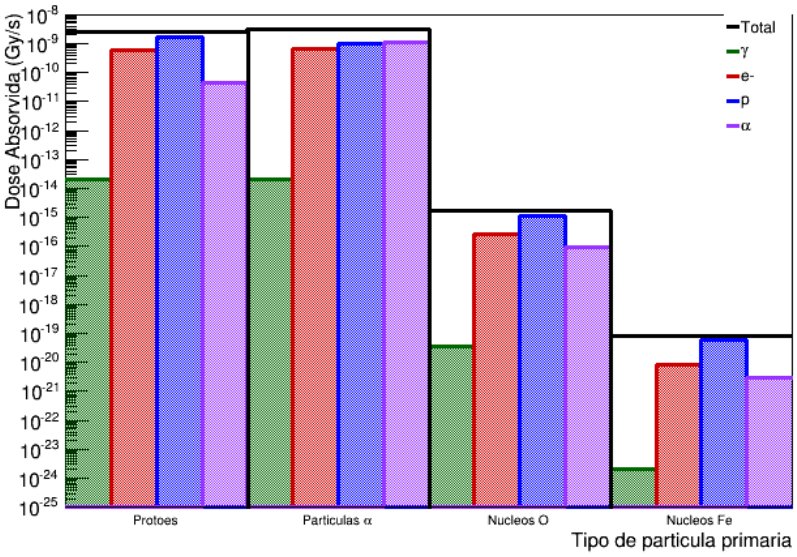
A tabela 4.8 compara-se com a tabela 4.1 da secção 4.1. O valor total taxa de dose absorvida para cinturas de Van Allen, diminui quase quatro ordens de grandeza quando se considera blindagem.

A figura 4.18 representa as doses absorvidas totais e as componentes em partículas (primárias e secundárias) que contribuem para a deposição de energia no volume da esfera ICRU, após interagirem com a blindagem de 10 cm de Alumínio, para eletrões e protões primários aprisionados nas cinturas de Van Allen.

	FASE DE CRUZEIRO										
	GCR min					GCR max					SEP
	Protões	Partículas α	Núcleos O	Núcleos Fe	**Total**	Protões	Partículas α	Núcleos O	Núcleos Fe	**Total**	**Protões**
Total	2.11E-9	2.60E-9	9.67E-16	9.41E-21	**4.71E-9**	2.60E-9	3.01E-9	1.65E-15	7.87E-20	**5.61E-9**	**7.73E-9**
γ	1.71E-14	1.79E-14	2.09E-20	2.50E-25	3.50E-14	2.00E-14	2.02E-14	3.58E-20	2.04E-24	4.02E-14	3.00E-14
Eletrões	5.15E-10	5.66E-10	1.50E-16	1.01E-21	1.08E-9	6.14E-10	6.44E-10	2.57E-16	8.40E-21	1.26E-9	1.14E-9
Protões	1.34E-9	8.46E-10	6.60E-16	7.23E-21	2.19E-9	1.70E-9	9.64E-10	1.13E-15	6.06E-20	2.66E-9	6.47E-9
Partículas α	3.64E-11	8.70-10	5.48E-17	3.77E-22	9.06E-10	4.23E-1	1.07E-9	9.36E-17	2.95E-21	1.12E-9	3.58E-11

Tabela 4.9: Taxas de dose absorvida, em Gy/s, para as fontes presentes na fase de cruzeiro da missão, por tipo de partículas constituintes e por tipo de partículas que deposita, considerando blindagem.

a)



b)

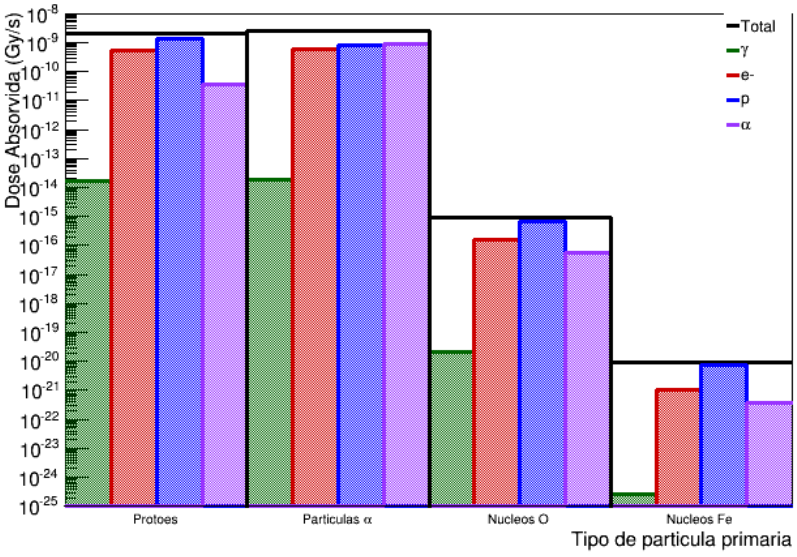
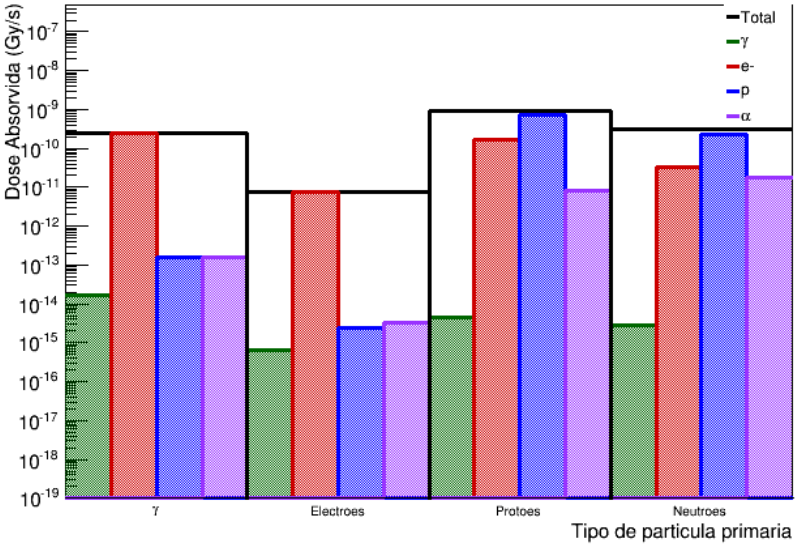


Figura 4.19: Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro de GCR nos a) mínimo e b) máximo solar, considerando blindagem

	SUPERFÍCIE DE MARTE												
	GCR Protões						GCR Partículas α						TOTAL
	γ	Eletrões	Protões	Neutrões	Partículas α	**Total**	γ	Eletrões	Protões	Neutrões	Partículas α	**Total**	
Total	2.48E-10	7.49E-12	9.48E-10	3.20E-10	—	**1.52E-9**	6.38E-11	1.44E-12	1.22E-10	1.40E-10	1.73E-10	**3.27E-10**	**1.85E-9**
γ	1.61E-14	6.68E-16	4.55E-15	2.76E-15	—	2.41E-14	4.24E-15	1.12E-16	5.41E-16	1.14E-15	4.12E-19	6.03E-15	3.01E-14
Eletrões	2.48E-10	7.48E-12	1.70E-10	3.19E-11	—	4.57E-10	6.37E-11	1.44E-12	2.10E-11	1.50E-11	1.78E-14	1.01E-10	5.58E-10
Protões	1.59E-15	2.37E-15	7.42E-10	2.34E-10	—	9.76E-10	3.85E-14	5.91E-16	9.71E-11	1.01E-10	2.16E-14	1.99E-10	1.17E-9
Partículas α	1.62E-13	3.30E-15	8.48E-12	1.77E-11	—	2.63E-11	3.85E-14	8.42E-16	9.16E-13	7.31E-12	1.14E-13	8.37E-12	3.47E-11

Tabela 4.10: Taxas de dose absorvida, em Gy/s, para as fontes presentes na fase de estadia na superfície de Marte da missão, por tipo de partículas constituintes e por tipo de partículas que deposita, considerando blindagem.

a)



b)

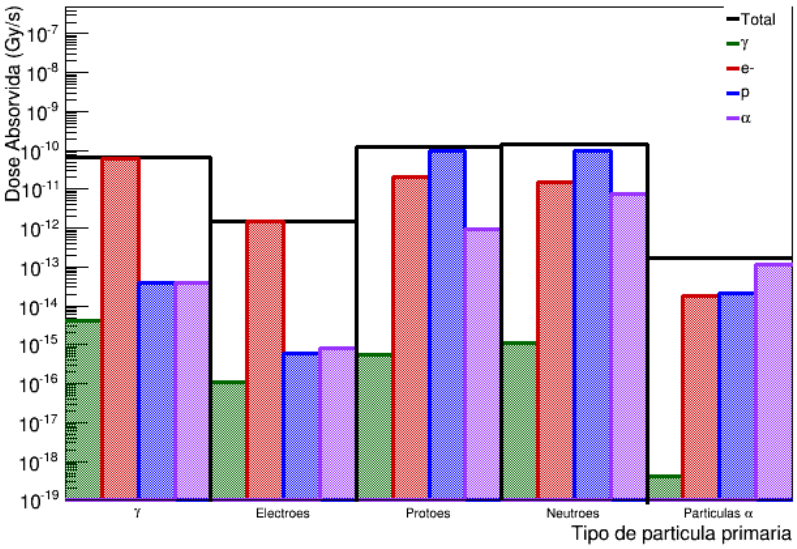


Figura 4.20: Dose absorvida para as diferentes partículas do espectro de radiação em Marte, provenientes de GCR de a) protões e b) partículas α, considerando blindagem.

Comparando a tabela 4.9 com a tabela 4.2 da secção 4.1, observa-se um decréscimo de cerca de 12.6%, nas taxas de dose absorvida total para GCR, tanto no mínimo como no máximo de atividade solar. É também de notar, que a componente acima de 1 GeV, praticamente não sofre blindagem, isto relaciona-se com os valores de alcance no Alumínio para protões, por exemplo, com energia de 1 GeV serem de 153 cm mais de 15 vezes superior à espessura da blindagem existente.

A figura 4.19 representa as doses absorvidas totais e as componentes em partículas (primárias e secundárias) que contribuem para a deposição de energia no volume da esfera ICRU, para as diferentes partículas primárias de GCR em condições de mínimo e máximo solar, para o caso em que se considera blindagem.

Da comparação entre as tabelas 4.10 e 4.3 concluí-se as taxas de dose absorvida total por astronautas na superfície de Marte, devido ao efeito da blindagem, sofrem um decréscimo de cerca de 34%.

A figura 4.20 representa as doses absorvidas totais e as componentes em partículas (primárias e secundárias) que contribuem para a deposição de energia no volume da esfera ICRU, para as diferentes partículas que atingem a superfície de Marte, provenientes, respetivamente, de GCR de protões e de GCR de α, considerando blindagem.

Também quanto aos valores de taxa de dose equivalente, apresentados na tabela 4.11, a diminuição mais significativa vem por parte das taxas correspondentes às cinturas de Van Allen, quase quatro ordens de grandeza. Os valores de taxa de dose equivalente correspondentes aos outros ambientes (GCR na fase de cruzeiro e ambiente em Marte) mantêm-se na mesma ordem de grandeza.

SAÍDA DA TERRA	**FASE DE CRUZEIRO**			**SUPERFÍCIE DE MARTE**
Van Allen	**GCR min**	**GCR max**	**SEP**	**GCR (Protões e Partículas α)**
2.97E-8	5.62E-8	6.54E-8	1.55E-8	5.02E-9

Tabela 4.11: Taxa de dose equivalente, em Sv/s, para as diferentes fases das missões, considerando blindagem.

4.2.4 Dose absorvida e Dose equivalente por cenário de missão

Para se calcular a dose absorvida e a dose equivalente para cada cenário de missão a Marte tem de se multiplicar os valores de taxas de dose pelas durações de cada fase de missão. Estes são apresentados na tabela 1.1 do capítulo 3. Obtiveram-se, assim, as doses absorvidas e as doses equivalentes para cada cenário de missão proposto pela NASA, por cada fase de missão e para cada partícula primária. A compilação desses resultados apresenta-se nas tabelas 4.12 e 4.13, respetivamente. Os valores finais da tabela 4.12 tem uma incerteza estatística relativa de 0.46% e a tabela 4.13 uma incerteza estatística relativa de 0.52%. Os valores de dose absorvida e dose equivalente associados ao evento SEP têm uma incerteza estatística de 0.18%.

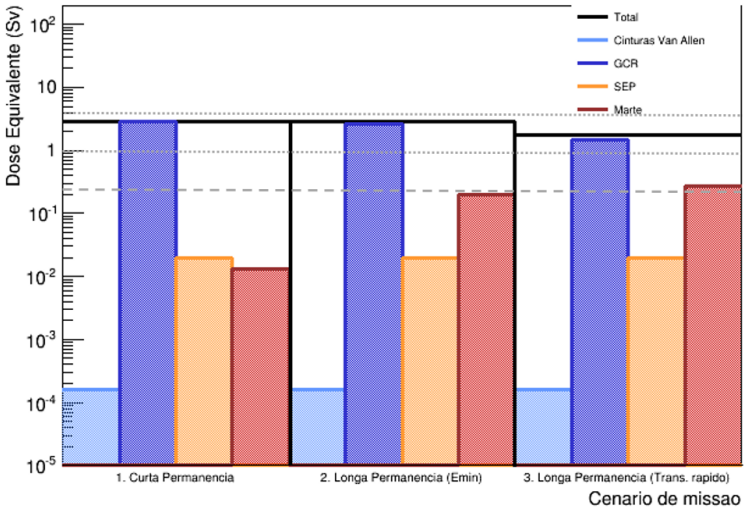
		SAÍDA DA TERRA					FASE DE CRUZEIRO				SUPERFÍCIE DE MARTE	TOTAL		SEP
		LEO		Cinturas de Van Allen			Ida		Volta					
Fontes Principais		GCR*				Cinturas	GCR				GCR			
Condições Solares		Min	Max	Min	Max	—	Min	Max	Min	Max	Max	**Min**	**Max**	
Missão	1	5.55E-5	4.66E-5	3.03E-5	2.54E-5	1.20E-4	1.09E-1	9.11E-2	1.41E-1	1.18E-1	4.80E-3	**0.25**	**0.21**	**9.34E-3**
	2								1.15E-1	9.64E-2	7.32E-2	**0.30**	**0.26**	
	3						7.27E-2	6.10E-2	5.33E-2	4.47E-2	9.89E-2	**0.23**	**0.20**	

Tabela 4.12: Dose absorvida, em Gy, para as diferentes fases dos cenários de missão propostos, considerando blindagem (* espectro considerado em meio interplanetário, estimativa por excesso).

		SAÍDA DA TERRA					FASE DE CRUZEIRO				SUPERFÍCIE DE MARTE	TOTAL		SEP
		LEO		Cinturas de Van Allen			Ida		Volta					
Fontes Principais		GCR*				Cinturas	GCR				GCR			
Condições Solares		Min	Max	Min	Max	—	Min	Max	Min	Max	Max	**Min**	**Max**	
Missão	1	6.48E-4	5.56E-4	3.53E-4	3.03E-4	1.60E-4	1.27	1.09	1.65	1.41	1.30E-2	**2.93**	**2.51**	**1.87E-2**
	2								1.34	1.15	1.99E-1	**2.81**	**2.44**	
	3						0.85	0.73	0.62	0.53	0.27	**1.74**	**1.53**	

Tabela 4.13: Dose equivalente, em Sv, para as diferentes fases dos cenários de missão propostos, considerando blindagem (* espectro considerado em meio interplanetário, estimativa por excesso).

a)



b)

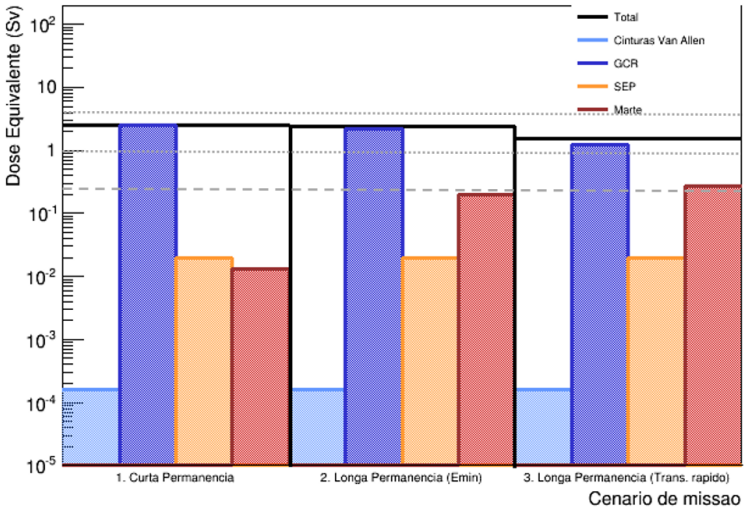


Figura 4.21: Dose equivalente, para cada um dos três cenários propostos, por ambiente de radiação, nos a) mínimo e b) máximo solar, considerando blindagem (onde as linhas a tracejado fino representam o intervalo de restrições de dose de carreira para astronautas e o tracejado largo a restrição de dose em 30 dias).

A blindagem de 10 cm de Alumínio, contribuiu para uma diminuição dos valores de dose equivalente relativamente aos obtidos sem blindagem, esta diminuição está representada, em percentagem, na tabela 4.14.

Cenários de Missão	Sem blindagem (Sv)		Com blindagem (Sv)		Diminuição (%)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1 – Curta permanência	7.83	7.22	2.93	2.51	63	65
2 – Longa permanência (E_{min})	7.69	7.14	2.81	2.44	64	66
3 – Longa permanência (trâns. rápido)	6.40	6.09	1.74	1.53	73	75
Incertezas estatísticas	$\pm$ 0.40%	$\pm$ 0.42%	$\pm$ 0.52%	$\pm$ 0.52%		
Evento SEP	6.40 $\pm$ 0.10%		0.02 $\pm$ 0.18%		99.7	

Tabela 4.14: Comparação dos valores de dose equivalente entre os dois casos sem e com blindagem.

A figura 4.21 representa as doses equivalentes para cada um dos três cenários por ambiente de radiação considerado, nas condições de mínimo e máximo solar, respetivamente.

Assim considerando a blindagem de 10 cm de Alumínio, as doses equivalentes totais variam entre 1.53 e 2.93 Sv/missão, o que significa que que neste caso, se encontram dentro das restrições de dose impostas pela NASA para astronautas, o que em média (considerando os três cenários e as duas condições solares) corresponde a uma diminuição de 67%.

O ambiente de radiação mais contribui, nestas condições, são os GCR com cerca de 92% considerando uma média entre todos os cenários e ambas as condições solares. Estas contribuições são diferentes do que acontecia no caso sem blindagem, onde as cinturas de Van Allen dominavam o valor da dose equivalente total nos três cenários, diminuindo a sua contribuição em cerca de 11300 vezes.

A redução na dose equivalente relativa ao SEP corresponde a 99.7% devido ao efeito da blindagem (compatível com [29]), passando a contribuir apensas com 0.02 Sv. Neste caso, os efeitos do evento SEP, são amplamente reduzidos, contribuindo para a dose equivalente da missão com menos de 1% (média entre as duas condições solares). O que significa, que a eventual ocorrência de um evento SEP, similar ao ocorrido em Dezembro de 2006, não compromete a viabilidade da missão a Marte. Contudo, deve notar-se que no caso do evento SEP a dose é absorvida num curto período de tempo, no caso estudado correspondente a 14 dias. Assim, os valores de dose equivalente obtidos para o evento SEP devem ser comparados com as restrições de dose para astronautas em 30 dias. No caso do evento de Dezembro de 2006, a contribuição (0.04 Sv) encontra-se dentro dessas restrições nos olhos, pele e OFS, apesar disso, eventos SEP mais intensos do que o considerado podem exceder estes limites.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho, determinaram-se as doses absorvidas e as doses equivalentes para as diferentes fases dos cenários de missões tripuladas a Marte propostos pela NASA. Estes resultados foram obtidos a partir de simulações dos diferentes tipos de partículas primárias, presentes nos ambientes de radiação numa missão a Marte, quando interagem com um fantoma antropomórfico computacional de referência (esfera ICRU).

As doses equivalentes totais obtidas, tanto para condições de máximo e mínimo solar, variam entre 6.09 e 7.83 Sv/missão e encontram-se fora das restrições de dose permitidas pela NASA para astronautas, que variam entre 1.00 e 4.00 Sv/carreira, dependendo do género e idade do astronauta. É de notar que a fonte de radiação que mais contribui para a dose equivalente total são as cinturas de Van Allen, com cerca de 61% (média considerando os três cenários e as duas condições solares). Uma vez que esta fonte de radiação é a que representa maiores riscos para os astronautas, esforços devem ser feitos no sentido de otimizar a trajetória da nave à saída da Terra.

Os valores de dose equivalente totais ultrapassam a restrição máxima (4.00 Sv) em cerca de 77%. O evento SEP contribui com uma dose equivalente de 6.40 Sv. Assim, no caso da ocorrência de um evento SEP semelhante ao de Dezembro, 2006, a dose equivalente total passa a ultrapassar a restrição máxima por um fator de 3.37. Isto significa que no caso em que a blindagem não é considerada a viabilidade da missão está comprometida.

Contudo, numa missão real as tripulações estão protegidas pela blindagem da nave. Assim, os resultados relevantes na estimativa dos efeitos nocivos da exposição à radiação são aqueles obtidos quando uma blindagem típica de Alumínio é considerada.

Nos cálculos efetuados tendo em consideração uma blindagem para a nave de 10 cm de Alumínio, os valores de dose equivalente variam entre 1.53 e 2.93 Sv/missão, o que corresponde (em média) a uma diminuição de cerca de 67%, considerando ambas as condições solares e os três cenários. Com esta blindagem, a contribuição das Cinturas de Van Allen sofre um decréscimo superior a 11300 vezes relativamente à situação sem blindagem, onde esta fonte dominava o valor das doses em todos os cenários.

O ambiente de radiação que mais contribui quando consideramos a blindagem são os GCR com

cerca de 92% considerando uma média entre todos os cenários e ambas as condições solares.

Neste caso, os efeitos do evento SEP, a ocorrem são amplamente reduzidos, 0.02 Sv, contribuindo para a dose equivalente da missão com menos de 1%, o que corresponde a uma redução de 99.7%. Isto significa, que a utilização de uma blindagem apropriada tornará a missão a Marte viável, mesmo na eventual ocorrência de um evento SEP similar ao ocorrido em Dezembro de 2006. Contudo, deve notar-se que no caso dos eventos SEP, a dose é absorvida num curto período de tempo, sendo que no caso estudado foi de 14 dias. Assim, os valores de dose equivalente obtidos para o evento SEP devem ser comparados com as restrições de dose para astronautas em 30 dias. No caso do evento de Dezembro de 2006 a dose equivalente (0.04 Sv) encontra-se dentro destas restrições para os olhos, pele e OFS, no entanto, no caso de eventos SEP mais intensos do que o considerado esta pode exceder estes limites, por exemplo o de 7 de Agosto de 1972.

Em resumo, apresenta-se a comparação entre as doses equivalentes obtidas nos dois casos: sem e com blindagem, nas condições de mínimo e máximo solar e no caso da ocorrência de um evento SEP, encontra-se representada na tabela 5.1.

Cenários de Missão	Sem blindagem (Sv)		Com blindagem (Sv)	
	Min	Max	Min	Max
1 – Curta permanência	7.83	7.22	2.93	2.51
2 – Longa permanência (E_{min})	7.69	7.14	2.81	2.44
3 – Longa permanência (trâns. rápido)	6.40	6.09	1.74	1.53
Incertezas	$\pm$ 0.40%	$\pm$ 0.42%	$\pm$ 0.52%	$\pm$ 0.52%
Evento SEP	6.40 $\pm$ 0.10%		0.02 $\pm$ 0.18%	

Tabela 5.1: Comparação dos valores de dose equivalente entre os dois casos sem e com blindagem.

Todos os valores de dose equivalente obtidos têm um incerteza estatística inferior a 1%. Para além das incertezas estatísticas existem erros sistemáticos difíceis de quantificar, mas com certeza superiores a este valor. Como fonte de erro sistemático pode considerar-se o facto do fantoma utilizado, esfera ICRU, ser uma aproximação simplista do corpo real de um astronauta. Mesmo no caso da utilização de um fantoma antropomórfico mais realista, este seria sempre um padrão que não teria em conta a variabilidade morfológica dos astronautas. Outros erros sistemáticos provém dos fatores de peso da radiação, w_R considerados como constantes (excepto no caso do neutrões), quando na realidade estes dependem do LET. Também se deve considerar como erro sistemático a aproximação efetuada para a modulação solar nos espectros de GCR ao longo da trajetória por um valor médio a 1 UA do Sol.

Assim, a utilização de um fantoma antropomórfico computacional mais realista deverá ser implementado em simulações futuras, de modo a determinar de forma mais detalhada as doses equivalente nos diferentes órgãos dos astronautas. Estudos futuros também deverão incluir modelos mais complexos da blindagem utilizando diferentes combinações de materiais. Também a escolha de espectros de GCR tendo em conta a trajetória escolhida e a utilização de outro coeficientes que tenho em conta o LET das partículas, tal como por exemplo, o fator de qualidade Q.

Bibliografia

[1] NASA – NASA's Journey to Mars. https://www.nasa.gov/content/nasas-journey-to-mars, Acedido em Abril 2016.

[2] Ralf Moeller et. al. Astrobiological Aspects of Mutagenesis of Cosmic Radiation on Bacterial Spores. *ASTROBIOLOGY*, 10:509–521, 2010.

[3] NASA – Solar Physics: Marshall Space Flight Center. http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/Cycle22Cycle23Cycle24big.gif, Acedido em Abril 2016.

[4] NASA – CME. http://www.nasa.gov/content/goddard/the-difference-between-flares-and-cmes, Acedido em Abril 2016.

[5] NASA: Sun-Earth. http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News041612-M1.7flare.html, Acedido em Abril 2016.

[6] SOHO: Blasting CME. http://sohowww.nascom.nasa.gov/bestofsoho/images/suncombo2.html, Acedido em Março 2016.

[7] S. McKenna-Lawlor et. al. Overview of energetic particle hazards during prospective manned missions to Mars. *Planetary and Space Science*, 63–64:123–132, 2012.

[8] Australia Telescope National Facility. http://www.workingonthemoon.com/WOTM-Radiation.html, Acedido em Abril 2016.

[9] R. Aloisio et. al. Transition from galactic to extragalactic cosmic rays. *Astroparticle Physics*, 00: 1–20, 2012.

[10] Department of Physics and Astronomy, The University of Utah – Updated cosmic ray spectrum. http://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html, Acedido em Abril 2016.

[11] G. Dietze et al. Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. Technical report, The International Commission on Radiological Protection, 2013.

[12] R. Silberberg, C. H. Tsao e J. H. Adams, Jr. Radiation Doses and LET Distributions of Cosmic Rays. *Radiation Search*, 98:209–226, 1984.

[13] I. O'Neill. Origins of the Earth's Atmospheric "HISS" Energizing Van Allen Belt Particles Revealed. *Universe Today*, Acedido em Abril 2016.

[14] Berger, M.J., Coursey, J.S., Zucker, M.A., and Chang, J. . ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (version 1.2.3). Technical report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2005.

[15] David R. Williams. NASA: A Crewed Mission to Mars... http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/mars/marsprof.html, Acedido em Março 2016.

[16] USNRC Technical Training Center. Reactor Concepts Manual., volume 09-Biological Effects of Radiation. http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/09.pdf, Acedido em Abril 2016.

[17] Jon Rask. NASA – Space Faring: The Radiation Challenge – An Interdisciplinary Guide on Radiation and Human Space Flight. http://www.nasa.gov/pdf/284273main_Radiation_HS_Mod1.pdf, Acedido em Março 2016.

[18] James E. Turner. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 3 edition, 2007.

[19] Decreto-Lei 222/2008, de 17 de novembro. http://digesto.dre.pt/Digesto//pdf/LEX/316/244774.PDF, Acedido em Abril 2016.

[20] International Basic Safety Standards, GSR Part 3, IAEA (2014), Diretiva Europeia 2013/59/Euratom. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2014:013:FULL&from=EN, Acedido em Abril 2016.

[21] Space Flight Human-System Standard – Volume 1, Revision A: Crew Health, NASA Technical Standard, NASA-STD-3001. Technical report, NASA, 2015.

[22] Agostinelli et. al. Geant4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 506:250–303, 2003.

[23] J. Allison et. al. Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53:270–278, 2006.

[24] SPENVIS, The Space Environment Information System. https://www.spenvis.oma.be, Acedido em Março 2016.

[25] Orbital Elements. http://sat.belastro.net/satelliteorbitdetermination.com/orbit_elements_wiki.htm, Acedido em Abril 2016.

[26] SPENVIS: Trapped particle radiation models. https://www.spenvis.oma.be/help/background/traprad/traprad.html#IMP, Acedido em Abril 2016.

[27] SPENVIS: GCR particle models. https://www.spenvis.oma.be/help/background/traprad/traprad.html#IMP, Acedido em Abril 2016.

[28] Patrícia Gonçalves et. al. The MARSREM Project: Mars Radiation Environment Models and Active Shielding Studies for Interplanetary Missions. *The energetic particle radiation hazard en route to and at Mars*, 2013.

[29] J. Sabino. Radiation environment and effects in human spaceflight: A Lunar Mission. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Novembro 2012.

[30] ROOT: Data Analysis Framework. `https://root.cern.ch/`, Acedido em Abril 2016.