



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ELETROMAGNETISMO PARA DESCREVER
A DINÂMICA DE PARTÍCULAS CARREGADAS NO CAMPO GEOMAGNÉTICO

Número do Processo PIBIC/CNPq/INPE: 137604/2020-3

Vigência: início: 01/09/2020 fim: 31/08/2021

Fernanda da Cruz Prianti

Relatório final de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientada pela
Dra. Lívia Ribeiro Alves.

INPE

São José dos Campos

Agosto de 2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ELETROMAGNETISMO PARA DESCREVER
A DINÂMICA DE PARTÍCULAS CARREGADAS NO CAMPO GEOMAGNÉTICO

Número do Processo PIBIC/CNPq/INPE: 137604/2020-3

Vigência: início: 01/09/2020 fim: 31/08/2021

Fernanda da Cruz Prianti

Relatório final de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientada pela
Dra. Lívia Ribeiro Alves.

INPE

São José dos Campos

Agosto de 2021

RESUMO

Sabe-se que os eventos provenientes do Sol provocam diversas mudanças na magnetosfera, e muitas dessas mudanças ocorrem nos cinturões de Van Allen. A missão Van Allen Probes (VAP) foi composta de duas sondas com objetivo de medir atividades das partículas nesta região, e as informações obtidas por essas sondas possibilitaram diversos estudos que ajudaram a entender o que ocorre nesse ambiente. Neste trabalho, buscou-se estudar a dinâmica de elétrons, bem como, avaliar como a interação Sol-Terra os afetam a partir da análise dos dados provenientes dessa missão. As partículas dentro da magnetosfera sofrem ações constantes da força magnética e da força eletrostática, a união dessas duas forças resulta na força de Lorentz, descrita pela equação $\underline{F} = q(\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B})$. O comportamento das partículas em um campo magnético dipolar pode ser descrito a partir da decomposição de três movimentos fundamentais, sendo eles o movimento de deriva, de repique e o ciclotrônico. Muitas dessas partículas eletricamente carregadas são armadilhadas por um campo magnético na região denominada cinturão de Van Allen. Para iniciar o estudo das forças que interagem com as partículas carregadas na magnetosfera, analisou-se a contribuição das forças magnética e gravitacional para partículas à diferentes distâncias da fonte. Em seguida, utilizando um algoritmo disponibilizado em um artigo, foram gerados gráficos para entender o movimento das partículas nos cinturões, sob diferentes parâmetros como energia, pitch angle e distância. Por fim, foi feita uma análise da relação do fluxo de elétrons no cinturão externo, e de eventos solares do tipo vento solar rápido, utilizando dados do site DONKY e VAP Science Gateway. Uma avaliação comparativa dos resultados iniciais mostrou que a força gravitacional sobre as partículas é desprezível em relação a força magnética, dessa forma, não foi necessário considerá-la nas demais análises. Por essa razão, calculou-se a equação do movimento dos elétrons considerando apenas a dependência eletrodinâmica. Observou-se que a mudança dos parâmetros como posição inicial, pitch angle e energia, fez com que a dinâmica das partículas fosse diferente em relação a sua velocidade e ponto de espelhamento. Por fim, o estudo do fluxo de partículas no cinturão externo mostrou que eventos solares como CMEs e vento solar rápido afetam o fluxo dessas partículas, em especial, notou-se como o vento solar rápido gera um aumento desse fluxo.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Representação simplificada das camadas do Sol. Na figura são identificadas a coroa, a cromosfera e a fotosfera. Além de serem identificadas as zonas convectiva e radioativa.	3
Figura 2.2 - Representação esquemática da espiral de Parker para o campo magnético interplanetário.	4
Figura 2.3 - O painel superior apresenta o diagrama de borboleta da ocorrência das manchas solares em função da latitude. A posição e área das manchas solares é também função do tempo. O painel inferior apresenta o ciclo de evolução das manchas solares.	5
Figura 2.4 - Representação da interação do vento solar (cujo deslocamento é identificado pelas setas amarelas) com a magnetosfera (região delimitada pela magnetopausa e bainha magnética).	6
Figura 2.5 - Diagrama de vetores F , B e v para partículas carregadas positivamente sob a ação de campo magnético uniforme e estático.	9
Figura 2.6 - Imagem ilustrativa da região onde se encontram os Cinturões de Van Allen. Na figura, o cinturão externo está identificado pela cor cinza, o cinturão interno está indicado pela cor vermelha. A região entre os dois cinturões é denominada slot. Ainda, a figura destaca o eixo de rotação da Terra e o eixo de orientação do dipolo magnético.	11
Figura 2.7 - Representação artística das sondas de Van Allen em órbita.	12
Figura 2.8 - Ilustração das linhas de campo magnético dipolar da Terra no sistema de coordenadas GSE. Na Figura a Terra está na origem $[0,0,0]$, e as linhas de campo magnético mostradas correspondentes a $L=3$ a $L=6$	14
Figura 2.9 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV durante 1 dia. No eixo Y é mostrado a localização da partícula a partir do L-Shell, no eixo x indica a data e a legenda no lado direito indica a intensidade do fluxo.	15
Figura 2.10 - Representação do Instrumento REPT	15
Figura 2.11 - Órbita das Sondas Van Allen.	16

Figura 2.12 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV durante 1 mês. No eixo Y é mostrado a localização da partícula a partir do L-Shell, no eixo x indica a data e a legenda no lado direito indica a intensidade do fluxo.	17
Figura 2.13 - Representação do Sistema de coordenadas GEI.	18
Figura 2.14 - Plote da órbita das sondas de Van Allen - GEI - 20/03/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.	18
Figura 2.15 - Plote da órbita das sondas de Van Allen - GEI - 20/12/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.	19
Figura 2.16 - Representação do Sistema de coordenadas GEO.	20
Figura 2.17 - Plote da órbita da sonda de Van Allen - GEO - 09/03/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.	20
Figura 2.18 - Plote da órbita da sonda de Van Allen - GEO - 09/03/2016 - 17:00:00 até 21:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.	21
Figura 2.19 - Representação do Sistema de coordenadas GSE.	22
Figura 2.20 - Plote da órbita da sonda de Van Allen - GSE - 20/11/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.	22
Figura 2.21 - Representação do Sistema GSM.	23
Figura 2.22 - Plote da órbita da sonda de Van Allen - GSM - 09/09/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.	24
Figura 4.1 – Força Gravitacional x Distância.	29
Figura 4.2 - Força Magnética x Distância.	30
Figura 4.3 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	31
Figura 4.4 - Dois prótons com energia de 100 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	32

Figura 4.5 - Dois prótons com energia de 100 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 12 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	33
Figura 4.6 - Dois prótons com energia de 1 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	33
Figura 4.7 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 0° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	34
Figura 4.8 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 10° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	35
Figura 4.9 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 50° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	35
Figura 4.10 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 80° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	36
Figura 4.11 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 90° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	36
Figura 4.12 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (1,5Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (4Re, 0, 0).	37
Figura 4.13 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 70 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (7Re, 0, 0).	37
Figura 4.14 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 40 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (10Re, 0, 0).	38

Figura 4.15 - Pitch Angle x Campo Magnético.....	38
Figura 4.16 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00, 2,30 e 2,85 MeV entre 20/04/2018 e 20/05/2018.....	39
Figura 4.17 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 3,60, 7,15 e 8,80 MeV entre 20/04/2018 e 20/05/2018.....	40
Figura 4.18 – Plote da órbita das sondas de Van Allen – GSM e GSE - 05/05/2018 - 02:00:00 até 11:00:00 UTC.....	41
Figura 4.19 - Plote da órbita das sondas de Van Allen – GEI - 05/05/2018 - 02:00:00 até 11:00:00 UTC.....	42
Figura 4.20 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00, 2,30 e 2,85 MeV entre 15/11/2017 e 15/12/2017.....	42
Figura 4.21 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 3,60, 7,15 e 8,80 MeV entre 15/11/2017 e 15/12/2017.....	43
Figura 4.22 – Plote da órbita das sondas de Van Allen – GSM e GSE - 30/11/2017 - 02:00:00 até 11:00:00 UTC.....	44
Figura 4.23 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV para os anos de 2013 a 2018.....	45
Figura 4.24 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV entre 04/07/2014 e 05/08/2014.....	45
Figura 4.25 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV entre 10/10/2016 e 10/11/2016.....	46
Figura 4.26 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar entre 20/04/2018 e 20/05/2018.....	47
Figura 4.27 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar entre 15/11/2017 e 15/11/2017.....	48
Figura 4.28 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar em 2013.....	48

Figura 4.29 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar em 2014.	49
Figura 4.30 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar em 2017.	50

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Partículas e faixa de energia medida pelos instrumentos HOPE, MagEIS e REPT.	13
Tabela 3.1- Mudanças realizadas no algoritmo para cada Figura.	26
Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados para plotagem dos gráficos.	27

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
RESUMO	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	viii
SUMÁRIO	ix
1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Plano de Desenvolvimento.....	1
2. Revisão de Literatura	3
2.1. Sol.....	3
2.2. Magnetosfera.....	5
2.3. Ionosfera.....	7
2.4. Movimento de Partículas Carregadas Sob Ação de Campo Magnético.....	7
2.5. Cinturões de Van Allen.....	10
2.6. Missão Van Allen Probes.....	11
2.7. Sistemas de Coordenadas Geocêntricas.....	17
3. Metodologia	25
3.1. Cálculo e Plote Para Estudo de Forças Exercidas nas Partículas.....	25
3.2. Plotagem das Figuras com Comportamento das Partículas nos Cinturões de Radiação.....	25
3.3. Obtenção e Geração de Dados Para Análise da Interferência de Eventos Climáticos nos Cinturões.....	26
4. Resultados	29
4.1. Forças Exercidas Sobre uma Partícula na Magnetosfera.....	29
4.2. Movimento de Partículas Carregadas nos Cinturões de Radiação.....	30
4.3. Fluxo das Partículas nos Cinturões de Radiação.....	39
4.3.1. Variabilidade do Fluxo em Função do Vento.....	46
5. Conclusão	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. Introdução

Os eventos provenientes do Sol podem causar diversos impactos no campo magnético da Terra e nos cinturões de Van Allen, que estão situados dentro deste campo. Na região desses cinturões, elétrons e prótons são armadilhados pelo campo magnético. O estudo dessa região é de grande importância para aprimorar a segurança do ambiente espacial para utilização de satélites.

1.1. Objetivos

Esta pesquisa visa entender os conceitos de física básicos para se descrever o comportamento das partículas carregadas nos cinturões de Van Allen e a sua correlação com eventos de clima espacial. Para isso, os seguintes objetivos foram traçados:

- Descrever como se dá a perturbação dos cinturões de radiação devido aos eventos de clima espacial.
- Descrever a dinâmica de partículas carregadas em um campo magnético dipolar e a formação dos cinturões, utilizando as equações do Eletromagnetismo.
- Analisar a variação do fluxo de partículas carregadas utilizando dados da missão Van Allen Probes, associada a eventos de clima espacial, em especial os que são produzidos por vento solar rápido.

1.2. Plano de Desenvolvimento

Para a conclusão dos objetivos propostos acima, um plano de desenvolvimento de 4 etapas foi implementado:

- Introdução ao conceito de interação Sol-Terra: Nessa etapa, foi feito um estudo sobre o Sol, eventos provenientes do Sol e a magnetosfera,
- Estudo da dinâmica de partículas carregadas sob ação de campo magnético: Na segunda etapa, foram revisadas as equações da eletrodinâmica e, como essas descrevem o comportamento das partículas em um campo magnético dipolar.
- Descrição do comportamento das partículas nos cinturões de radiação: Na etapa 3, inicialmente foi feito um estudo sobre os cinturões de radiação e sobre a missão Van Allen Probes, em seguida foi utilizado um algoritmo disponibilizado em

literatura para simular o comportamento das partículas considerando o sistema atuando em uma única partícula.

- Análise de dados de missões espaciais: Nesta etapa, dados de missões espaciais foram obtidos e analisados para estudar a variação do fluxo de partículas e como esse fluxo se alterava devido a eventos solares.

2. Revisão de Literatura

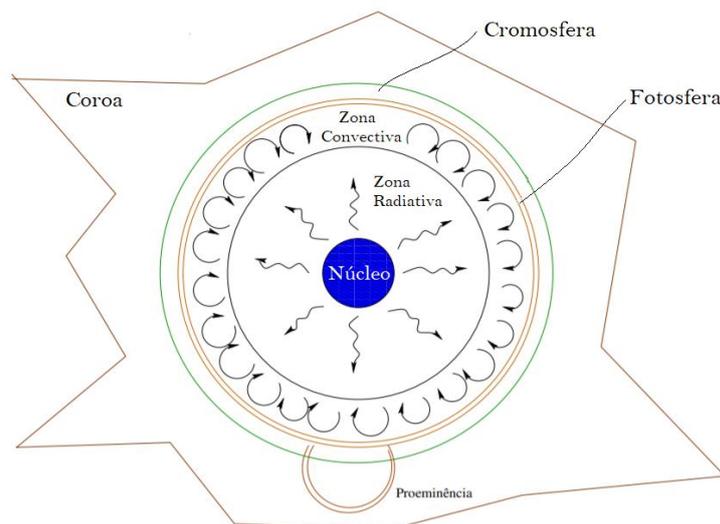
2.1. Sol

O estudo do Sol é de grande importância para a humanidade por ser a estrela central do sistema solar. Formado há mais 4 bilhões de anos, o Sol possui um volume 1.300.000 vezes maior que o da Terra e sozinho representa 99,86% da massa do sistema solar.

Composto essencialmente por hidrogênio e hélio, o Sol é basicamente uma enorme esfera de gás incandescente (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). No seu núcleo ocorrem as reações termonucleares, transformação de quatro núcleos de hidrogênio em um núcleo de hélio – essa reação libera energia e é o que mantém a estrela alimentada (COSTA et. al, 2014).

O Sol pode ser dividido em 6 camadas: o núcleo, a zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera e coroa, como pode ser visto na Figura abaixo.

Figura 2.1 - Representação simplificada das camadas do Sol. Na figura são identificadas a coroa, a cromosfera e a fotosfera. Além de serem identificadas as zonas convectiva e radioativa.



Fonte: Adaptado de Oliveira e Saraiva (2014).

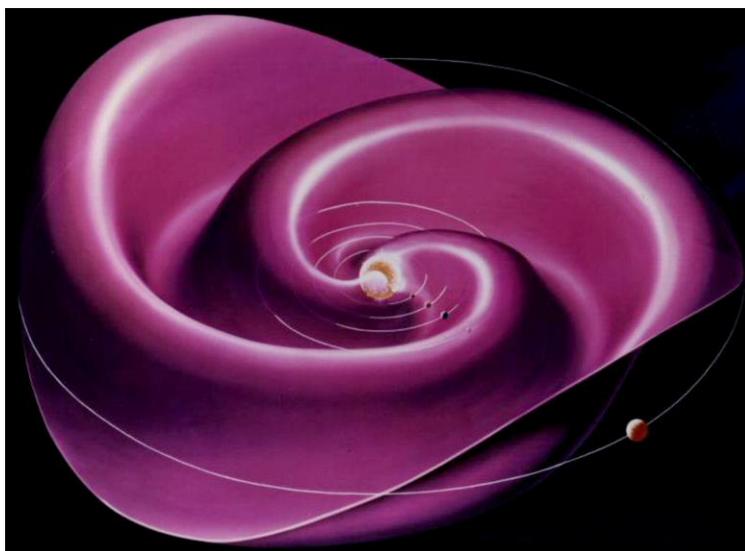
Dentre essas camadas a mais interna é o núcleo solar que possui uma temperatura acima de 10^6K , onde ocorrem as reações termonucleares. A zona de radiação é o local onde ocorre a transferência de calor dessas reações via radiação térmica; após essa camada há a zona convectiva e, em seguida, há a fotosfera, que é a camada visível do Sol. A

penúltima camada é a cromosfera, que é a camada visível durante eclipses; e a última é a coroa, com uma extensão de aproximadamente dois raios solares (COSTA et. al, 2014).

Por conta da fusão termonuclear e da diferença de pressão entre a força gravitacional do Sol e a gravidade da coroa solar, é expelido um plasma chamado vento solar. O vento solar pode ser denominado vento solar rápido, que são provenientes dos buracos coronais e podem atingir velocidades de até cerca de 900 km/s. E vento solar lento ou nominal, que é originado em regiões de baixas latitudes, e pode atingir velocidades de 300 km/s – o mais comum deles é o vento solar lento (COSTA et. al, 2014).

Assim como o planeta Terra, o Sol possui um campo magnético que é gerado no seu interior por um sistema de dínamo. Pelo fato de a coroa solar ser constituída por um plasma altamente condutor, as linhas do campo magnético que tem origem no Sol podem ser transportadas por grandes distâncias. Esse fenômeno é conhecido como “congelamento das linhas de campo magnético” e dá origem ao campo magnético interplanetário. Devido ao movimento de rotação do Sol e ao transporte do vento solar, esse campo possui uma forma espiralada, chamada espiral de Parker, como mostrado na Figura 2.2 (COSTA et. al, 2014).

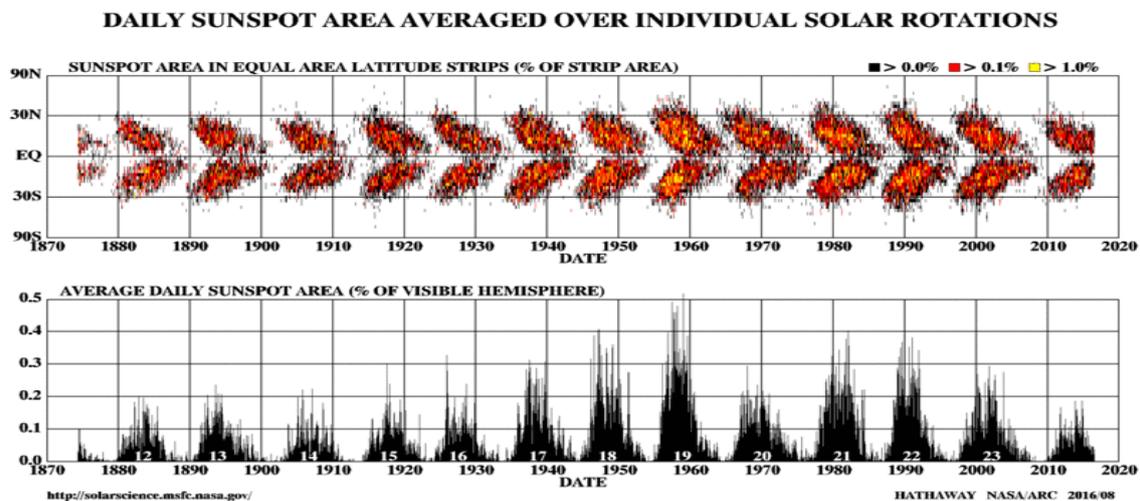
Figura 2.2 - Representação esquemática da espiral de Parker para o campo magnético interplanetário.



Fonte: Costa et. al, 2014.

Nas proximidades do disco solar, a dinâmica do plasma causa torções nas linhas do campo magnético, aumentando sua concentração em algumas regiões e inibindo a convecção, o que gera as manchas solares. O número de manchas solares têm uma variação em ciclos de aproximadamente 11 anos, e sua ocorrência apresenta máximos e mínimos. No período de mínimo, observa-se que a ocorrência das manchas é maior em maiores latitudes e, conforme se aproxima do máximo, migra para em direção ao equador como pode ser visto na Figura 2.3 (MENDONÇA, 2015).

Figura 2.3 - O painel superior apresenta o diagrama de borboleta da ocorrência das manchas solares em função da latitude. A posição e área das manchas solares é também função do tempo. O painel inferior apresenta o ciclo de evolução das manchas solares.



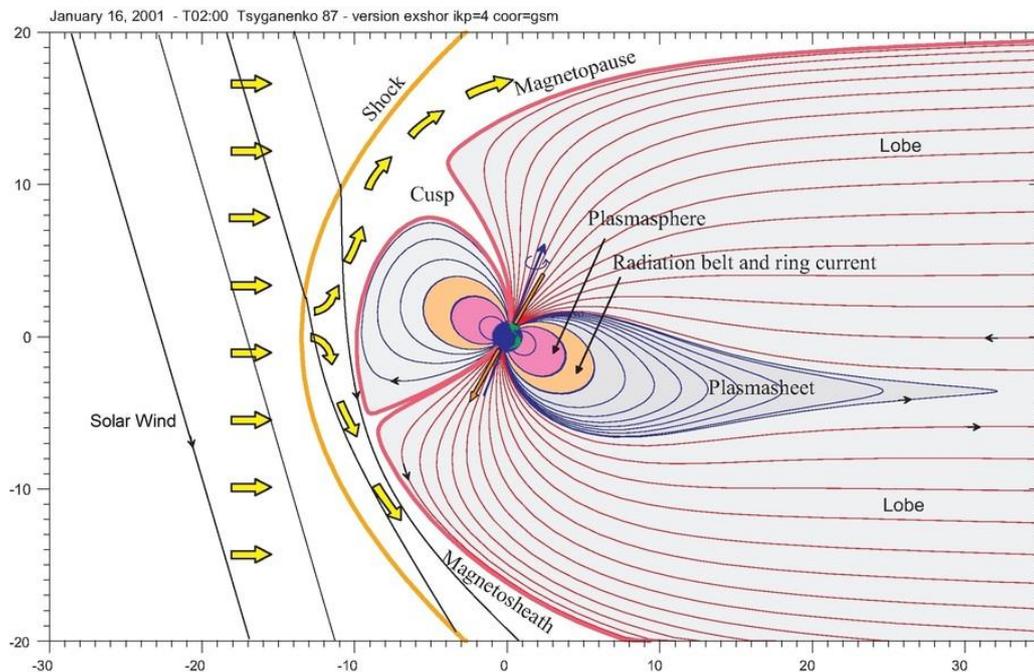
Fonte: Portal Wikipédia. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Mancha_solar

2.2. Magnetosfera

O vento solar se desloca pelo sistema solar e se choca com a camada mais externa da magnetosfera, que é o espaço envoltório da Terra. Esse espaço é controlado pelo campo magnético terrestre, também conhecido como campo geomagnético, esse campo é gerado por correntes que fluem no interior do planeta (COSTA et. al., 2014).

A magnetosfera possui o lado diurno, que é iluminado pelo sol e está representado no lado esquerdo da Figura 2.4 onde as linhas do campo magnético são comprimidas por conta do arraste do vento solar, enquanto no lado noturno as linhas são esticadas formando a cauda magnética (SOUZA et. al., 2017).

Figura 2.4 - Representação da interação do vento solar (cujo deslocamento é identificado pelas setas amarelas) com a magnetosfera (região delimitada pela magnetopausa e bainha magnética).



Fonte: Laboratoire de Physique des Plasmas.

Disponível em: <https://www.lpp.polytechnique.fr/The-Magnetopause-of-Earth?lang=en>

O plasma transportado pelo vento solar, representado pelas setas em amarelo na Figura 2.4, não é capaz de penetrar no campo geomagnético, identificado pelas linhas em vermelho. Devido a diminuição brusca de velocidade do vento solar ao atingir a magnetosfera, observa-se uma onda de choque (denominada frente de choque da magnetosfera). A partir desse choque o vento solar é desacelerado e flui em torno da magnetosfera na bainha magnética, região caracterizada por forte turbulência (SARMIENTO, 2018).

A magnetopausa é a região que separa o campo geomagnético e o campo magnético interplanetário. Nessa região também ocorre a reconexão magnética, que é um processo de acoplamento entre a magnetosfera e o vento solar, em que as linhas de campo são rearranjadas e a energia magnética é convertida em energia cinética e térmica, permitindo a entrada de partículas provenientes do vento solar na magnetosfera (COSTA et. al, 2014). Dentro da magnetosfera, as partículas carregadas que foram transportadas pelo vento solar experimentam a ação do campo geomagnético e do campo elétrico, dessa

forma se observam fluxos de correntes elétricas que atuam diretamente na atividade geomagnética. Os sistemas de corrente elétrica com impactos mais significativos na atividade geomagnética são as correntes de Chapman-Ferraro e a anelar (SARMIENTO, 2018).

As correntes de Chapman-Ferraro são resultado da compressão da magnetosfera no lado diurno, causado pela pressão do do vento solar, que quando aumentada intensifica as correntes dessa região. A corrente anelar, por sua vez, flui de leste a oeste e se desenvolve ao redor do planeta, ela é aumentada devido a chegada de uma estrutura do vento solar com capacidade para gerar uma tempestade magnética, decorrente dessa interação (SARMIENTO, 2018).

2.3. Ionosfera

Gases na atmosfera absorvem radiação eletromagnética provenientes do Sol. Essas partículas são ionizadas e formam a ionosfera, uma camada de plasma ionizado. Os limites dessa região podem variar muito, sendo que o limite inferior chega a aproximadamente 60 km de altitude e o limite superior pode chegar até à zona de interação entre o campo geomagnético e o campo magnético interplanetário. A ionosfera pode ser dividida em regiões, sendo elas D, E, F1 e F2. Essa divisão ocorre por conta da diferença dos elementos químicos presentes em cada região da atmosfera neutra e pelos diferentes comprimentos de onda da radiação solar absorvidos (SARMIENTO, 2018). A radiação solar não atua diretamente na parte noturna da ionosfera, o que implica na diminuição da ionização das partículas. Dessa forma, apenas duas camadas permanecem, a região F, que é a junção das regiões F1 e F2 e a região E.

2.4. Movimento de Partículas Carregadas Sob Ação de Campo Magnético

As partículas na magnetosfera estão sobre ação constante do campo magnético da Terra e quase não interagem entre si, pois o plasma magnetosférico é considerado não-colisional, logo os movimentos dessas partículas podem ser tratados de forma independente (SILVA, 2018).

A força magnética exercida sobre uma partícula carregada em movimento na presença de um campo magnético, é dado por:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

$$F_B = |q|vB\text{sen}(\theta) \quad (2.2)$$

Em que q é a carga da partícula e θ é o ângulo entre a velocidade da partícula v e o campo magnético B , esse ângulo é conhecido como pitch angle (PA). Logo, quando v e B são paralelos ($\theta = 0^\circ$) ou antiparalelos ($\theta = 180^\circ$) a força é nula, e quando v e B são perpendiculares ($\theta = 90^\circ$) F_B é máximo. Essa condição está diretamente associada à condição de armadilhamento das partículas carregadas.

Além da força magnética, a partícula também recebe a ação de uma força eletrostática \underline{F}_E , proveniente de um campo elétrico E , essa força é dada por:

$$\vec{F}_E = q \cdot \vec{E} \quad (2.3)$$

Logo, a força exercida em uma partícula na presença de um campo magnético e um campo elétrico é dada pela Equação de Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

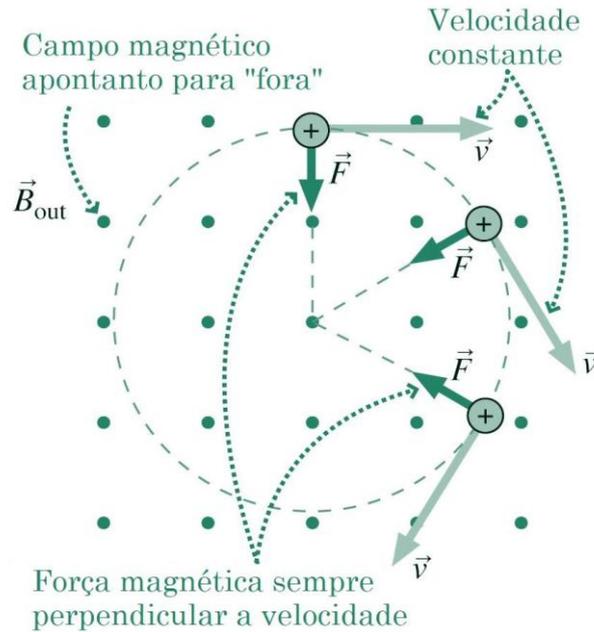
Reescrevendo a segunda lei de Newton ($\vec{F} = m\vec{a}$) como $F = m \cdot \frac{dv}{dt}$, é possível substituir a primeira parte da Equação 2.4 para encontrar a posição dessa partícula:

$$\frac{d(vm\gamma)}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.5)$$

A Equação 2.5 é denominada Equação de Newton-Lorentz. Nessa equação foi adicionado fator relativístico, dado por $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, pois a equação trata de partículas com velocidades relativísticas.

Supondo uma partícula carregada positivamente na presença de um campo magnético perpendicular à velocidade da partícula, essa partícula realiza um movimento circular devido a força magnética central, como pode ser visto na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Diagrama de vetores F , B e v para partículas carregadas positivamente sob a ação de campo magnético uniforme e estático.



Fonte: Adaptado de University of Louisville Department of Physics.

Disponível em: http://www.physics.louisville.edu/cldavis/phys299/notes/mag_force_charge.html

É possível determinar os parâmetros que caracterizam o movimento dessa partícula a partir da Equação 2.2 e da segunda lei de Newton ($\underline{F} = m\underline{a}$) aplicada ao movimento

circular, onde $a = \frac{v^2}{r}$, dessa forma, a Equação 2.2 é reescrita como:

$$|q|vB = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (2.6)$$

Isolando r , o raio da trajetória dado por:

$$r = \frac{mv}{|q|B} \quad (2.6)$$

O tempo necessário para completar uma revolução é dado pelo período e substituindo o raio pela Equação 2.5, o período desse movimento pode ser descrito como:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{|q|B} = \frac{2\pi m}{|q|B} \quad (2.7)$$

A frequência do movimento é dada por:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{|q|B}{2\pi m} \quad (2.8)$$

E a frequência angular, também chamada de girofrequência, é dada por:

$$\omega = 2\pi f = \frac{|q|B}{m} \quad (2.9)$$

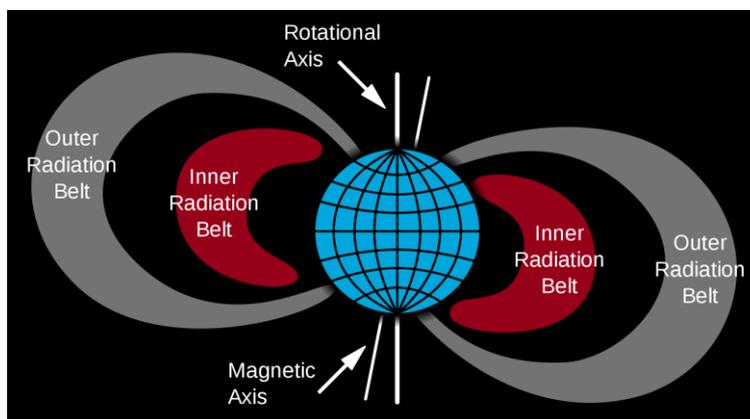
Considerando que o problema a ser abordado se refere a uma partícula carregada sob ação do campo magnético da Terra, será usado a aproximação de campo dipolar dado pela seguinte Equação.

$$\vec{B} = -\frac{B_0 R_e^3}{r^5} [3xz\hat{x} + 3yz\hat{y} + (2z^2 - x^2 - y^2)\hat{z}] \quad (2.10)$$

2.5. Cinturões de Van Allen

Descoberto por James Van Allen em 1958, o cinturão de radiação é uma região dentro da magnetosfera onde partículas eletricamente carregadas são aprisionadas por um campo magnético. O cinturão de Van Allen pode ser dividido em duas partes sendo elas o cinturão de radiação interno e externo. Entre essas duas partes há uma região que as separam denominada slot, onde há uma densidade menor de partículas carregadas de alta energia (LI; HUDSON, 2018).

Figura 2.6 - Imagem ilustrativa da região onde se encontram os Cinturões de Van Allen. Na figura, o cinturão externo está identificado pela cor cinza, o cinturão interno está indicado pela cor vermelha. A região entre os dois cinturões é denominada slot. Ainda, a figura destaca o eixo de rotação da Terra e o eixo de orientação do dipolo magnético.



Fonte: Portal Wikipédia.

Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt#/media/File:Van_Allen_radiation_belt.svg>

O cinturão de radiação interno se estende por uma altitude de aproximadamente 1.5 a 2 raios terrestres (R_e) e é constituído por prótons com energias entre 1 MeV até 100 MeV que tem como principal origem o vento solar (SILVA, 2018).

Já o cinturão mais externo está localizado entre 3 e 7 R_e , este é constituído principalmente por elétrons de baixa energia, relativísticos e ultra relativísticos, com energia de 100 keV a 10 MeV, cujas fontes são o vento solar e a ionosfera (SILVA, 2018).

O cinturão interno é substancialmente mais estável que o externo. Enquanto no cinturão interno as variações significativas no fluxo ocorrem em escalas de anos ou no decorrer de atividades geomagnéticas intensas, no cinturão externo essas variações ocorrem em escalas de minutos a anos (SILVA, 2018).

2.6. Missão Van Allen Probes

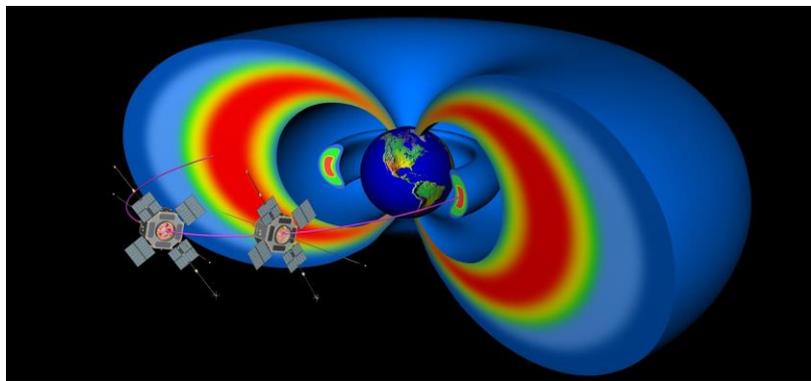
A missão Van Allen Probes (VAP) faz parte do programa Living With a Star da Nasa e foi projetada a fim de entender melhor o que ocorre no ambiente onde os cinturões de radiação estão situados. Compreender o comportamento dessa área é de grande

importância para a operação de satélites, planejamento de missões, desenvolvimento de satélites e segurança dos astronautas.

Os principais objetivos dessa missão foram: descobrir quais processos aceleram e transportam os elétrons e íons nos cinturões e, em quais condições; e entender o que causa a perda de elétrons nesta região.

A missão foi composta por duas sondas idênticas que foram lançadas no dia 30 de agosto de 2012. Projetadas para operarem por dois anos, as sondas operaram por volta de 7 anos. Durante esse período as sondas orbitaram os cinturões de Van Allen com uma altitude de perigeu de aproximadamente 500 km e apogeu 30600 km, como pode ser visto na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Representação artística das sondas de Van Allen em órbita.



Fonte: Van Allen Probes.

Disponível em: <http://vanallenprobes.jhuapl.edu/Multimedia/Images.php>

Cada satélite da missão é composto por vários instrumentos que são utilizados para realizar 5 experimentos diferentes, sendo eles:

- Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma Suite (ECT): Responsável por medir as partículas de radiação próximas a Terra para entender os processos físicos que controlam a aceleração, distribuição e variabilidade dos elétrons dos cinturões;
- Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS): Instrumento que teve a missão de investigar o papel do campo magnético e das ondas de plasma no processo de aceleração e perda de partículas no cinturão;
- Electric Field and Waves Suite (EFW): Com a função de estudar o campo elétrico próximo a Terra que energiza as partículas de radiação e modificam a estrutura da magnetosfera interna;

- Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment (RBSPICE): Programado para determinar como o clima espacial gera a corrente anelar em torno da Terra e determinar como essa corrente fornece a criação de populações de radiação;
- Relativistic Proton Spectrometer (RPS): Responsável por medir a energia entre 50 MeV e 2 GeV dos prótons no cinturão interno para desenvolver um novo modelo de radiação padrão para o projeto de espaçonaves no futuro.

As informações os instrumentos acima podem ser encontrados no site da Missão Van Allen Probes, disponível no site ([Van Allen Probes: Spacecraft \(jhuapl.edu\)](http://VanAllenProbes.Spacecraft.jhuapl.edu)).

O instrumento denominado ECT é composto por três tipos de detectores, sendo eles, HOPE, MagEIS e o REPT. O instrumento HOPE foi responsável por medir o fluxo de elétrons, prótons, hélio e oxigênio. O MagEIS mede o fluxo de elétrons e prótons (SILVA, 2018). Por fim, o REPT tinha como função medir o fluxo de elétrons e prótons relativísticos e ultra-relativísticos. Na Tabela 2.1 é mostrado as partículas e a faixa de energia que cada instrumento mede.

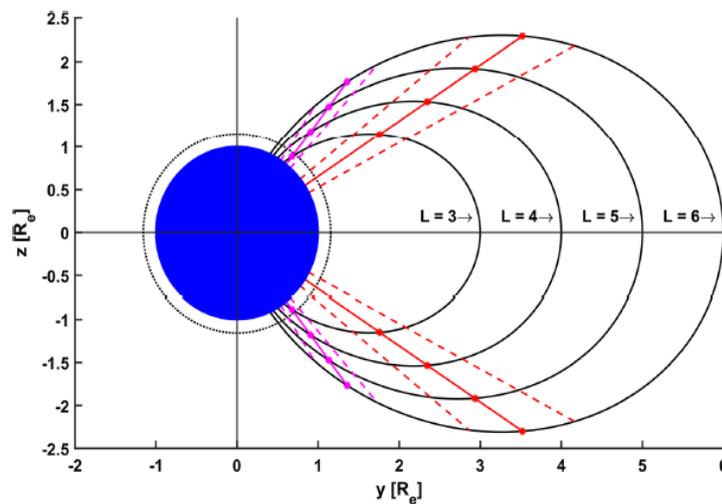
Tabela 2.1 – Partículas e faixa de energia medida pelos instrumentos HOPE, MagEIS e REPT.

Instrumento	Partícula	Faixa de Energia (eV)
HOPE	Elétrons	15 a 50 k
	Prótons	1 a 50 k
	Hélio	1 a 50 k
	Oxigênio	1 a 50 k
MagEIS	Elétrons	33 k a 4 M
	Prótons	58 k a 1,2 M
REPT	Elétrons	2 M a 60 M
	Prótons	20 M a 115 M

Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](http://SCIENCE_GATEWAY:OVERVIEW|VanAllenProbesScienceGateway(jhuapl.edu))>

Neste trabalho serão discutidos dados provenientes do REPT. Como foi visto acima, este instrumento é capaz de medir o fluxo de elétrons em função da energia e do pitch angle. Com os dados provenientes deste instrumento pode-se gerar gráficos que possibilitam a visualização da população de partículas, para um intervalo de tempo, em cada L-Shell - sistema de coordenada dipolar (B-L) calculado em função da distância radial em raios terrestres, que representa uma casca definida por uma linha de campo de um campo magnético dipolar, que no equador vai estar a uma distância proporcional a R (raios terrestres). A Figura 2.8 mostra uma ilustração das camadas definidas a partir da coordenada L.

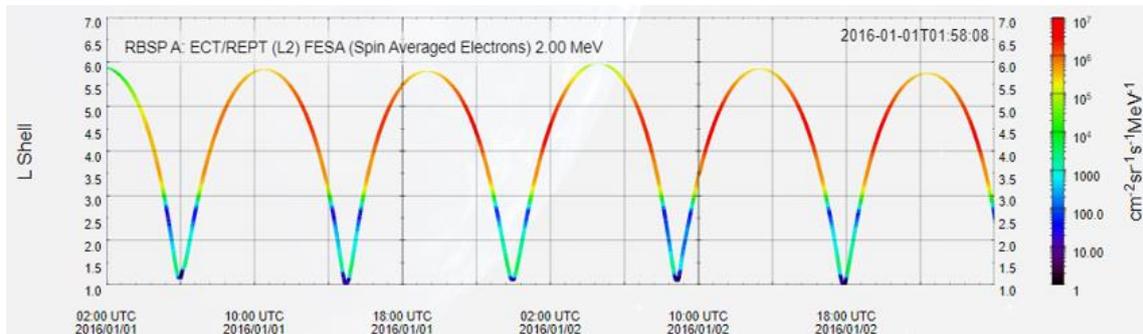
Figura 2.8 - Ilustração das linhas de campo magnético dipolar da Terra no sistema de coordenadas GSE. Na Figura a Terra está na origem [0,0,0], e as linhas de campo magnético mostradas correspondentes a L=3 a L=6.



Fonte: SONI, Pankaj K.

No gráfico da Figura 2.9, o eixo x é a medida do tempo em hora, dia, mês e ano com precisão de um segundo em que o dado foi medido e no eixo y está qual L a sonda orbitava quando captou o fluxo.

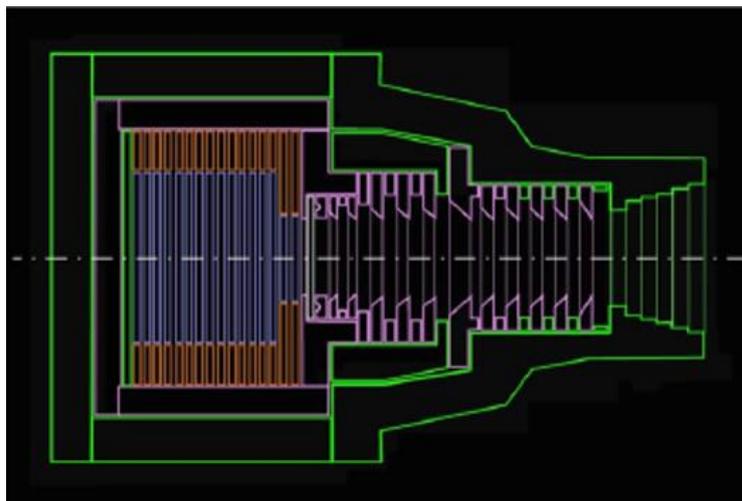
Figura 2.9 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV durante 1 dia. No eixo Y é mostrado a localização da partícula a partir do L-Shell, no eixo x indica a data e a legenda no lado direito indica a intensidade do fluxo.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](http://www.vanallenprobes.org/ScienceGateway/Overview)>

Também é possível ver no lado direito da Figura 2.9 uma escala que representa o fluxo de partículas medido na unidade de centímetro quadrado, por esferorradiano, por segundo, por mega elétron volt. Essa unidade representa a quantidade de partículas com uma dada energia que são medidas no coletor do instrumento, que por sua vez, tem um ângulo sólido (medido pela unidade esferorradiano) por conta do formato de cone deste medidor, como pode ser visto no lado direito da Figura 2.10.

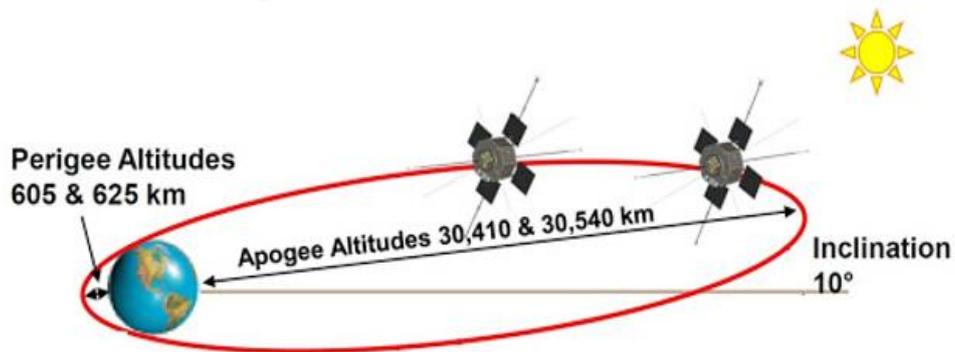
Figura 2.10 - Representação do Instrumento REPT



Fonte: BAKER, Daniel N. et al.

O formato periódico no gráfico da Figura 2.9 é devido a forma que a medida de fluxo é feita, isto é, ao longo da órbita do satélite. Assim, cada ciclo representa uma volta completa em torno da Terra. Como pode ser visto na imagem abaixo, as sondas passam pelo perigeu, que corresponde aproximadamente ao $L = 1$ na Figura 2.9 (aproximadamente 620 km de distância) e depois se deslocam até o apogeu (aproximadamente 30.000 km), que corresponde aproximadamente ao $L = 6$.

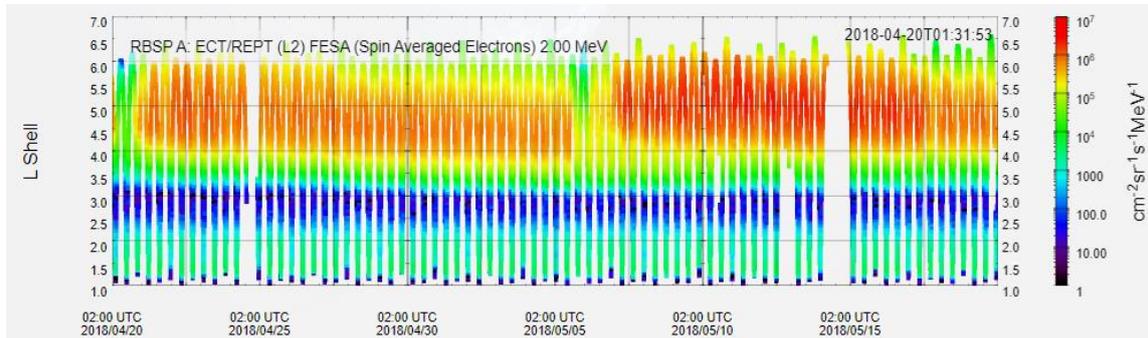
Figura 2.11 - Órbita das Sondas Van Allen.



Fonte: [Mission Design & Timeline – RBSP – Van Allen Probes \(spaceflight101.com\)](http://spaceflight101.com)

Dessa forma, é possível medir o fluxo de elétrons por camada no sistema de coordenadas B-L. Na Figura 2.12 é apresentado o fluxo para o período de 1 mês, é possível notar um fluxo maior entre $L = 4$ e $L = 6$, área do cinturão externo. Entre $L = 3,5$ e $L = 4$ há um fluxo muito baixo, essa área representa o slot entre os cinturões de radiação. E entre $L = 1,5$ e $L = 2,5$ tem-se um fluxo maior que no slot e menor que no cinturão externo, como esperado, visto que no cinturão interno é constituído majoritariamente por prótons. Os valores observados variam com o tempo e eventos como vento solar de alta velocidade e ejeção de massa coronal (CME) podem gerar grandes impactos no fluxo causando aumento ou perda de partículas.

Figura 2.12 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV durante 1 mês. No eixo Y é mostrado a localização da partícula a partir do L-Shell, no eixo x indica a data e a legenda no lado direito indica a intensidade do fluxo.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway](https://science.gateways.edu/overviews/van-allen-probes-science-gateway)
(jhuapl.edu)>

2.7. Sistemas de Coordenadas Geocêntricas

Para estudo de dados como os provenientes das Sondas de Van Allen é necessário a utilização de sistemas de coordenadas. Existe uma variedade de sistemas de coordenadas para estudos relacionados à relação entre o Sol e a Terra.

Esses sistemas podem ser utilizados para exibir a trajetória de satélites, localização de limites e vetor de medição de campo e muitas outras funções.

Diferentes processos físicos, dados e experimentos necessitam de sistemas diferentes para serem estudados, por isso a necessidade de se ter diversos sistemas e de haver formas de transformação entre um e outro.

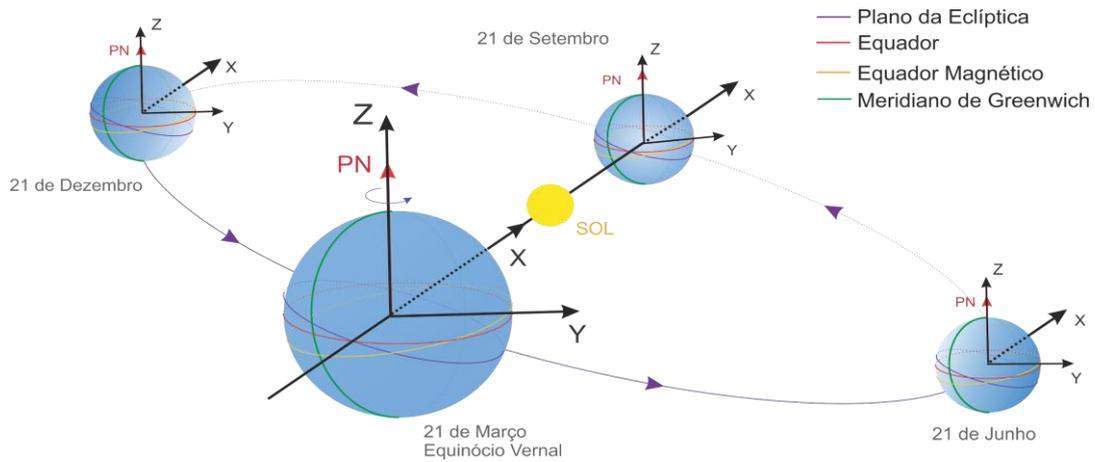
Na física espacial, os sistemas de coordenadas principais são:

- Sistema Equatorial de Coordenadas (GEI)

O GEI é um sistema usando comumente em astronomia e cálculo de órbita de satélites.

Esse sistema tem seu eixo X aponta da Terra para o Sol quando o Sol está na posição do equinócio Vernal. Esta direção é a intersecção entre o plano Equatorial e o plano da Eclíptica, dessa forma o eixo X paralelo a ambos os planos. O eixo Y é paralelo ao eixo de rotação da Terra e o eixo Z completa o conjunto ortogonal. Na figura 2.13 é possível ver uma exemplificação desse sistema.

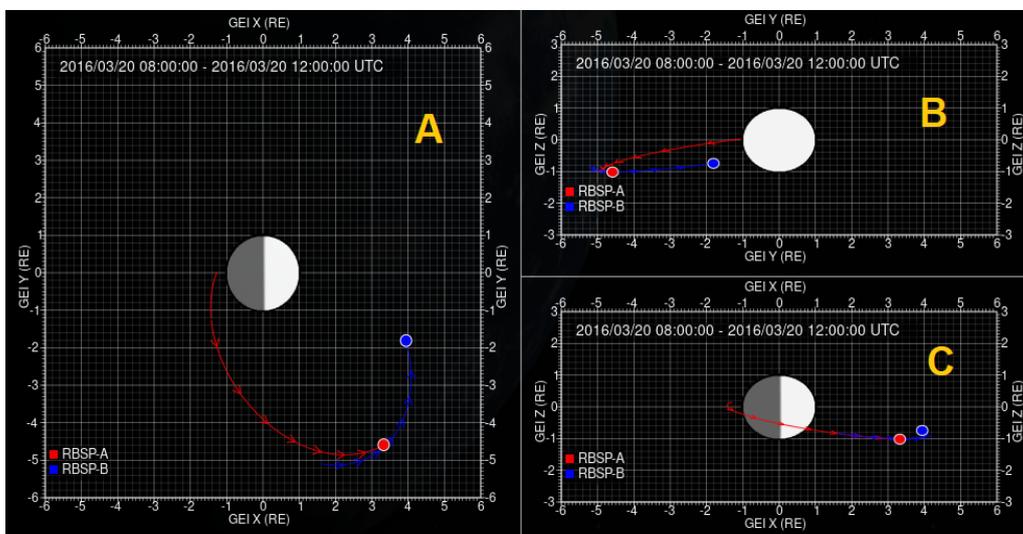
Figura 2.13 - Representação do Sistema de coordenadas GEI.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 2.14 mostra a órbita das sondas de Van Allen a partir do sistema GEI. O círculo no centro representa a Terra, a parte em branco representa o lado diurno e a parte cinza o lado noturno. No painel B a Terra está sendo vista a partir do eixo X, e está totalmente iluminada, isso ocorre, pois, esse gráfico é referente ao dia 20 de março. Como pode ser observado na Figura 2.13, nessa data o eixo X está apontando para o Sol.

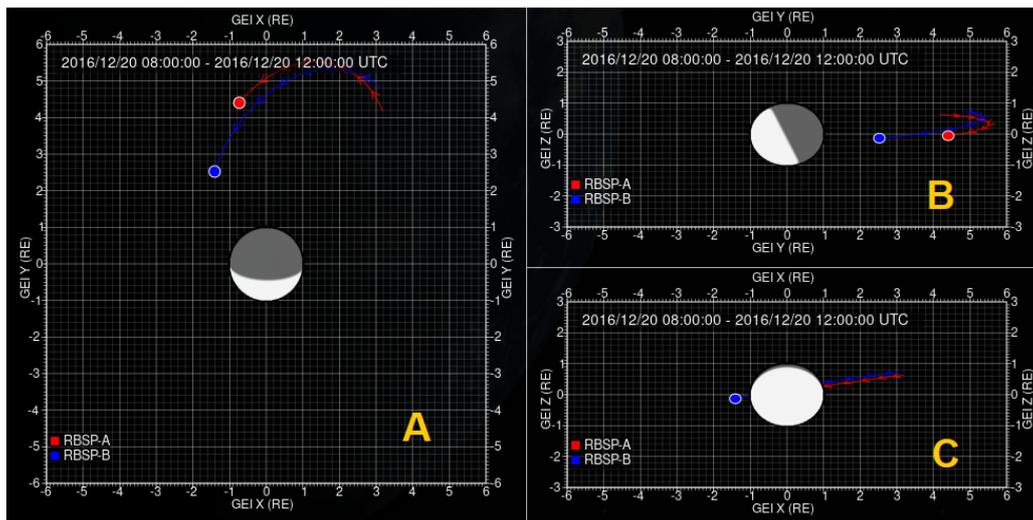
Figura 2.14 - Plote da órbita das sondas de Van Allen - GEI - 20/03/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://science.gateway.edu/overviews/van-allen-probes-science-gateway)>

Na Figura 2.15 a data de observação foi mudada para o dia 20 de dezembro. Como pode ser visto na Figura 2.13, nessa data o eixo Y aponta diretamente para o Sol, como pode ser visto no painel C da Figura abaixo. E no painel B metade da Terra está iluminada e a outra metade não está, novamente isso pode ser entendido a partir da observação da Figura 2.13, pois nessa data o eixo X está na posição 06 UTC (amanhecer).

Figura 2.15 - Plote da órbita das sondas de Van Allen - GEI - 20/12/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.



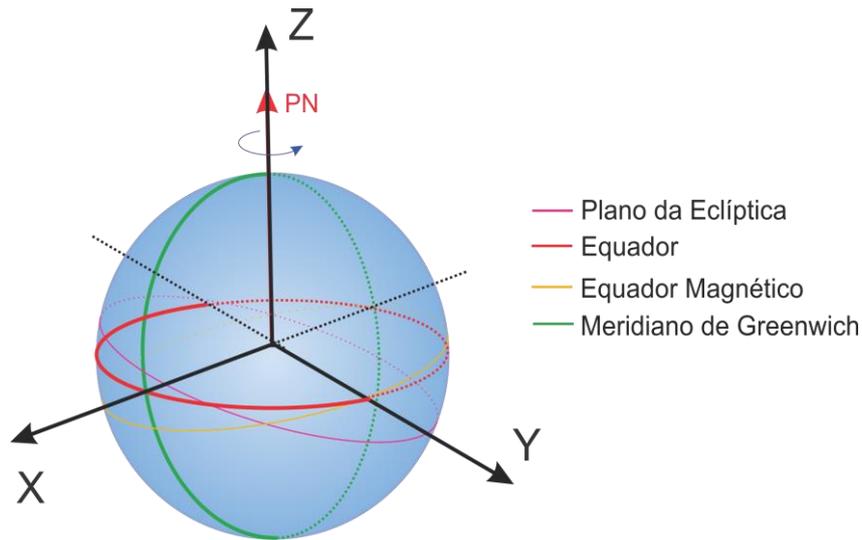
Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://science.gateways.edu/overviews/van-allen-probes-science-gateway)>

- Sistema de Coordenadas Geográficas (GEO)

O GEO pode ser usado para descrever a posição de qualquer ponto na superfície terrestre, definir posições de observatórios no solo e de estações de transmissão e recepção.

Nesse sistema o eixo X é paralelo ao plano do equador e aponta para o Meridiano de Greenwich. O eixo Z coincide com o eixo de rotação da Terra e o eixo Y completa o conjunto ortogonal.

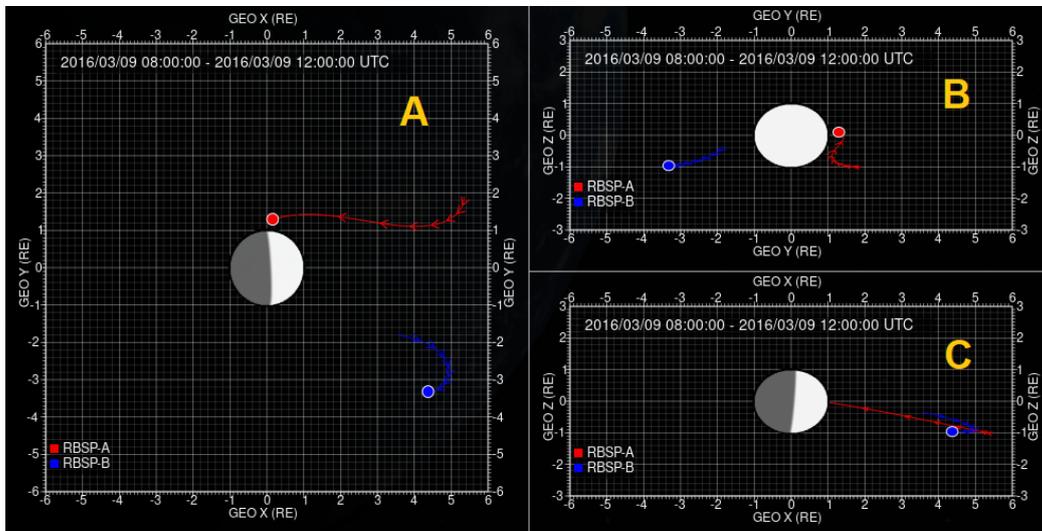
Figura 2.16 - Representação do Sistema de coordenadas GEO.



Fonte: Produção da autora.

Na Figura 2.16, é possível observar as sondas a partir do sistema de coordenadas GEO. No painel B o eixo X está apontando para o lado amanhecer, isso é por conta do horário do plote, 12:00:00 UTC, nesse horário o Meridiano de Greenwich está apontando diretamente para o Sol.

Figura 2.17 - Plote da órbita da sonda de Van Allen - GEO - 09/03/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.

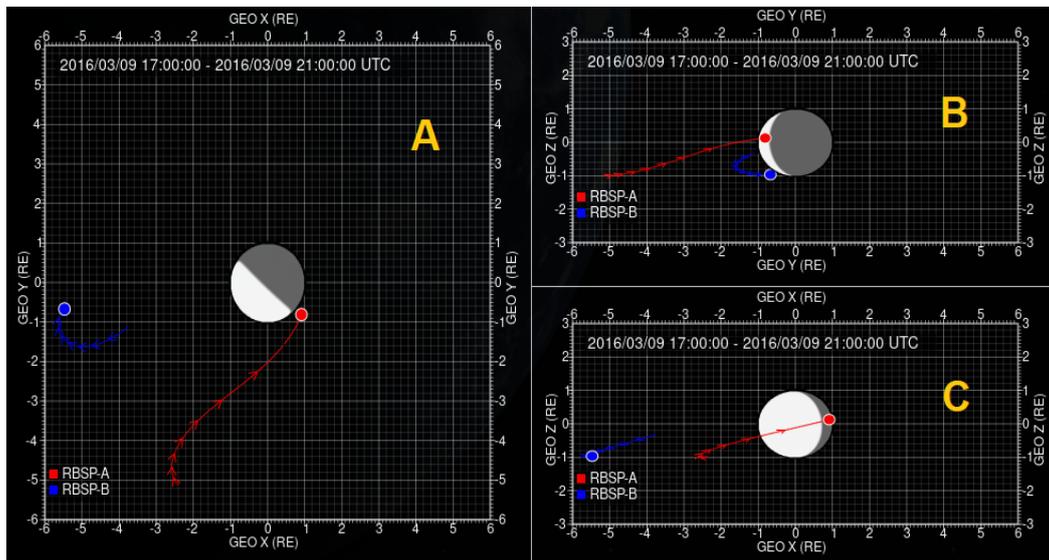


Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://sciencegateway.org/overview/van-allen-probes-science-gateway)>

Na Figura 2.17 o horário foi alterado para 21:00:00 UTC, assim é possível ver que no plano YZ o eixo X não está mais na direção do Sol.

Nas Figuras 2.17 e 2.18 também é possível observar que a trajetória das sondas não fica muito bem representadas nesse sistema de coordenadas.

Figura 2.18 - Plote da órbita da sonda de Van Allen - GEO - 09/03/2016 - 17:00:00 até 21:00:00 UTC - Pannel A: eixos XY, pannel B: eixos YZ, pannel C: eixos XZ.



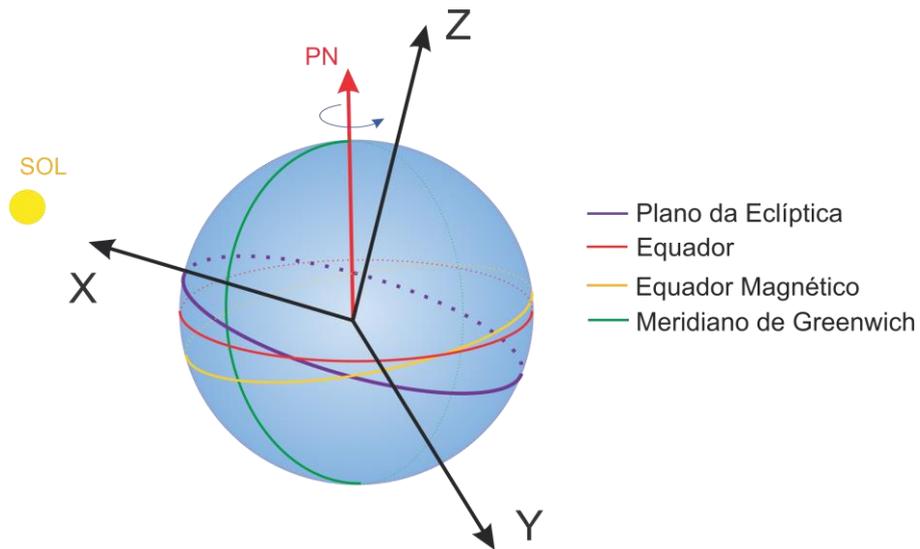
Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://science.nasa.gov/science-gateways/van-allen-probes-science-gateway/)>

- Sistema Eclíptico de Coordenadas (GSE ou SE)

Este sistema tem sido usado para exibir trajetórias de satélites, observações de campo magnético interplanetário e dados de velocidade do vento solar.

O eixo X do GSE é paralelo ao plano da Eclíptica e aponta sempre para o Sol. Seu eixo Z é perpendicular ao plano da Eclíptica, e o eixo Y completa o conjunto ortogonal e aponta para o lado para 0,18 UTC.

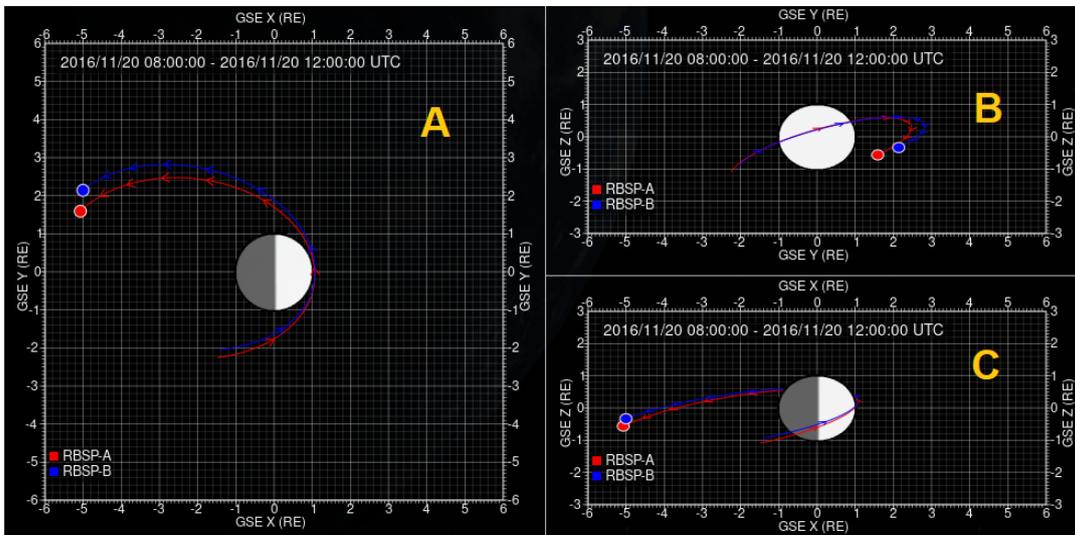
Figura 2.19 - Representação do Sistema de coordenadas GSE.



Fonte: Produção da autora.

No sistema de coordenadas GSE o eixo X está sempre fixo apontando para o Sol e os demais eixos também são fixos. Logo, não há mudança na visualização quanto ao sentido do Sol.

Figura 2.20 - Plote da órbita da sonda de Van Allen - GSE - 20/11/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Painel A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.



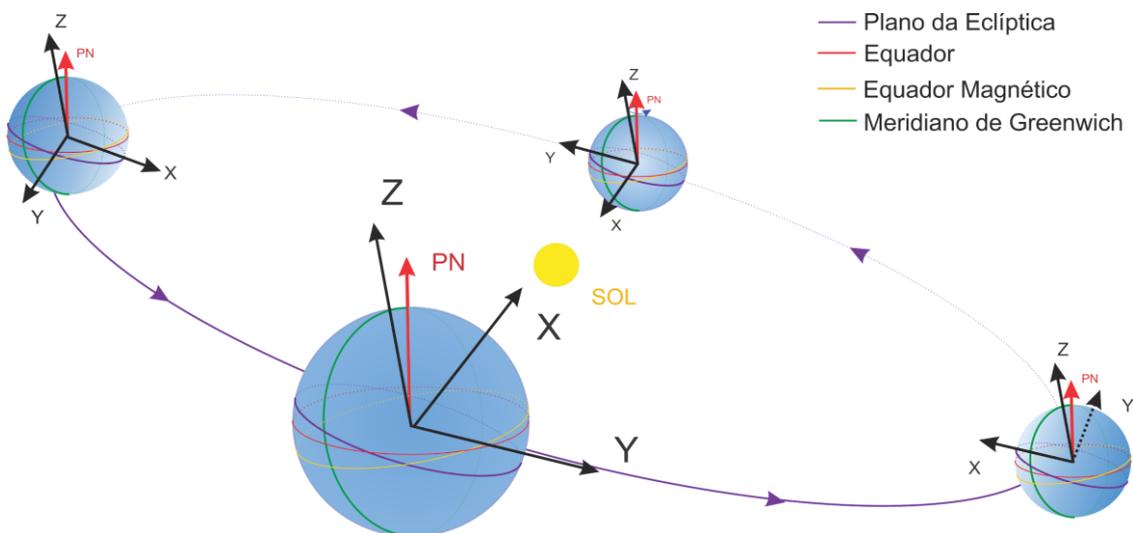
Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://science.gateway.edu/overviews/van-allen-probes-science-gateway)>

- Sistema de Coordenadas Solar Magnetosférico (GSM)

Este sistema é útil para exibir as posições da magnetopausa e do limite de choque, campos magnéticos da bainha magnética e da magneto-cauda e velocidades do vento solar na bainha magnética.

Nesse sistema, o eixo X é paralelo ao plano do equador magnético e está sempre apontando para o Sol. O eixo Y é perpendicular ao plano do equador magnético. O eixo Z completa o conjunto ortogonal e aponta para o lado anoitecer.

Figura 2.21 - Representação do Sistema GSM.

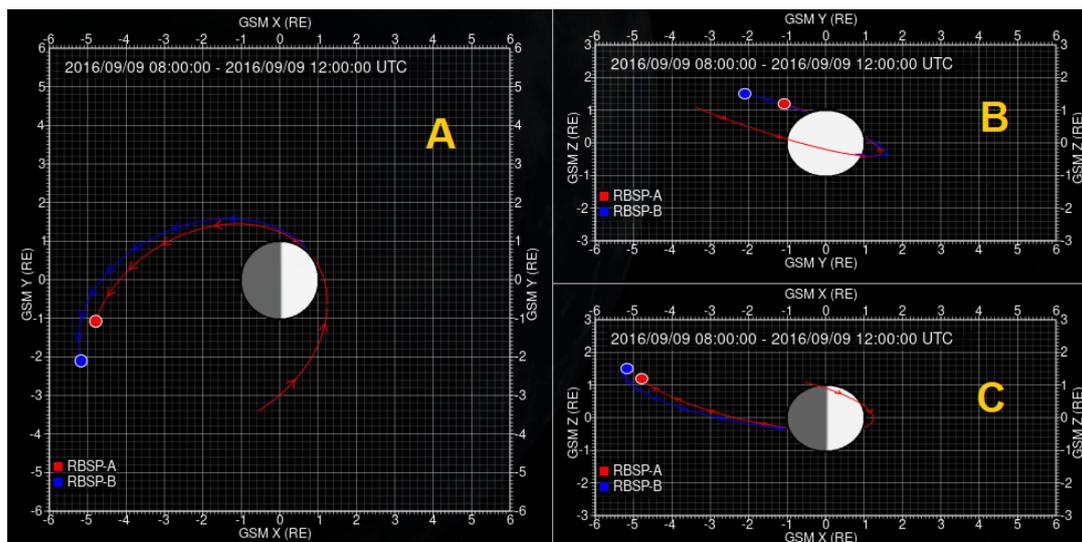


Fonte: Produção da autora.

O sistema de coordenadas GSM é muito similar ao GSE, com o eixo X fixo no Sol. A diferença entre esses sistemas está no fato de no GSM o eixo X é paralelo ao plano do equador magnético enquanto no GSE é paralelo ao plano da Eclíptica.

Dessa forma, os plotes desse sistema também são bem similares aos plotes do sistema GSE. Na Figura 2.22 é possível ver a semelhança.

Figura 2.22 - Plote da órbita da sonda de Van Allen - GSM - 09/09/2016 - 08:00:00 até 12:00:00 UTC - Paineis A: eixos XY, painel B: eixos YZ, painel C: eixos XZ.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://www.jhuapl.edu/VanAllenProbesScienceGateway)>

3. Metodologia

3.1. Cálculo e Plote Para Estudo de Forças Exercidas nas Partículas

Para compreender a diferença da força exercida pelo campo magnético e pela gravidade da Terra, foi calculado a força gravitacional exercida em um elétron a partir da equação $F_g = (G \cdot m_1 \cdot m_2)/d^2$, para distâncias de 1 até 10 Re, e esses valores foram plotados em um gráfico em função da distância no software Matlab.

Em seguida foi feita a mesma coisa para encontrar os valores da força magnética utilizando a equação $F_m = |q| \cdot |V| \cdot |B| \cdot \text{sen } \theta$ sendo o campo magnético dipolar terrestre.

3.2. Plotagem das Figuras com Comportamento das Partículas nos Cinturões de Radiação

Utilizando um algoritmo na linguagem Python disponibilizado do artigo Ozturk et al., 2012 foram geradas algumas imagens a fim de compreender melhor o movimento das partículas carregadas nos cinturões de radiação e de forma que ficasse mais visível.

O algoritmo possibilita a visualização da movimentação da partícula carregada no cinturão a partir dos parâmetros passados a ele em relação à partícula, como distância em relação a Terra, pitch angle, energia e tempo de observação.

Para entender a interferência de cada parâmetro citado acima foram feitos diversos plotes com as seguintes entradas:

Tabela 3.1- Mudanças realizadas no algoritmo para cada Figura.

Figura	Energia (MeV)	Pitch Angle (°)	Distância - Cinturão Int. (Re)	Distância - Cinturão ext. (Re)	Tempo (s)
3.1	10	30	2	4	120
3.2	100	30	2	4	120
3.3	100	30	2	4	12
3.4	1	30	2	4	120
3.5	10	0	2	4	120
3.6	10	10	2	4	120
3.7	10	50	2	4	120
3.8	10	80	2	4	120
3.9	10	90	2	4	120
3.10	10	30	1.5	4	120
3.11	10	30	2	7	70
3.12	10	30	2	10	40

Fonte: Produção da autora.

3.3. Obtenção e Geração de Dados Para Análise da Interferência de Eventos Climáticos nos Cinturões

A fim de estudar a relação entre eventos climáticos como o vento solar de alta velocidade e a CME com o fluxo de partículas carregadas na magnetosfera, foi utilizado o site Space Weather Database Of Notifications, Knowledge, Information (DONKI) para obter os eventos ocorridos em algumas datas escolhidas. Após a observação desses eventos, foram selecionadas duas datas para uma observação mais aprofundada, sendo elas, 30 de novembro de 2017 e 5 de maio de 2018.

Para a análise do fluxo de partículas nos cinturões de radiação, foram obtidos os gráficos de fluxo por tempo. Para gerar os gráficos, foi utilizado o VAP Science Gateway, site que fornece dados da missão Van Allen Probes. Dentro da área *L-Shell Plots*, para a geração dos gráficos, inicialmente escolhe-se o instrumento que capturou os dados, nesse caso, escolhe-se o REPT na sonda A, em seguida foram inseridas as informações como data,

tempo de observação e energia da partícula. Foram gerados gráficos para diversas datas além das duas escolhidas acima, os parâmetros utilizados em cada plotagem podem ser vistos na tabela a seguir.

Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados para plotagem dos gráficos.

Figura	Data – Início	Data – Fim	Energia (MeV)
4.16 – A	20/04/2018	20/05/2018	2,00
4.16 – B	20/04/2018	20/05/2018	2,30
4.16 – C	20/04/2018	20/05/2018	2,85
4.17 – A	20/04/2018	20/05/2018	3,60
4.17 – B	20/04/2018	20/05/2018	7,15
4.17 – C	20/04/2018	20/05/2018	8,80
4.20 – A	15/11/2017	15/12/2017	2,00
4.20 – B	15/11/2017	15/12/2017	2,30
4.20 – C	15/11/2017	15/12/2017	2,85
4.21 – A	15/11/2017	15/12/2017	3,60
4.21 – B	15/11/2017	15/12/2017	7,15
4.21 – C	15/11/2017	15/12/2017	8,80
4.23 – A	01/01/2013	31/12/2013	2,00
4.23 – B	01/01/2014	31/12/2014	2,00
4.23 – C	01/01/2015	31/12/2015	2,00
4.23 – D	01/01/2016	31/12/2016	2,00
4.23 – E	01/01/2017	31/12/2017	2,00
4.23 – F	01/01/2018	31/12/2018	2,00
4.24	04/07/2014	04/08/2014	2,00
4.25	10/10/2016	10/11/2016	2,00

Fonte: Produção da autora.

Em seguida, foram plotados gráficos com o vento solar pelo tempo para algumas das datas acima para estudar a correlação entre o fluxo de elétrons nos cinturões e a velocidade do vento solar. Os gráficos também foram gerados no site VAP Science Gateway.

Nas imagens obtidas foi possível observar algumas correlações entre o fluxo de elétrons e a ocorrência de eventos solares, em especial o vento solar rápido.

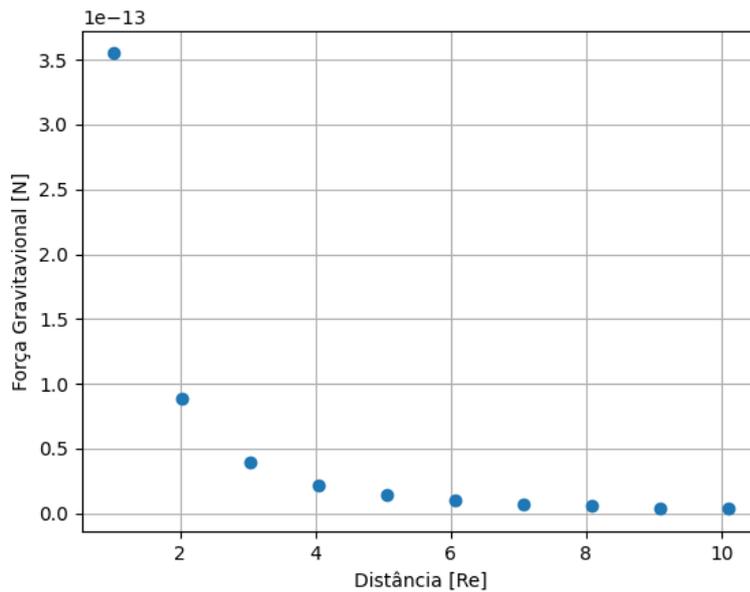
4. Resultados

4.1. Forças Exercidas Sobre uma Partícula na Magnetosfera

As partículas na magnetosfera estão sobre ação constante da força gravitacional, assim como a força magnética e eletrostática, porém essa força proveniente da gravidade é muito pequena em relação a força magnética, para verificar essa diferença, foram feitos dois gráficos, o primeiro mostra a força gravitacional em relação a distância e o segundo a força magnética pela distância, os gráficos podem ser vistos nas Figuras 4.1 e 4.2 respectivamente.

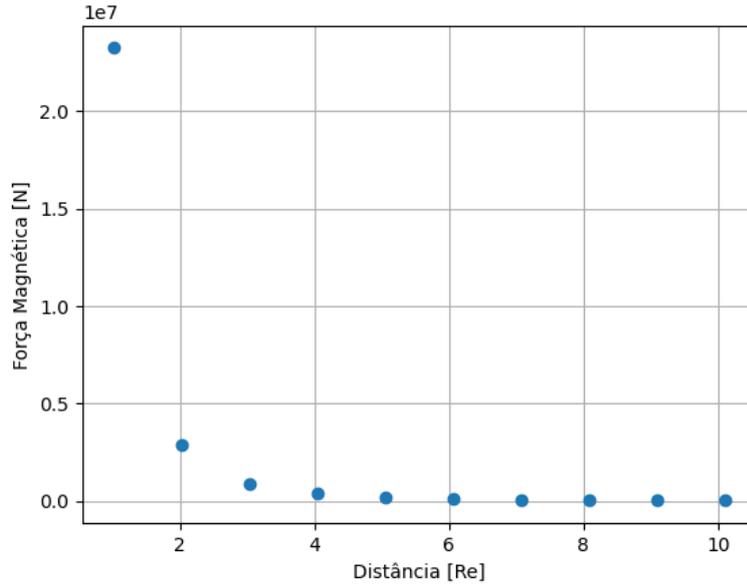
A partir dessas Figuras é possível ver que enquanto a força magnética exerce forças de mais de 2×10^7 T, a força gravitacional exerce uma força de apenas $3,5 \times 10^{-13}$ T em partículas a mesma distância da Terra.

Figura 4.1 – Força Gravitacional x Distância



Fonte: Produção da autora.

Figura 4.2 - Força Magnética x Distância.



Fonte: Produção da autora.

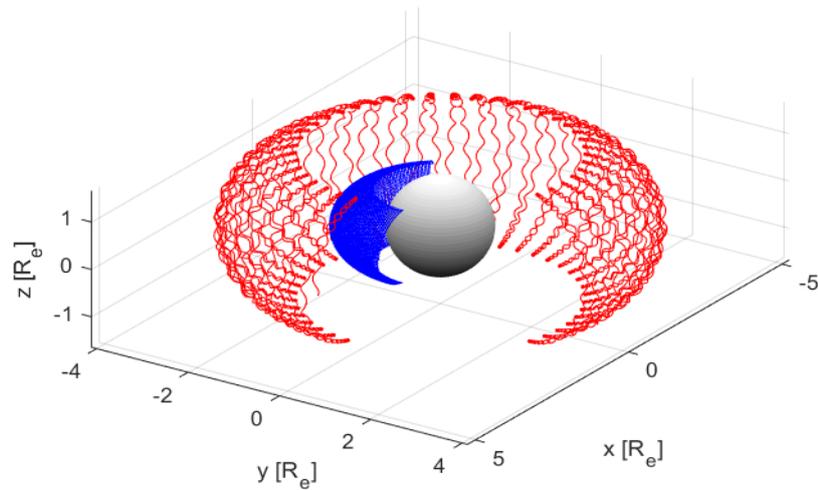
Além disso, podemos ver em ambos os gráficos a força exercida na partícula que está a aproximadamente 1 Re em relação a Terra é muito maior que as partículas que estão mais longe, e para distâncias a partir de 4 Re a força exercida é praticamente a mesma que em partículas até 10 Re, isso é mais evidente na força magnética.

Como foi visto acima, a força exercida nas partículas pela gravidade é desprezível em relação a força magnética, desta forma, os resultados a seguir não levaram em conta a força gravitacional.

4.2. Movimento de Partículas Carregadas nos Cinturões de Radiação

Com objetivo de analisar o movimento das partículas carregadas nos cinturões de radiação foram plotadas algumas figuras utilizando o algoritmo do artigo Ozturk com algumas alterações. Na Figura 4.3, é possível ver o plote original do artigo, essa Figura mostra a trajetória de dois prótons com uma energia cinética de 10 MeV, a partícula em azul iniciou sua trajetória na posição (2Re, 0, 0) e a partícula em vermelho na posição (4Re, 0, 0), os dois começaram com um pitch angle (PA) de 30° e no plote é possível ver a trajetória realizada por esses prótons em 120 segundos.

Figura 4.3 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.

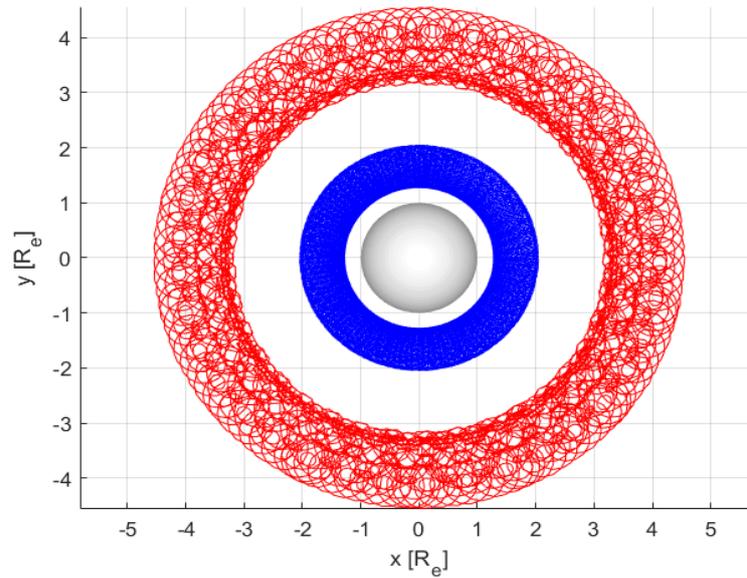


Fonte: Produção da autora.

Na Figura 4.3, podemos observar os três movimentos realizados pelas partículas nos cinturões: o movimento de repique, que é o percurso que partícula realiza de norte a sul em paralelo a linha de campo, movimento ciclotrônico, o movimento circular que a partícula faz em torno da linha de campo, e o movimento de deriva, que se refere ao deslocamento da partícula em torno da Terra

Mudando a energia desses prótons de 10 MeV para 100 MeV e mantendo as demais variáveis, é possível visualizar na Figura 4.4 que as partículas passam a ter uma velocidade maior, pois no mesmo período as mesmas deram mais de uma volta em torno da Terra.

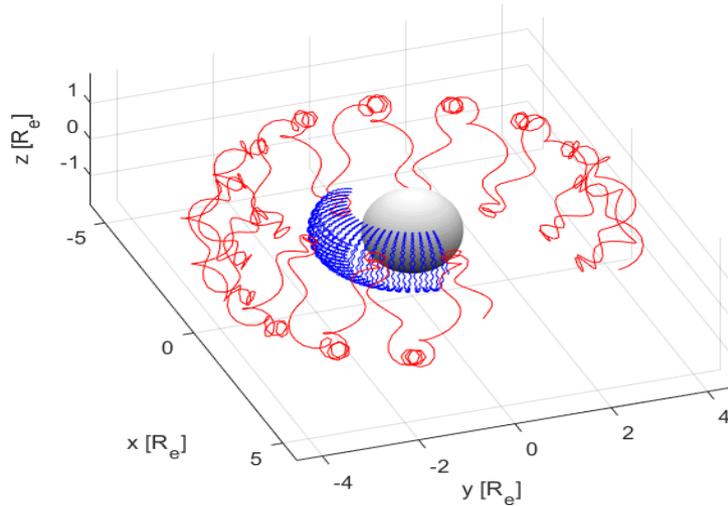
Figura 4.4 - Dois prótons com energia de 100 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

Mantendo a mudança realizada acima em relação a energia, e diminuindo o tempo de observação para 12 segundos, é possível visualizar que deixando a partícula 10 vezes mais energética a torna 10 vezes mais rápida. Além disso, a mudança no tempo torna possível a visualização de maneira mais clara da trajetória das partículas. Na Figura 4.5 é possível notar que além da velocidade das partículas, também houve uma mudança na configuração do movimento em comparação a Figura 4.3, onde o movimento ciclotrônico era mais bem definido, em especial no cinturão externo.

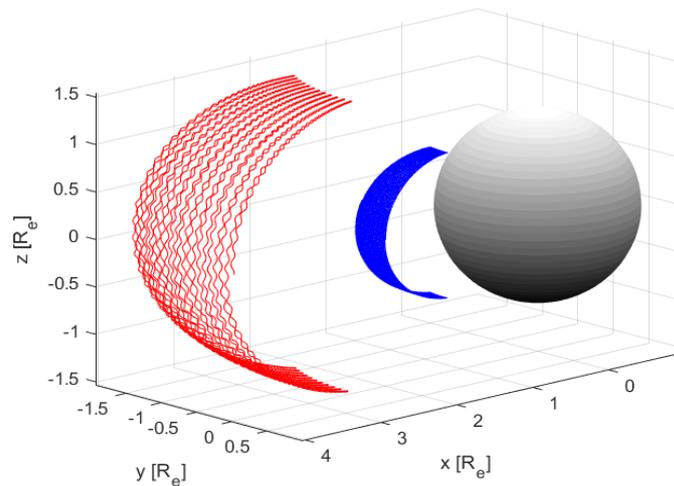
Figura 4.5 - Dois prótons com energia de 100 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 12 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

Em seguida, foi alterado o tempo de observação de volta para 120 segundos e a energia para 1 MeV. As mudanças no movimento podem ser vistas na Figura 4.6, é possível analisar novamente que a energia alterou a velocidade da partícula e a configuração do movimento.

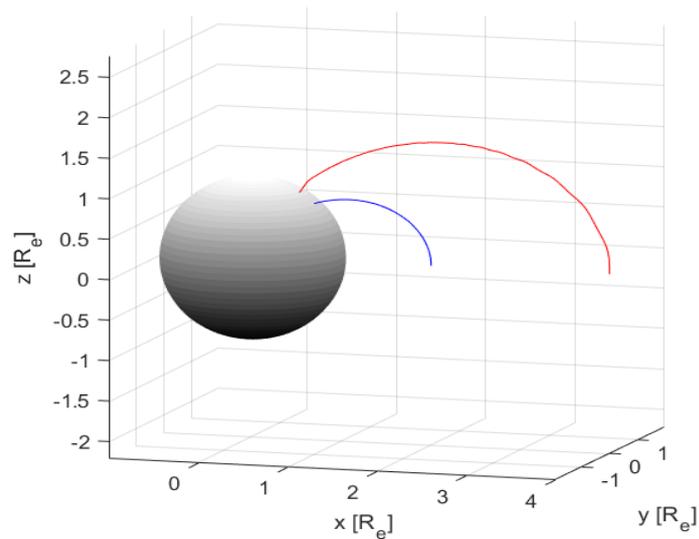
Figura 4.6 - Dois prótons com energia de 1 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

Para analisar as mudanças na trajetória em relação mudança do pitch angle inicialmente foi utilizado um valor de pitch angle de 0° , mantendo os valores da demais variáveis como no plote original (Figura 4.1), é possível ver na Figura 4.7 que o movimento da partícula ocorre de forma paralela a linha de campo e termina ao chegar ao polo, isso ocorre pois como pode ser visto na Equação 2.2 quando o ângulo entre a velocidade da partícula e o campo magnético é zero a ângulo permanece próximo de zero ao longo da trajetória, por isso, não há movimento periódico.

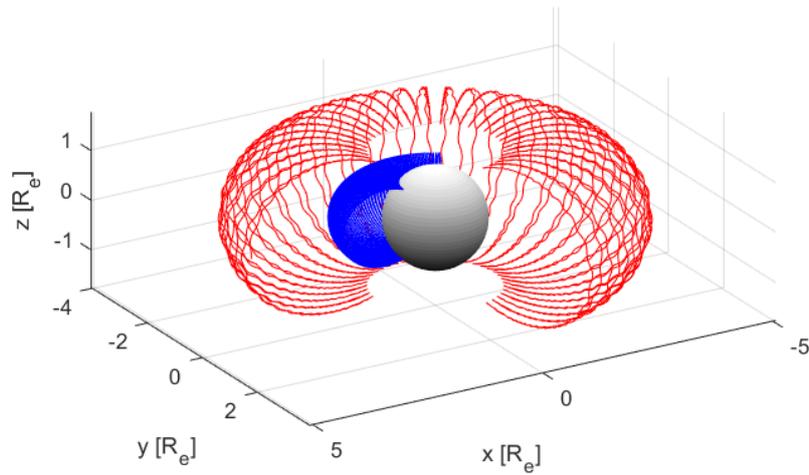
Figura 4.7 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 0° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

Mudando o pitch angle para 10° a partícula passa realizar os movimentos periódicos novamente, como é visto na Figura 4.8.

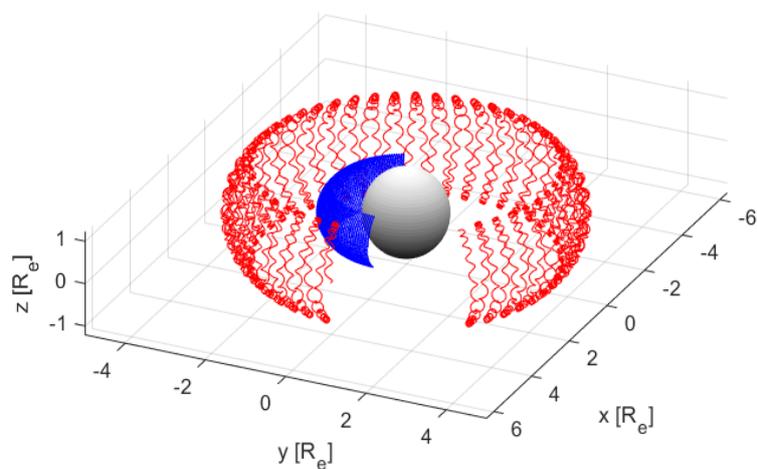
Figura 4.8 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 10° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

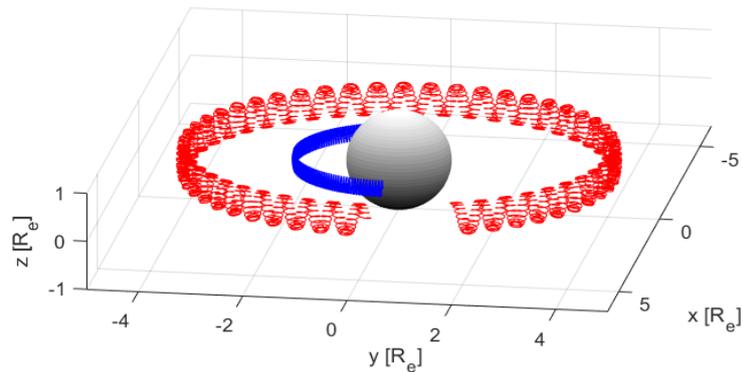
Aumentando o valor do pitch angle é possível ver que quanto maior o valor deste maior o movimento ciclotrônico e de deriva, e menor o movimento de repique, isso pode ser observado nas Figuras 4.9 e 4.10, onde os valores de pitch angle são 50° e 80° respectivamente.

Figura 4.9 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 50° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

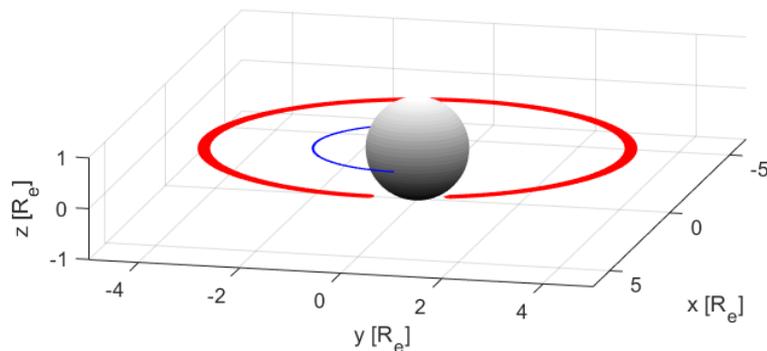
Figura 4.10 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 80° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

Ao colocar um pitch angle de 90° a partícula realiza apenas o movimento de deriva. Também é possível ver que quanto maior pitch angle, maior a velocidade da partícula.

Figura 4.11 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 90° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.

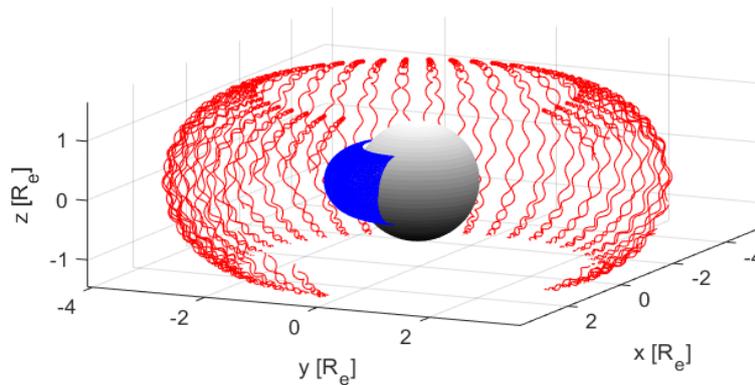


Fonte: Produção da autora.

Por fim, foi alterada a distância inicial da partícula em relação a Terra mantendo os parâmetros iniciais em relação a pitch angle e energia. As distâncias nos eixos y e z foram

mantidas em 0 e apenas o eixo x foi alterado. Na Figura 4.12 a partícula do cinturão interno foi iniciada em $1.5 R_e$ e a partícula no cinturão externo em $4 R_e$.

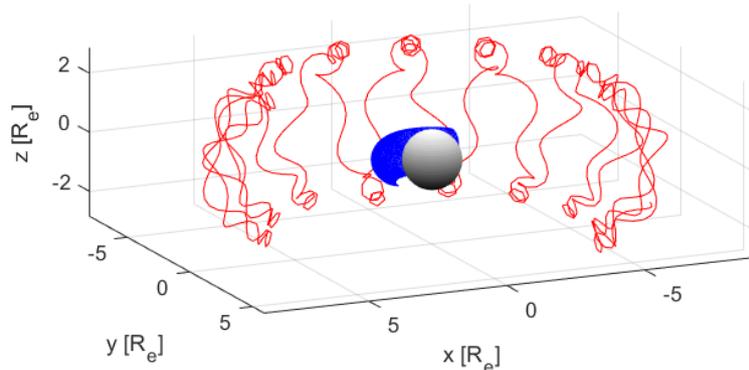
Figura 4.12 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 120 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(1,5R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(4R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

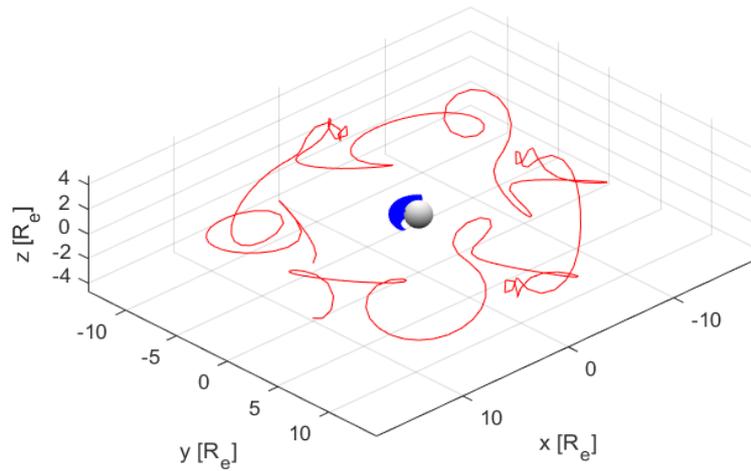
Nas figuras 4.13 e 4.14, a posição inicial das partículas do cinturão externo iniciaram em $7 R_e$ e $10 R_e$, respectivamente, dessa forma é possível perceber que quanto mais longe do campo magnético menor a intensidade deste nas partículas, dessa forma as partículas mais distantes não permanecem armadilhadas e começam a deixar de realizar os movimentos realizados anteriormente.

Figura 4.13 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 70 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição $(2R_e, 0, 0)$ e o em vermelho na posição $(7R_e, 0, 0)$.



Fonte: Produção da autora.

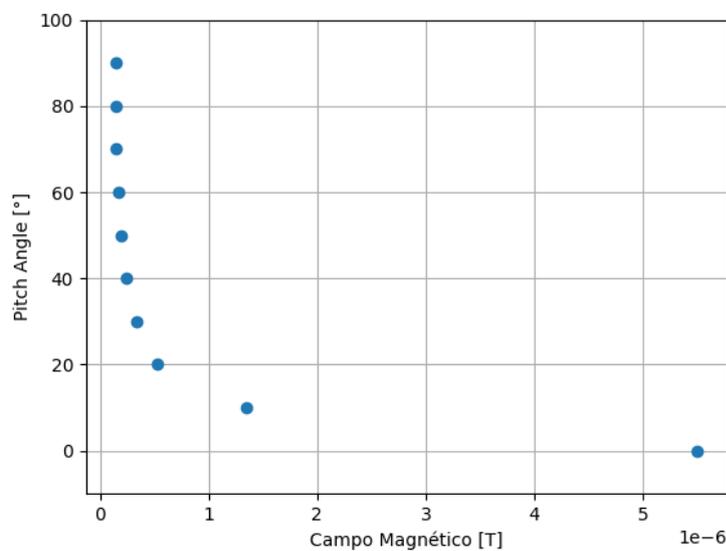
Figura 4.14 - Dois prótons com energia de 10 MeV, PA de 30° e tempo de movimento de 40 segundos, o próton representado em azul tem o movimento iniciado na posição (2Re, 0, 0) e o em vermelho na posição (10Re, 0, 0).



Fonte: Produção da autora.

Como foi visto acima, quanto menor o PA, maior a proximidade da partícula ao polo em seu movimento, e como foi vista na Figura 4.4, quanto mais próximo a Terra maior a força exercida pelo campo magnético, logo as partículas que chegarem mais próximas ao polo sofreram uma força maior do campo. A Figura 4.15 mostra a relação entre o PA e o campo magnético.

Figura 4.15 - Pitch Angle x Campo Magnético.



Fonte: Produção da autora.

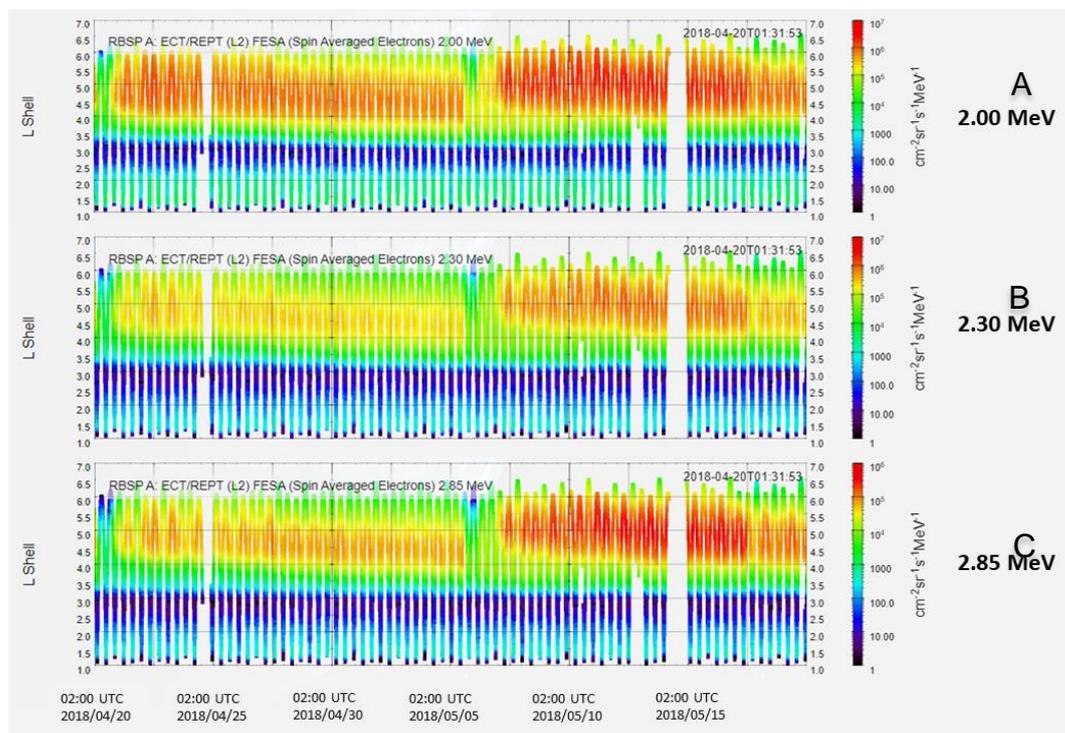
Nesse gráfico é possível analisar que quando o PA está entre 90° a 40° o valor do campo é praticamente o mesmo, isso ocorre pois como foi visto na Figura 4.3 o valor da força exercida na partícula pelo campo magnético é muito similar entre as distâncias de 4 a 10 Re.

4.3. Fluxo das Partículas nos Cinturões de Radiação

Com o objetivo de analisar a relação entre o fluxo de elétrons dentro dos cinturões de radiação e dos eventos climáticos provenientes do Sol, foram gerados gráficos de fluxo de partículas em relação ao tempo.

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram o fluxo entre 20/04/2018 a 20/05/2018. Na Figura 4.16 nota-se que o fluxo de partículas com energia igual a 2 MeV é relativamente maior que o fluxo para partículas com energias igual a 2,30 e 2,85 MeV. Também é possível constatar que o fluxo no cinturão interno é menor. Por fim, é evidente a presença do slot entre $L=2$ e $L=3$, onde é visto um fluxo muito baixo.

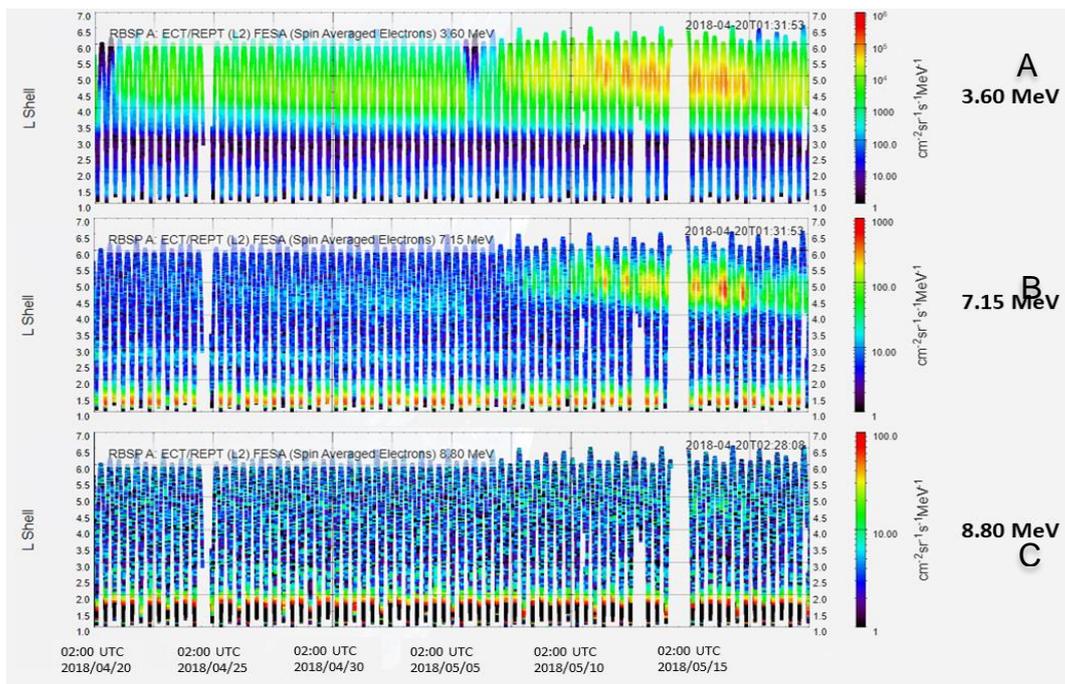
Figura 4.16 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00, 2,30 e 2,85 MeV entre 20/04/2018 e 20/05/2018.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW](https://www.jhuapl.edu/ScienceGateway/Overview) | Van Allen Probes Science Gateway (jhuapl.edu)>

Na Figura 4.17, os gráficos apresentam o fluxo para partículas com energias maiores, nesses gráficos é possível observar que há uma queda substancial na população de partículas nos cinturões para energias mais altas. De forma que quando a energia está em torno de 8,80 MeV o fluxo é quase inexistente ao comparar com o que foi visto na Figura 4.16.

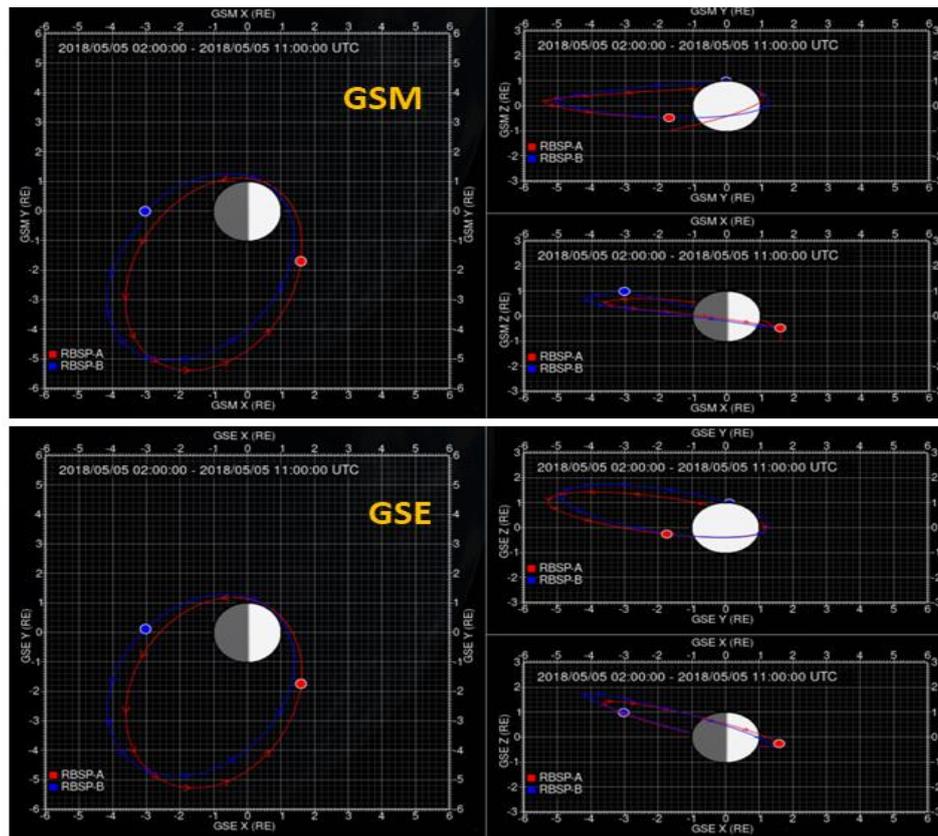
Figura 4.17 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 3,60, 7,15 e 8,80 MeV entre 20/04/2018 e 20/05/2018.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://science.gateways.nasa.gov/overviews/vanallenprobes/)>

O plote da órbita das sondas Van Allen no dia 05/05/2018 é visto na Figura 4.18, nesta data as sondas estavam no meio do período analisado acima, logo, esta era a órbita da sonda quando os dados foram medidos. A localização das sondas pode trazer alguns parâmetros para o estudo do fluxo, nesse caso, nota-se que o apogeu estava mais próximo do lado noturno, nesta condição, haverá uma ocorrência maior de mudanças na magnetosfera provenientes deste lado, como injeção de partículas.

Figura 4.18 – Plote da órbita das sondas de Van Allen – GSM e GSE - 05/05/2018 - 02:00:00 até 11:00:00 UTC.

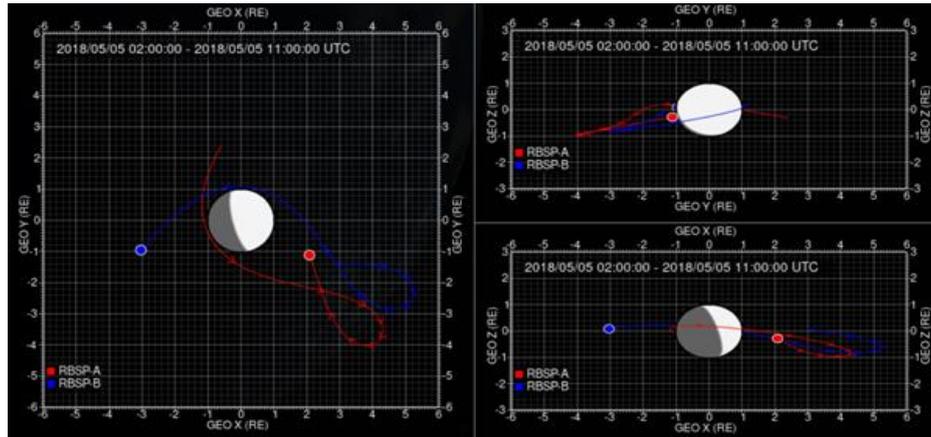


Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhupl.edu\)](https://science.gateway.edu/overviews/van-allen-probes-science-gateway)>

Os sistemas de coordenadas escolhidos para essa observação na Figura 4.18 foram o GSM e GSE, pois ambos são sistemas baseados na linha Terra-Sol e trazem uma clareza maior na visualização da trajetória de satélites.

A fim de comparação, na Figura 4.19 é mostrado a mesma trajetória das sondas observadas acima no sistema GEO. Dessa forma, fica claro que a observação do circuito das sondas fica muito mais complexa nesse sistema.

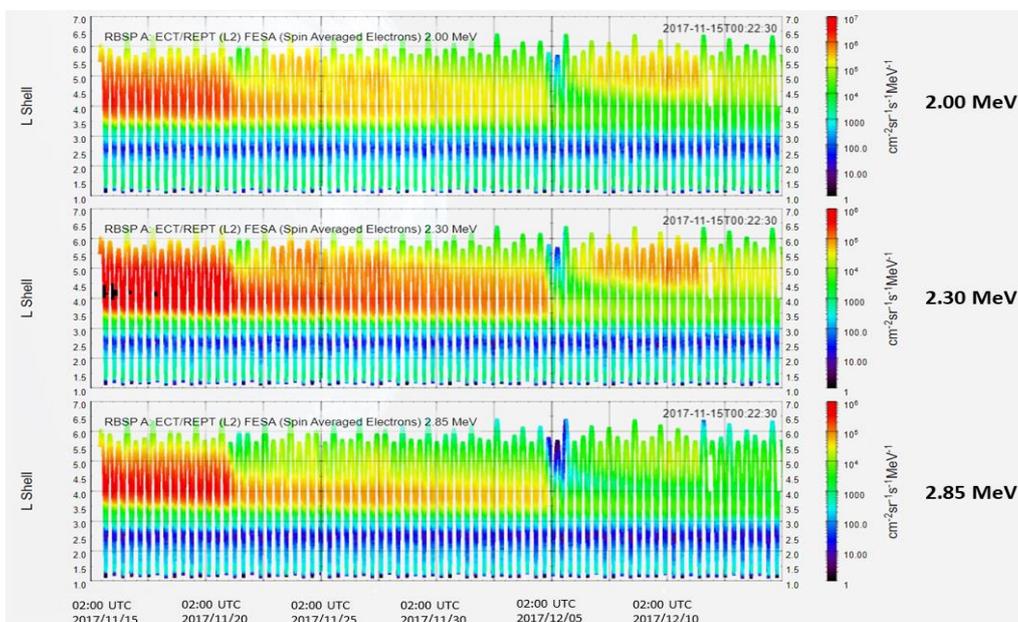
Figura 4.19 - Plote da órbita das sondas de Van Allen – GEI - 05/05/2018 - 02:00:00 até 11:00:00 UTC



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://science.gateways.nasa.gov/vanallen/overview/)>

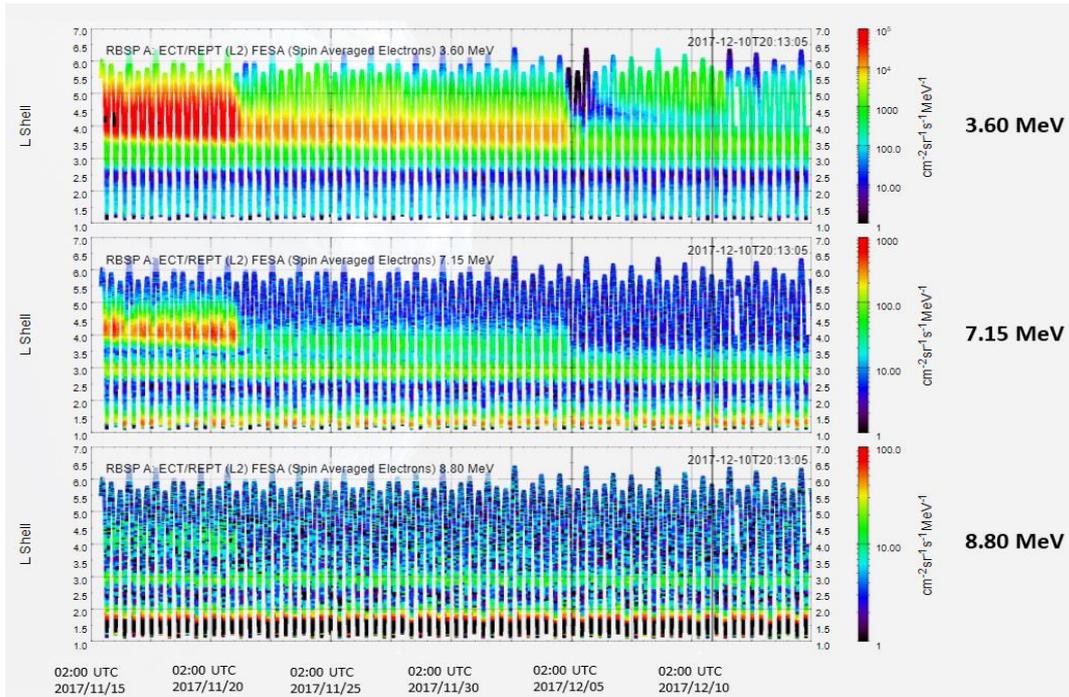
Ao analisar o comportamento do fluxo para a segunda data escolhida, observa-se o um comportamento similar ao que foi visto acima, as partículas com energia em torno de 2,00 MeV são predominantemente e que o fluxo no cinturão externo é mais intenso, com pode ser visto nas Figuras 4.20 e 4.21.

Figura 4.20 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00, 2,30 e 2,85 MeV entre 15/11/2017 e 15/12/2017.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://science.gateways.nasa.gov/vanallen/overview/)>

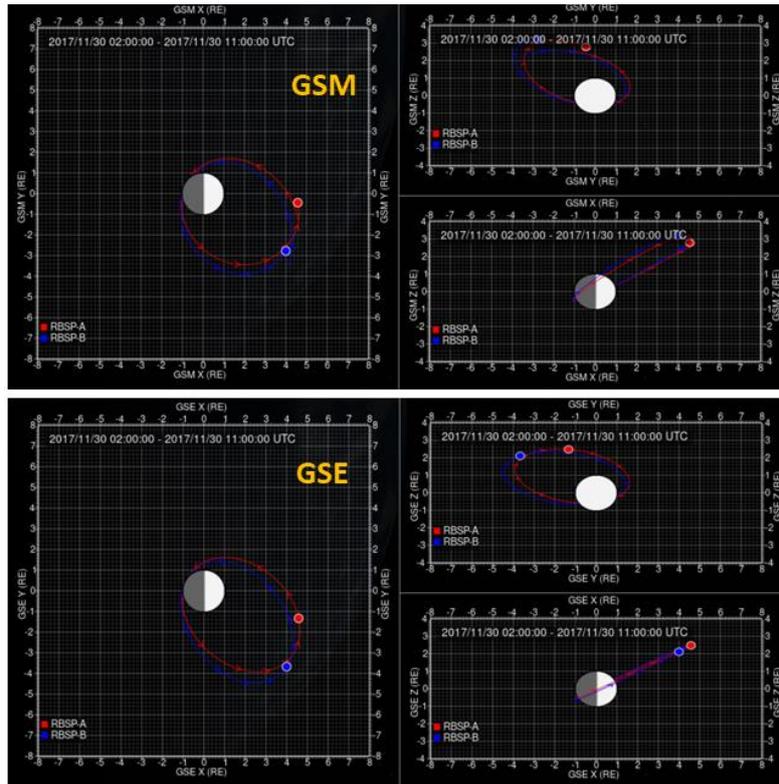
Figura 4.21 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 3,60, 7,15 e 8,80 MeV entre 15/11/2017 e 15/12/2017.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW](https://science.gateways.org/overview) | [Van Allen Probes Science Gateway \(jhupl.edu\)](https://vanallenprobes.org/)>

Na Figura 4.22 é possível observar a órbita das sondas no dia 30/11/17, dessa vez o apogeu está mais próximo do lado diurno, o que levará a uma análise mais rica em eventos que ocorrem desse lado, como choques interplanetários.

Figura 4.22 – Plote da órbita das sondas de Van Allen – GSM e GSE - 30/11/2017 - 02:00:00 até 11:00:00 UTC.

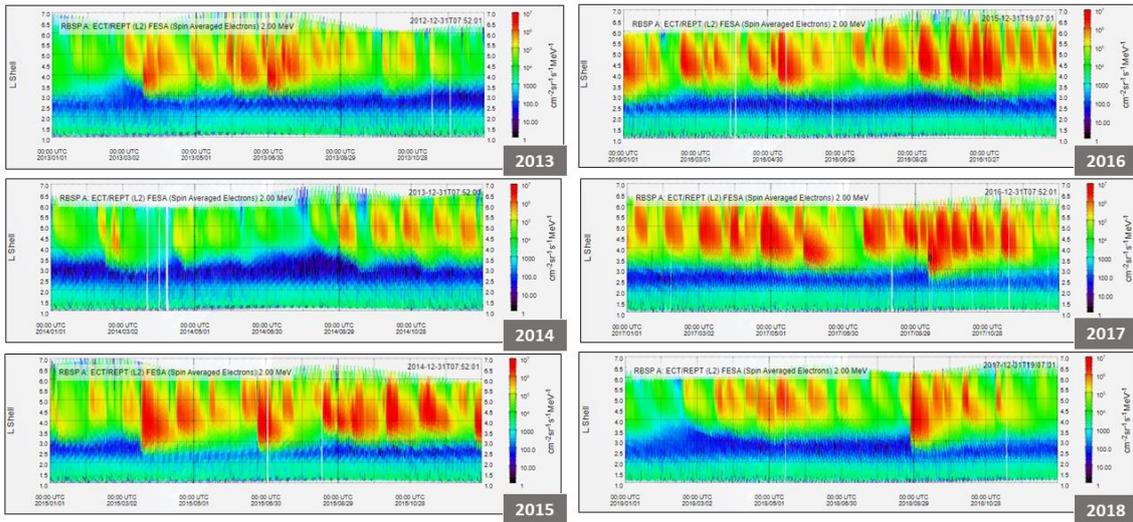


Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhupl.edu\)](http://science.gateway.edu)>

De maneira geral, observa-se que a maior população de partículas nos cinturões, sobretudo no cinturão externo, é formada por elétrons na faixa de 2 MeV. Sendo assim, para os gráficos a seguir, serão analisadas partículas com energia igual a 2 MeV.

Na Figura 4.23 é possível observar o fluxo de 2013 a 2018, dessa forma é visto que a população de partículas nos cinturões não segue um padrão e que em alguns períodos o fluxo é muito alto, como é visto em 2016 e 2017, enquanto em outros é baixo, como em 2014.

Figura 4.23 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV para os anos de 2013 a 2018.

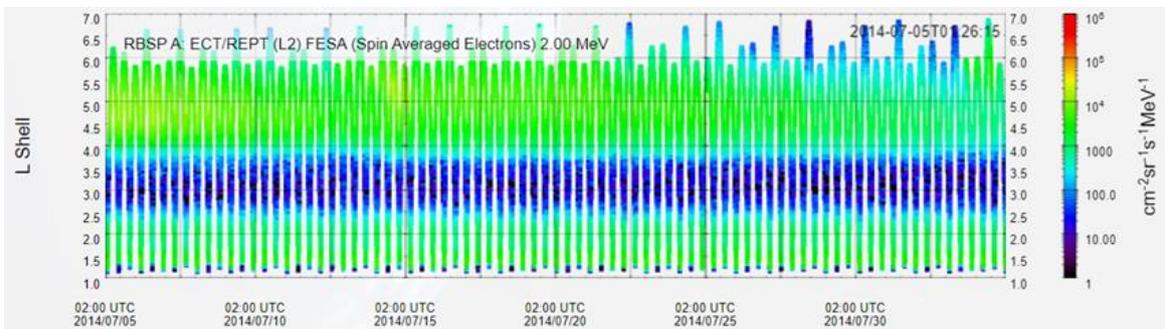


Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](#)>

O ano com o menor fluxo observado foi 2014 e o com maior fluxo foi 2016. Para cada um desses anos foi escolhido um período para análise.

O primeiro período foi de 05/07/2014 a 05/08/2014. Na Figura 4.24 foi plotado o fluxo para esse intervalo de tempo, nota-se que há uma população de partículas muito pequena comparado com o que foi visto nas Figuras 4.16 e 4.20 para a mesma energia, 2,00 MeV.

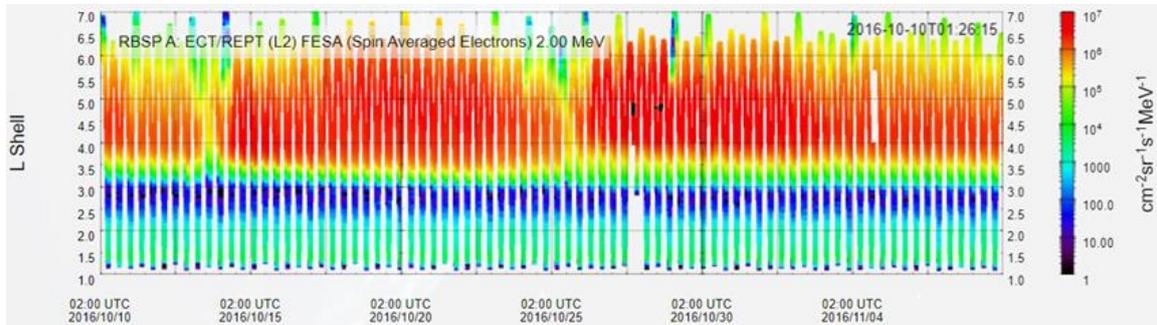
Figura 4.24 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV entre 04/07/2014 e 05/08/2014.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](#)>

Na Figura 4.25 foi plotado o fluxo entre 10/10/2016 e 10/11/2016, nesse plote nota-se que o fluxo é muito maior que o que foi analisado anteriormente.

Figura 4.25 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV entre 10/10/2016 e 10/11/2016.



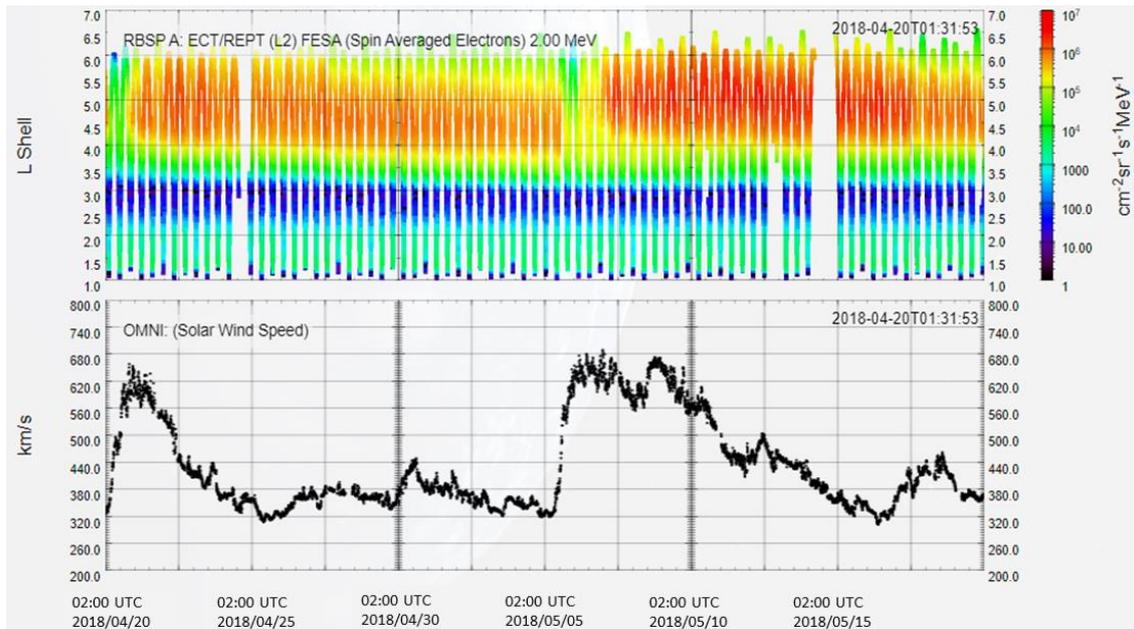
Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](#)>

4.3.1. Variabilidade do Fluxo em Função do Vento

Com o objetivo de analisar a relação entre o fluxo de partículas dentro dos cinturões de radiação e dos eventos climáticos provenientes do Sol, foram gerados gráficos de fluxo de partículas em relação ao tempo e gráficos referentes à velocidade do vento solar por tempo para as datas escolhidas.

Nos primeiros gráficos, vistos na Figura 4.26, é possível observar que após o aumento da velocidade do vento solar há um aumento no fluxo de partículas no cinturão externo e quanto maior a duração do vento solar de alta velocidade, maior o tempo em que o fluxo permanece alto. Próximo ao intervalo de tempo observado foi detectada a ocorrência de três eventos de vento solar rápido, nos dias, 19/04/2018, 05/05/2018 e 16/05/2018, e como pode ser visto na Figura abaixo, essas datas correspondem ao aumento do vento e fluxo.

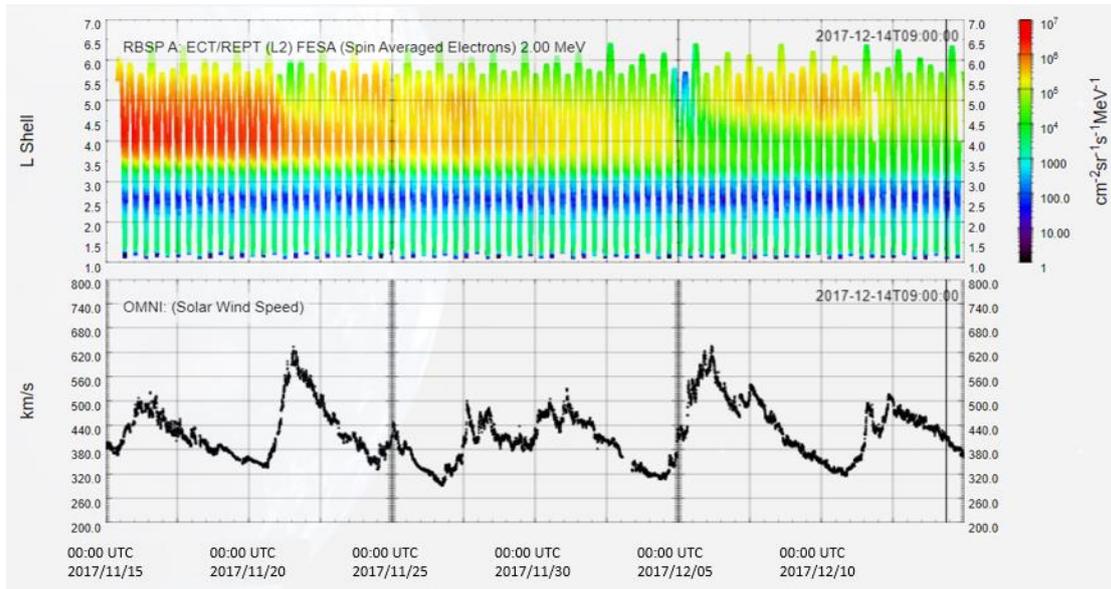
Figura 4.26 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar entre 20/04/2018 e 20/05/2018.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](#)>

Na Figura 4.27 é possível observar o fluxo de partículas e a variação do vento solar entre 20/11/2017 e 20/12/2017. Nessa análise é visto um grande número de picos de aumento do vento solar, também um grande número de ocorrências de vento solar rápido nas datas 20/11/2017, 27/11/2017, 30/11/2017, 04/12/2017, 11/12/2017 e 16/12/2017, essas datas correspondem às datas de alguns dos picos maior ou igual a 500 km/s.

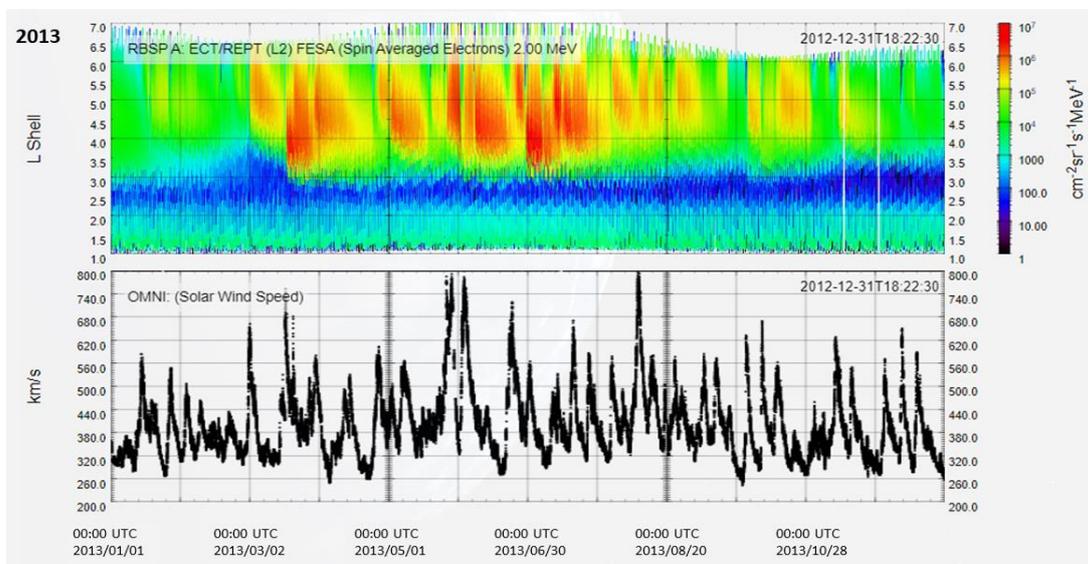
Figura 4.27 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar entre 15/11/2017 e 15/12/2017.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](#)>

Analisando um período maior, na Figura 4.28, o mesmo pode ser visto, há um aumento no fluxo que acompanha o aumento da velocidade do vento solar.

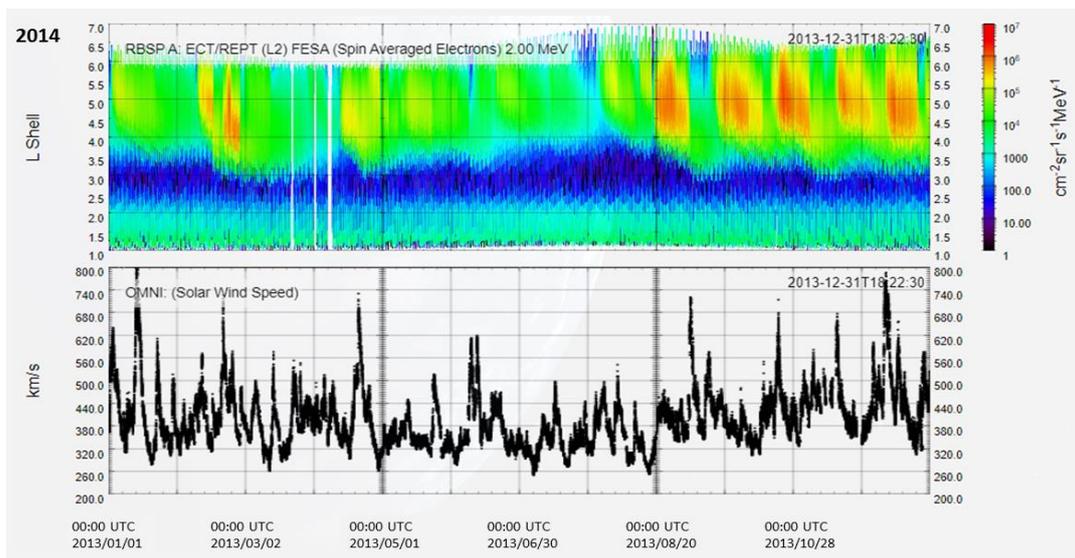
Figura 4.28 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar em 2013.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](#)>

Ao observar a Figura 4.29, nota-se que no ano de 2014 o fluxo de partículas foi bem menor em comparação com o ano de 2013 como foi visto acima, o mesmo pode ser visto em relação a velocidade do vento solar, no gráfico do vento solar na Figura 4.29 mostra uma ocorrência pequena de ventos solares com velocidades acima de 500km/s.

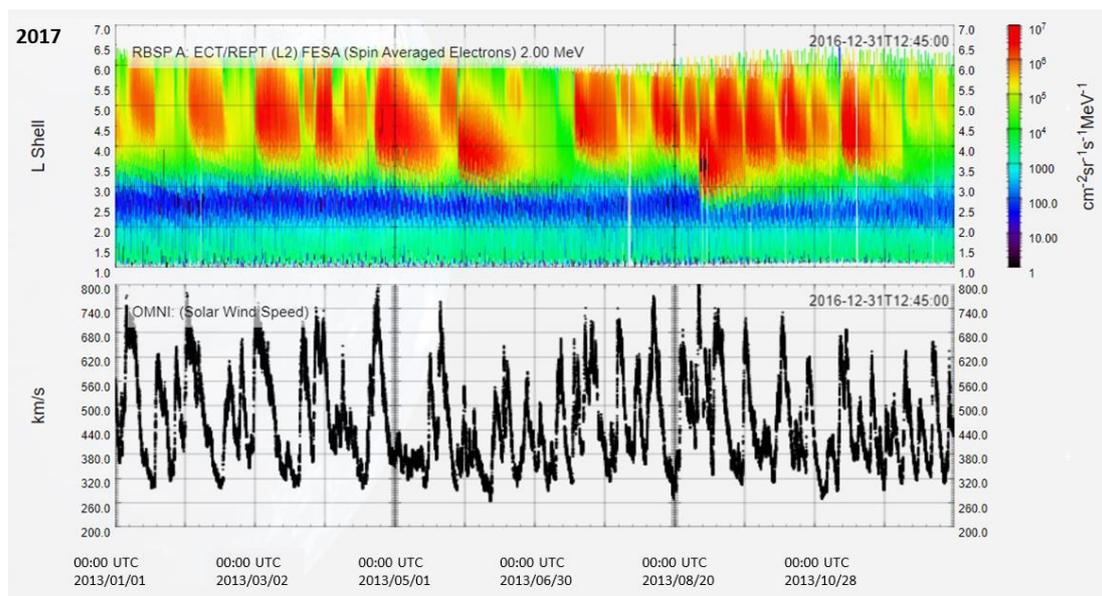
Figura 4.29 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar em 2014.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](https://science.gateways.nasa.gov/overviews/vanallenprobes/)>

Por fim, no ano de 2017 o contrário do que é visto acima acontece, como pode ser visto na Figura 4.30. Um fluxo muito intenso pode ser observado, assim como uma grande ocorrência de vento solar rápido, novamente mostrando uma possível correlação entre eles.

Figura 4.30 - Medida de fluxo de elétrons com energia de 2,00 MeV e medida de velocidade do vento solar em 2017.



Fonte: <[SCIENCE GATEWAY: OVERVIEW | Van Allen Probes Science Gateway \(jhuapl.edu\)](#)>

5. Conclusão

Nesta pesquisa de iniciação científica, foi estudado o comportamento das partículas eletricamente carregadas nos cinturões de Van Allen e sua variação diante da ocorrência de eventos solares, a fim de entender se há uma correlação entre eles.

As análises realizadas em relação ao comportamento das partículas nos cinturões mostraram que estas são controladas pela força de Lorentz, e a alteração dos parâmetros como energia, PA e distância da partícula em relação a Terra podem alterar seu comportamento periódico e condição de armadilhamento nos cinturões.

Através da análise dos gráficos obtidos em relação ao fluxo por tempo para as diferentes energias observadas notou-se uma população maior de elétrons com energias próximas a 2 MeV no cinturão externo.

A partir da observação dos gráficos de fluxo por tempo junto aos gráficos de velocidade do vento solar por tempo, foi observada uma correlação entre o aumento da velocidade de ventos solares rápidos e o aumento do fluxo de elétrons no cinturão externo.

Por fim, com essa pesquisa foi possível ter uma iniciação no aprendizado em relação ao comportamento das partículas nos cinturões de radiação e como se dá a relação desta com alguns eventos solares, em especial, o vento solar rápido.

Como trabalhos futuros, pretende-se estudar a correlação entre o aumento de velocidade do vento solar e o incremento no fluxo de partículas, para períodos longos, considerando ao menos dois dos níveis de energia medidos pelas sondas Van Allen Probes durante a fase de declínio do ciclo solar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKER, Daniel N. et al. The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) instrument on board the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) spacecraft: Characterization of Earth's radiation belt high-energy particle populations. **Space Science Reviews**, v. 179, n. 1-4, p. 337-381, 2013.

COSTA, E.J.; SIMÕES, F.J.R.; CARDOSO, F.R.; ALVES, M.V. **O vento solar e a atividade geomagnética**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 4, 4301, 2011.

LI, W.; HUDSON, M. K. Earth's Van Allen radiation belts: From discovery to the Van Allen Probes era. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 124, p. 8319–8351, 2019.

MENDONÇA, R.R.S. **Análise em uma e duas dimensões de precursores de tempestades geomagnéticas através de dados da rede global de detectores de múons (GMDN)**. 2015. 240 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – INPE, São José dos Campos, 2015.

OLIVEIRA FILHO, K.S.; SARAIVA, M.F.O. **Astronomia e Astrofísica**. 3 ed. Porto Alegre: Editora Livraria da Física, 2014. 784 p. Departamento de Astronomia - Instituto de Física Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SARMIENTO, K.V.E. **Estimativa da amplitude de correntes geomagneticamente induzidas em diferentes locais no Brasil durante tempestades magnéticas do ano de 2015**. 2018. 112 p. Tese (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - INPE, São José dos Campos, 2018.

SILVA, G.B.D. **Análise da variação do fluxo de elétrons no cinturão de radiação externo durante a fase de declínio do ciclo solar 24**. 2018. 51 p. Tese (Doutorado em geofísica espacial) - INPE, São José dos Campos, 2018.

SONI, Pankaj K.; KAKAD, Bharati; KAKAD, Amar. L-shell and energy dependence of magnetic mirror point of charged particles trapped in Earth's magnetosphere. **Earth, Planets and Space**, v. 72, n. 1, p. 1-15, 2020.

SOUZA, V. M.; KOGA, D.; GONZALEZ, W.D.; CARDOSO, F.R. Observational Aspects of Magnetic Reconnection at the Earth's Magnetosphere. **Brazilian Journal of Physics** **47**. 447–459 (2017).

ÖZTÜRK, M. Kaan. **Trajectories of charged particles trapped in Earth's magnetic field**. American Journal of Physics, v. 80, n. 5, p. 420-428, 2012.