



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DA DINÂMICA DA MAGNETOSFERA SATURNINA EM
DIFERENTES NÍVEIS DO VENTO SOLAR**

Altamily Costa Santana

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC/INPE, orientado pelo pesquisador Dr. Ezequiel Echer, e coordenado pelo pesquisador Dr. Manilo Soares Marques .

INPE

Natal, RN

2023



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DA DINÂMICA DA MAGNETOSFERA SATURNINA EM
DIFERENTES NÍVEIS DO VENTO SOLAR**

Altamily Costa Santana

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC/INPE, orientado pelo
pesquisador Dr. Ezequiel Echer, e
coordenado pelo pesquisador Dr. Manilo
Soares Marques .

INPE

Natal, RN
2023

AGRADECIMENTOS

“É necessário sempre acreditar que o sonho é possível
Que o céu é o limite e você, truta, é imbatível
Que o tempo ruim vai passar, é só uma fase
Que o sofrimento alimenta mais a sua coragem.” - Racionais Mc's (2002)

Agradeço aos meus antepassados que me deram a oportunidade de desfrutar do conhecimento e ao meu pai, Altamir José que me ensinou a ter força e perseverança de não desistir dos meus objetivos. Agradeço a Exu que sempre abre os meus caminho e me protege nesta grande jornada que é a vida.

Agradeço aos meus orientadores Dr. Ezequiel Echer e Dr. Manilo Marques pelo empenho em buscar a excelência em todas as atividades que estamos desenvolvendo.

Agradeço ao programa institucional de bolsas de iniciação científica PIBIC/INPE, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCTIC pelo apoio e incentivo.

RESUMO

A magnetosfera saturnina, sendo a segunda maior do sistema solar, apresenta características semelhantes à da Terra. Como o campo magnético intrínseco, às correntes convectivas e o cinturão de radiação mas são divergentes em outros aspectos, por exemplo, na órbita de Titã que porta um toróide, nas absorção dos íons energéticos do cinturão de radiação por meio das luas e as fontes de plasma que são a ionosfera, o vento solar e a atmosfera gelada das suas luas. Por isso, sua dinâmica apresenta comportamento diferente da magnetosfera terrestre. Neste sentido um estudo da dinâmica da magnetosfera joviana faz-se necessário, mais para isso precisamos analisar 12 anos de dados coletados pela espaçonave Cassini que explorou várias regiões da magnetosfera saturniana, desde da frente de choque até a cauda magnética. Neste primeiro ano de Iniciação científica teve como foco, uma revisão bibliográfica sobre o tema e de criação de um catálogo de períodos de passagens pelas regiões da magnetosfera, para futura referência.

Palavras-chave: Magnetosfera saturnina, Cassini, plasma, dinâmica e vento solar.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. O majestoso sexto planeta do sistema solar.	2
FIGURA 2.2. Lagos, crateras, dunas, labirintos, planícies e hummocky da lua Titã do planeta Saturno.	4
FIGURA 2.3. As Lista de Tigre mostrando a dinâmica ativa dos gêiseres no polo sul.	5
FIGURA 2.4. Colagem de cada lado de Saturno, mostrando a diferença do polo sul e norte de Enceladus evidenciando as Listas de Tigre.	6
FIGURA 2.5. Magnetosfera de Saturno.	7
FIGURA 2.6. Corrente de Tigela.	8
FIGURA 2.7. Anéis de Saturno pela espaçonave Cassini-Huygens	9
FIGURA 2.8. Representação de densidade da folha de plasma..	11
FIGURA 2.9. Fenômeno de embranquecimento da cauda.	13
FIGURA 3.1. Jornada até o planeta Saturno.	16
FIGURA 3.2. Representação das órbitas feitas pela espaçonave.	17
FIGURA 3.3. Espaçonave Cassini-Huygens.	19
FIGURA 3.4. Magnetômetro (MAG).	21
FIGURA 3.5. Espectrômetro de plasma.	23
FIGURA 4.1. Ilustração da órbita da Cassini-H.uygens.	24
FIGURA 4.2. Órbita da Cassini na Frente de Choque	25
FIGURA 4.3. A Cassini passando pela cauda da magnetosfera.	26
FIGURA 4.4. Passagem da Cassini pelo polo norte.	27
FIGURA 4.5. Cassiane sobrevoando o polo sul de Saturno .	28
FIGURA 4.6 A elipse formada pela rotação da espaçonave no ano de 2010.	28

SUMÁRIO

<u>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO</u>	<u>1</u>
<u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>1</u>
<u>2.1. Introdução a Saturno e as suas luas congeladas</u>	<u>1</u>
<u>2.2. Introdução a magnetosfera de Saturno</u>	<u>5</u>
<u>3. INSTRUMENTAÇÃO</u>	<u>11</u>
<u>3.1. Espaçonave Cassini-Huygens</u>	<u>11</u>
<u>3.2. Instrumentos de campo e de partículas</u>	<u>14</u>
<u>3.3. Magnetômetro (MAG)</u>	<u>16</u>
<u>3.4. Espectrograma de plasma Cassini (CAPS)</u>	<u>17</u>
<u>4. RESULTADOS</u>	<u>18</u>
<u>4.1 Frente de Choque</u>	<u>20</u>
<u>4.2 Cauda Magnética</u>	<u>21</u>
<u>4.3. Hemisfério Norte</u>	<u>22</u>
<u>4.4 Hemisfério Sul</u>	<u>23</u>
<u>5. CONCLUSÃO</u>	<u>24</u>
<u>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>25</u>

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Antes de mais nada, neste relatório serão apresentadas as atividades desenvolvidas entre setembro de 2022 até agosto de 2023. Durante esse período, foram atendidas as demandas propostas no plano de trabalho. Nessa perspectiva, estão detalhadas as movimentações realizadas, como, por exemplo, a revisão bibliográfica dos conceitos: interação Sol-Saturno, configuração e dinâmica da magnetosfera saturniana e terrestre, campo magnético, ionosfera, além dos instrumentos científicos utilizados para a coleta de dados que serão empregados. Dessa maneira, a prática deste trabalho incluiu: elaborar um catálogo das órbitas da espaçonave Cassini-Huygens nas regiões da magnetosfera em diferentes níveis de pressão da dinâmica do vento solar, redigir textos científicos como artigos, resumos, relatórios e livros científicos dentro da temática. Além disso, houve participação em reuniões e apresentação de seminários durante o primeiro ano de bolsa. Adicionalmente, os conceitos relacionados ao Sol, atividade solar, meio interplanetário, magnetosfera terrestre e ionosfera terrestre foram abordados e contemplados no desenvolvimento das atividades.

Em continuação, serão apresentadas as revisões bibliográficas utilizadas, com foco na magnetosfera saturniana, suas luas e anéis, e na interação desses elementos com o vento solar em diferentes níveis de pressão. Abordaremos a perspectiva da nave Cassini-Huygens, explorando suas descobertas científicas nesse âmbito.

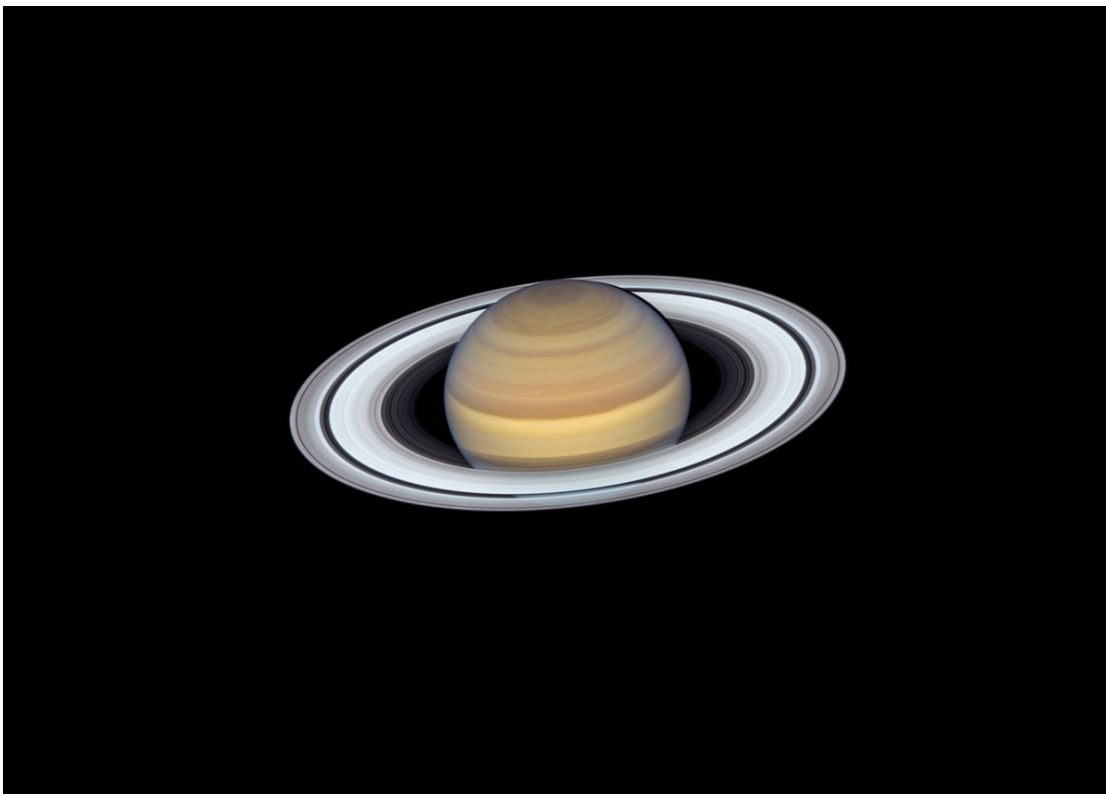
Na sequência, serão abordados os detalhes da instrumentação e coleta de dados realizadas pela espaçonave. Destacaremos especialmente os equipamentos responsáveis por medir a direção e intensidade do campo magnético, bem como os movimentos das partículas e suas direções. Prosseguindo, será apresentado o catálogo das órbitas da Cassini, delineando suas trajetórias através da magnetosfera e evidenciando as variações na interação com o vento solar em diferentes regiões. Por fim, este relatório será concluído, e também será disponibilizada a lista de referências utilizadas para embasar as informações aqui apresentadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução a Saturno e as suas luas congeladas

Saturno é o segundo maior do Sistema Solar. Também é admirável pelos seus grandes anéis e suas luas geladas. Sua composição é feita pelos gases hélio e hidrogênio. Nessa perspectiva, o planeta em questão já foi observado pelos satélites Pioneer 11 (1979), Voyager 1 (1980) e Voyager 2 (1981). Nessa sequência, foi analisado pelo satélite Cassini-Huygens (2004 -2017), que é o principal veículo utilizado neste relatório. O planeta Saturno tem sua rotação bastante intensa, similar ao de Júpiter. Porém, em contrapartida, possui um campo magnético mais fraco, e a sua magnetosfera é semelhante à do planeta Terra em alguns aspectos, como ambas as magnetosferas serem intrínsecas devido ao fato de terem um dínamo ativo planetário, na figura 2.1 mostra o gigante dos anéis.

Figura 2.1: O majestoso sexto planeta do sistema solar.



Fonte: NASA, ESA e A. Simon (2019).

Referente às luas de Saturno, em destaque está o satélite natural Titã, que é a maior lua a orbitar o planeta, chegando a ser similar em tamanho a Mercúrio. Além disso, é a única lua com atmosfera espessa do Sistema Solar (Coustenis, 2009). Além do astro Titã, Saturno tem outra lua interessante, que é Enceladus. Essa lua é predominantemente formada por gelo, água e vapor de água. Dessa maneira, o material residual dessa lua é ejetado na órbita de Saturno, formando o anel E, um dos elegantes anéis do planeta vigente (Sittler, 2006).

A missão Cassini-Huygens orbitou o planeta saturniano por quase 20 anos e teve como objetivo a exploração espacial do planeta, seus anéis e suas luas geladas, com foco em uma melhor compreensão de sua atmosfera. Nesse sentido, a Huygens orbitou a lua Titã e pousou nela. Por outro lado, a Cassini teve como foco a composição da atmosfera, abrangendo as interações de sua magnetosfera e ionosfera com o vento solar, analisando esses processos físicos e químicos.

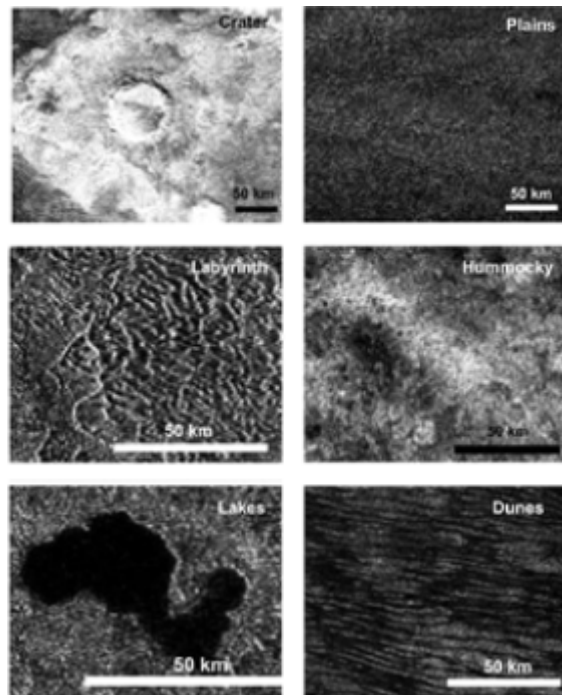
Essa sonda orbitou Enceladus, um satélite natural rico em elementos do grupo da água, com foco em sua estrutura geológica. Além disso, as luas desempenham um papel importante na configuração da magnetosfera saturniana. O gigante astro dos anéis tem como principal fonte de plasma a ionosfera, o vento solar e a atmosfera gelada, resultante de seus anéis e luas congeladas (Sittler, 2005).

Dessa forma, este trabalho de iniciação científica tem como objetivo compreender a configuração da magnetosfera saturniana e sua dinâmica em relação às variações do vento solar, por meio das descobertas da espaçonave Cassini-Huygens.

Referente às luas, em seu número total são 83 que orbitam o complexo sistema saturniano. Uma das propriedades notáveis do satélite rochoso Titã são os lagos líquidos de metano, rios de hidrocarbonetos e oceanos de água e amônia (Lorenz, 2008), que foram desvendados por essa missão. A Huygens pousou em janeiro de 2005 em terras saturninas. Mesmo a lua tendo uma atmosfera mais densa devido aos elementos químicos presentes nela, foi possível visualizar esses lagos e oceanos, como está

representado na figura 2.2. Além disso, a lua possui um toro em sua órbita devido à massa do material expelido por Titã. O satélite gelado tem uma inclinação de 24,48°.

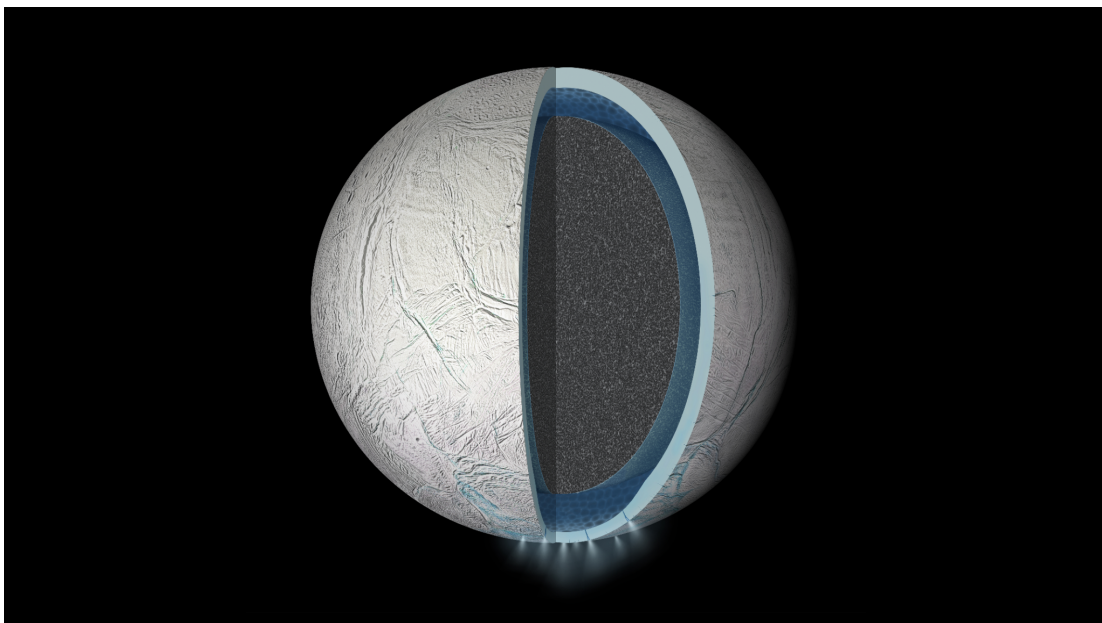
Figura 2.2: Lagos, crateras, dunas, labirintos, planícies e hummocky da lua Titã do planeta Saturno.



Fonte: Lopes (2020).

A lua gelada Enceladus foi uma grande descoberta, pois, apesar de ser um satélite pequeno, a sua atividade geológica é intensa em seu polo sul, onde possui jatos de gêiseres ativos (Schenk, 2018) evidenciado na figura 2.3. Isso evidencia a possibilidade de haver um oceano líquido sob sua superfície congelada. Esse fator também é ressaltado pelo efeito de maré que Saturno exerce sobre a lua.

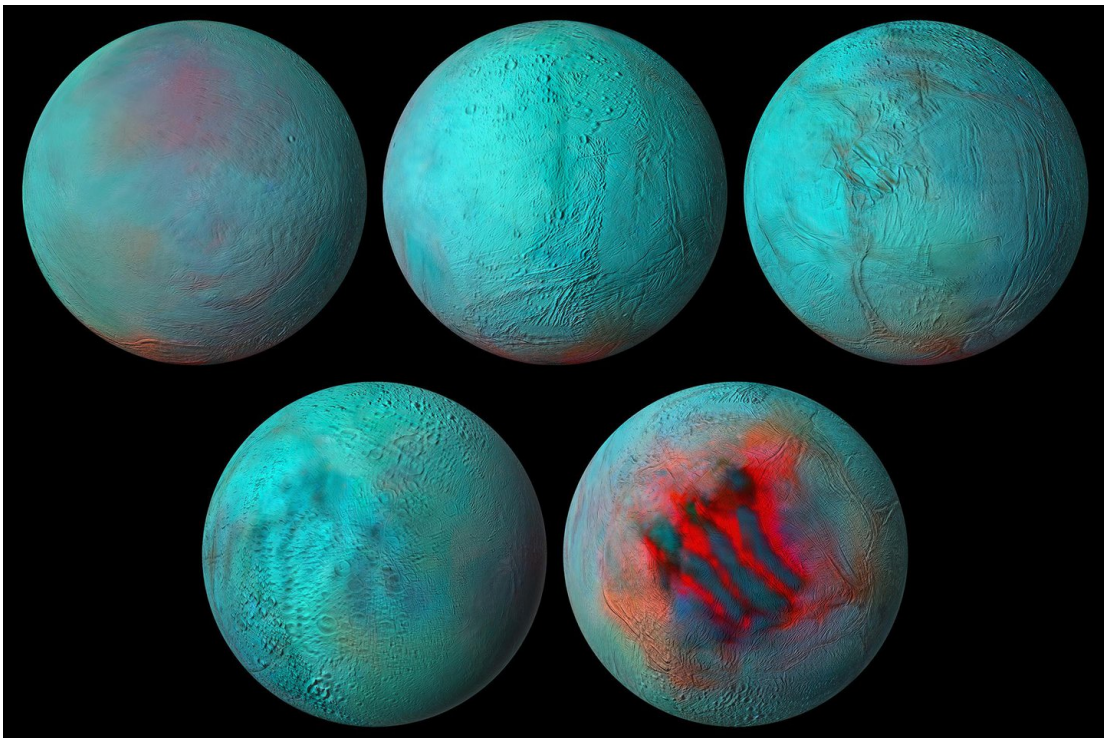
Figura 2.3: As Listas de Tigre mostrando a dinâmica ativa dos gêiseres no polo sul.



Fonte: NASA/JPL (2015).

Devido a essa fonte de calor, fissuras são geradas na superfície, conhecidas como Listas de Tigre, que apresentam uma coloração azul devido aos jatos de vapor de água, poeira e gelo lançados para fora da atmosfera do corpo celeste (Porco, 2014), conforme observado na figura 4. O material proveniente da região das Listas de Tigre que consegue vencer a força da gravidade é depositado nos anéis E, na parte exterior do anel A dos magníficos anéis de Saturno (Farrelet, 2008), observado na figura 2.4. Além disso, essa lua desempenha um papel fundamental na configuração da magnetosfera e na conexão com o anel E.

Figura 2.4: Colagem de cada lado de Saturno, mostrando a diferença do polo sul e norte de Enceladus evidenciando as Listas de Tigre.



Fonte: Nasa/JPL (2017).

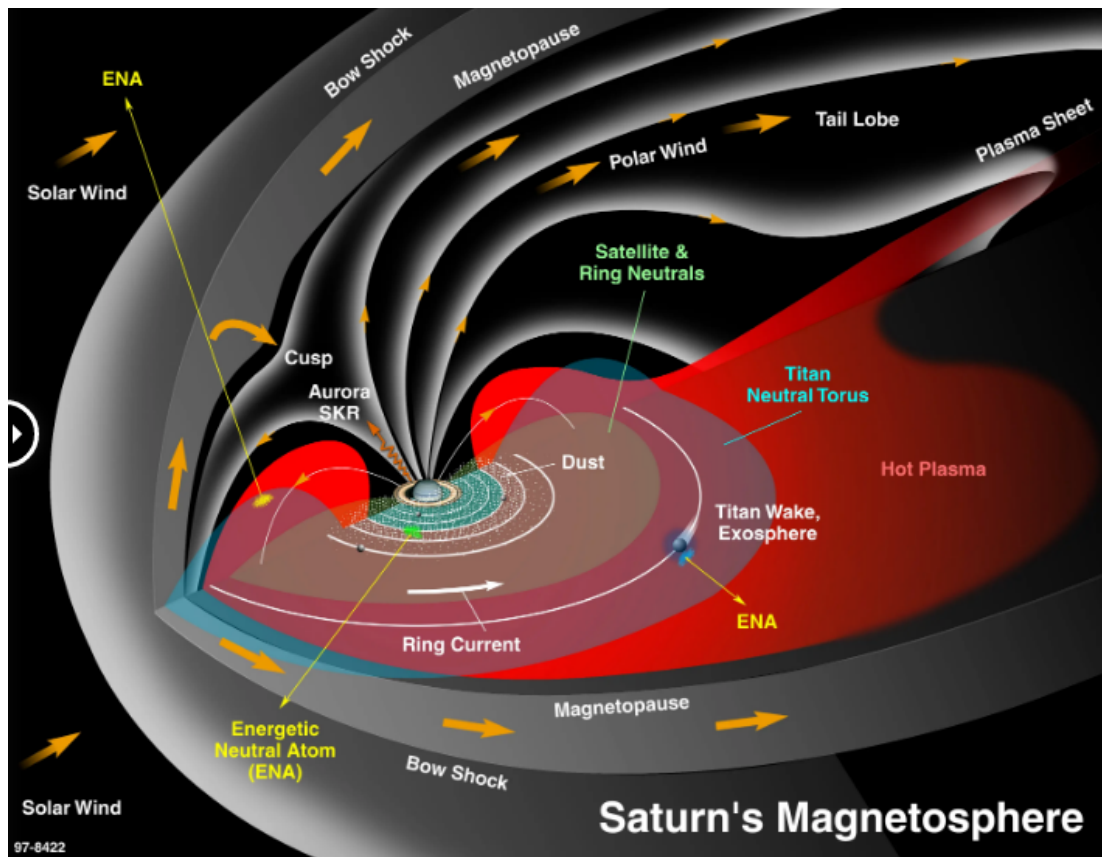
2.2. Introdução a magnetosfera de Saturno

Saturno, assim como todos os planetas do sistema solar, sofre a influência do Sol, e um dos fenômenos decorrentes é o vento solar. Esse vento parte da coroa solar, carregando o campo magnético do Sol a uma velocidade de aproximadamente 400 km/s, sendo classificado como vento lento. Quando esse vento encontra um corpo eletromagnético, forma-se uma cavidade conhecida como magnetosfera (E. Echer, 2011). Essas partículas de plasma envolvem todo o meio interplanetário, e devido à configuração magnética,

quando cruzam com um corpo celeste de alta densidade, o vento é desacelerado de supersônico para subsônico e excluído da região de interação. No entanto, isso não ocorre completamente, sendo redirecionado ao redor do planeta devido à relação entre a velocidade (energia cinética) pelas linhas do "congelamento" do plasma e a pressão de onda planetária, o que cria uma frente de choque (E. Echer, 2011).

A magnetosfera saturniana sofre uma deformação que consiste em ser esticada na região da cauda do lado noturno e comprimida na região da frente de choque no lado diurno. Atualmente, é utilizado como um modelo comparativo da magnetosfera terrestre. Saturno também possui um campo magnético dipolo com os eixos alinhados com o eixo rotação do planeta, similar ao da Terra. A figura 2.5 mostra a dimensão e a divisão da atmosfera saturniana.

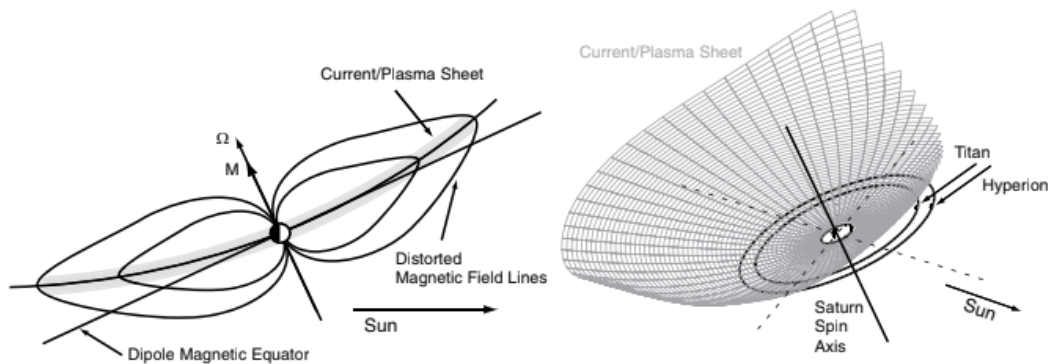
Figura 2.5: Magnetosfera de Saturno.



Fonte:MIMI/NASA-JPL (2009).

No entanto, em contraste com a Terra, a magnetosfera de Saturno possui um meio disco, onde essa distorção é maior, principalmente nos flancos do amanhecer e no lado noturno (Arridge, 2008), ao contrário da Terra, que não possui um meio disco e possui uma distorção bem reduzida. Essa distorção é formada acima da linha do equador, onde a magnetosfera é dobrada entre 15 Rs e 30 Rs (Arridge, 2008), sendo denominada corrente de Tigela, ilustrada na figura 2.6. Vale destacar que esse meio disco aparece ao meio-dia ou à meia-noite, quando a pressão do vento solar é menor.

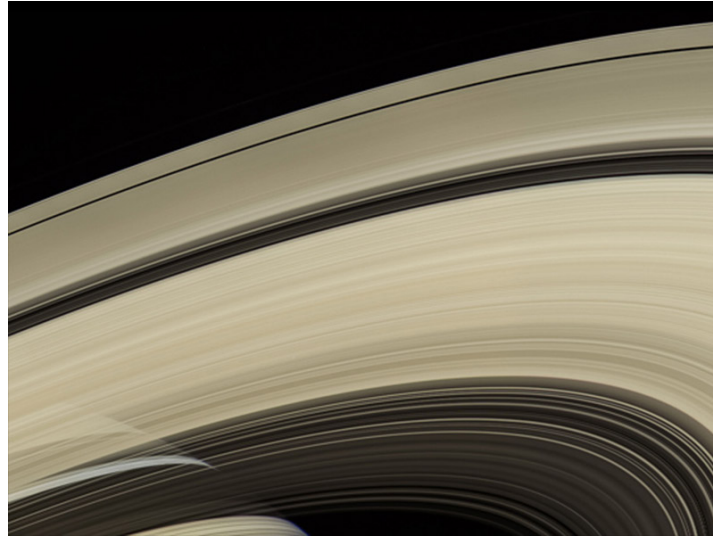
Figura 2.6: Corrente de Tigela.



Fonte: Arridge (2008).

Outro aspecto diferenciador em relação ao planeta Terra são os grandes anéis de Saturno, que afetam suas propriedades e se organizam de acordo com a divisão de densidade dos íons. Destacam-se os anéis A e B, que influenciam a magnetosfera interna do planeta, produzindo ionização por meio da liberação de moléculas neutras de água, gás e gelo. Isso ocorre devido à relação entre a densidade eletrônica e a densidade dos anéis (Tokar, 2005). A figura 2.7 mostra os anéis saturnianos capturados pela espaçonave Cassini-Huygens.

Figura 2.7: Anéis de Saturno pela espaçonave Cassini-Huygens.



Fonte: NASA/JPL (2007).

No contexto da magnetosfera de Saturno, esta é composta por correntes elétricas convectivas, ondas de plasma, emissões de rádio e a interação dos anéis e satélites gelados com o vento solar. Esses elementos constituem a configuração do sistema saturniano. Além disso, a magnetosfera interna é dominada por íons do grupo água e íons H^+ , influenciados pela ionosfera e por Enceladus, que contribuem para o revestimento das camadas interna e externa da magnetosfera.

A ionização dos gases do grupo água, que desempenha um papel importante, estende-se até a magnetopausa no lado diurno (McAndrews, 2008). Prosseguindo, a magnetopausa está localizada dentro da magnetosfera interna, logo após a frente de choque. Ela é responsável pela divisão entre o plasma planetário e o vento solar. Essa descontinuidade é equilibrada pelo campo magnético planetário e pela pressão do plasma do vento solar.

Outra corrente interessante é a corrente de anel, similar à presente no planeta Terra. Nesse caso, a corrente é formada pelas linhas do campo magnético e está situada dentro dos anéis. Seu tamanho depende das dimensões da magnetosfera. Essa corrente atua como geradora de um campo magnético, possibilitando o aumento da energia do plasma

(Connerney, 1983), podendo também intensificar-se no lóbulo do campo magnético até atingir seu máximo de expansão, saindo das órbitas de Reia e Titã.

Quanto à sua configuração, ela está diretamente ligada ao azimute, sendo influenciada pela expansão ou retração da magnetopausa (Bunce, 2007). Em contrapartida, o planeta Terra não apresenta essa modulação na rotação, o que difere do sistema saturniano. Além disso, a natureza e o tamanho das correntes convectivas também são distintos. Outro fator de antagonismo em relação à corrente de anel é o estiramento ou puxamento das linhas do campo magnético dentro dessa cavidade.

Dentro da magnetosfera interna, é possível encontrar um cinturão de radiação, uma região que percorre toda a magnetosfera em formato de toróide, onde íons de alta energia e elétrons são aprisionados. Essa dinâmica é semelhante à que ocorre na Terra, mas em Saturno existem algumas peculiaridades. Uma delas é a absorção desses íons energéticos e elétrons quentes, não apenas pelos anéis, mas também pelas luas geladas que orbitam o planeta. Isso é particularmente evidente em Enceladus, que atua como uma fonte fria devido à sua grande porcentagem de água, gás e vapor de água (Connerney, 1983).

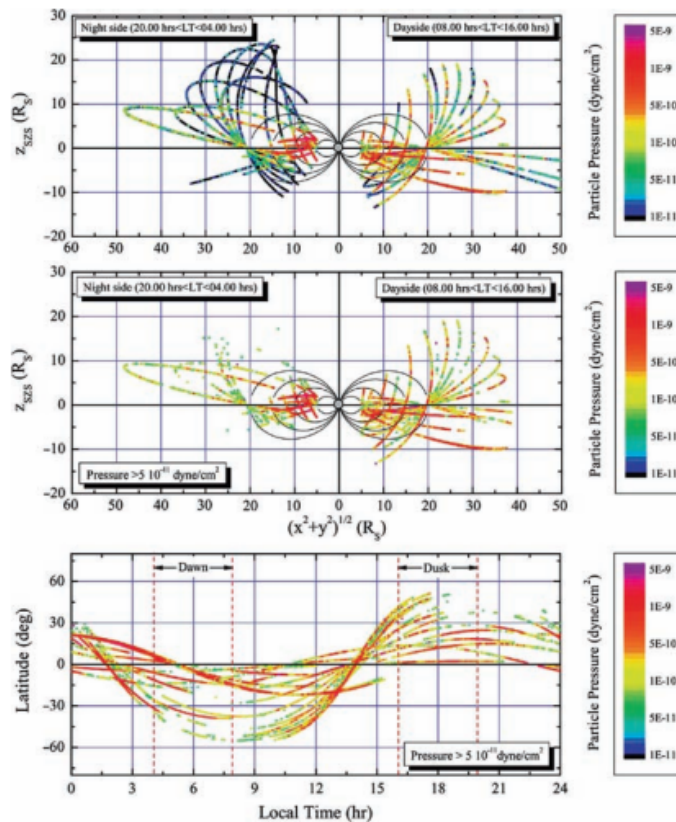
Essa interação provoca uma escassez desses íons devido ao processo de troca de cargas, resultando na perda de energia para essas fontes frias, o que é conhecido como "injeções". Essa propriedade desempenha um papel crucial no transporte de partículas dentro da magnetosfera (Connerney, 1983). No complexo sistema de Saturno, surge ainda o fenômeno do cinturão de Dione, originado da lua Dione, que contribui para o enfraquecimento dos íons energéticos presentes no cinturão de radiação.

A magnetosfera é dividida em dois lados distintos. No lado noturno, encontra-se a cauda magnética, bem como a lâmina de plasma que coexiste. A lâmina de plasma é um limite que corta a cauda ao meio, separada pelos lóbulos nos hemisférios norte e sul. Essa folha de plasma é uma descontinuidade formada pela densidade do plasma (Arridge, 2008). No entanto, os efeitos gerados por essa folha de plasma são menos evidentes no lado diurno, estendendo-se até a magnetopausa. Essa expansão espacial, juntamente

com a estrutura da pressão do plasma, foi observada pela missão Cassini.

Essa região é composta por íons H^+ de menor energia, que estão mais concentrados no equador, e íons W^+ de maior energia, os quais constituem uma parte significativa do plasma e podem ter propriedades variáveis (Arridge, 2008). Além disso, a figura 2.8 apresenta um perfil de pressões da folha de plasma, onde a dimensão Z separa os lados da magnetosfera, sendo o lado diurno à direita e o lado noturno à esquerda (McAndrews, 2009). Esse perfil visa mostrar a variação dos íons (painel superior) e elétrons (painel inferior).

Figura 2.8: Representação de densidade da folha de plasma.



Fonte:Krimigis (2007).

Simultaneamente à interação do vento solar, o vento interno e as linhas de campo magnético, forma-se uma cauda magnética no lado noturno do envelope de plasma.

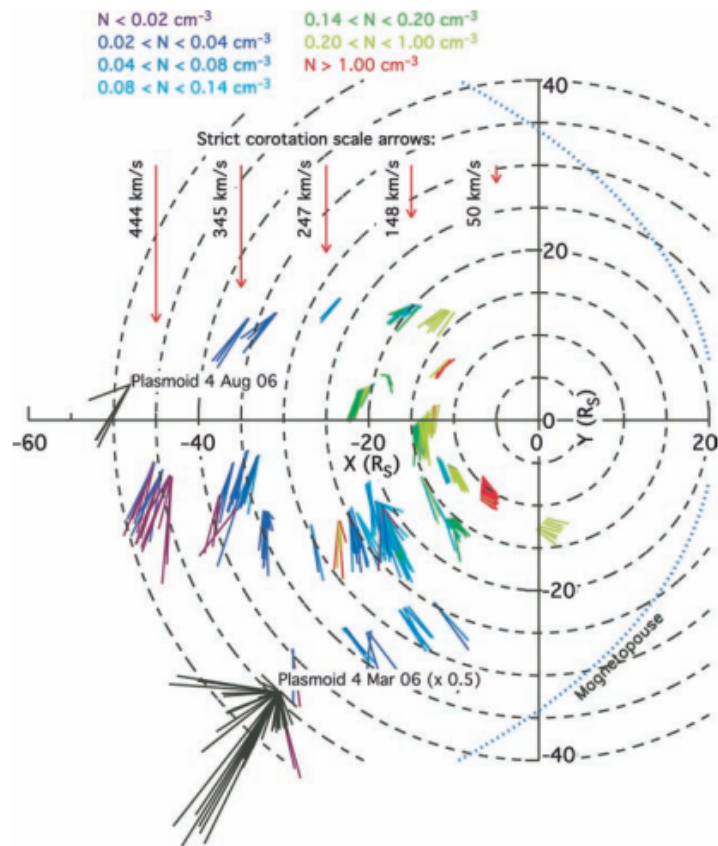
Essa cauda é arrastada pelas linhas do campo magnético de Saturno (IMF) e pelo vento solar, influenciando a magnetosfera. Essas linhas de campo desempenham um papel crucial na transferência de fluxo entre as duas extremidades da magnetosfera.

Vale ressaltar que a força do campo é reduzida nos lóbulos da lâmina de plasma, onde há um fluxo aberto em relação ao campo magnético do vento solar (IMF) e à ionosfera de Saturno. Ambos estão separados nas extremidades da mesma camada (Arridge, 2008).

De acordo com Khurana (2009), um modelo sugere uma inclinação na lâmina de plasma, formada pela configuração da interação das linhas de campo do plasma congelado com o corpo planetário. Essa inclinação é de cerca de 12 a 15 Rs. Outro evento analisado pelo fluxo de coroação é o derretimento do material interno, sendo levado para o lado diurno devido à atração da ionosfera (McAndrews, 2009).

Além disso, a espaçonave Cassini revelou um fator intrigante: a perda de plasma devido à reconexão magnética, resultando na explosão dos plasmídeos presentes no campo (Jackman et al. 2007). Isso leva a um clareamento das emissões neutras de átomos energéticos (ENA), sendo esses brilhos relacionados à injeção de energia das partículas da magnetosfera interna de Saturno (SKR) pelo forte brilho proveniente da radiação. Esses plasmídeos são observados na figura 2.9 e estão localizados após a região da plasmopausa. Esse espaço compreende um intervalo entre a magnetopausa e a lâmina de plasma.

Figura 2.9: Fenômeno de embranquecimento da cauda.



Fonte: McAndrews (2009).

Na magnetosfera da Terra, de maneira oposta, o único processo similar é a formação da magneto-cauda e o "derretimento" do plasma interno, representando dinâmicas distintas. Portanto, a dinâmica da magnetosfera saturniana é bastante complexa e repleta de diferenças em relação à magnetosfera terrestre. Embora possuam algumas similaridades, é evidente que os comportamentos não são os mesmos.

3. INSTRUMENTAÇÃO

3.1. Espaçoave Cassini-Huygens

A espaçoave Cassini-Huygens foi projetada em uma colaboração entre as agências espaciais NASA, ESA e ASI, com o objetivo de explorar o meio interplanetário, com ênfase no sexto planeta do sistema solar, Saturno. A missão tinha como finalidade

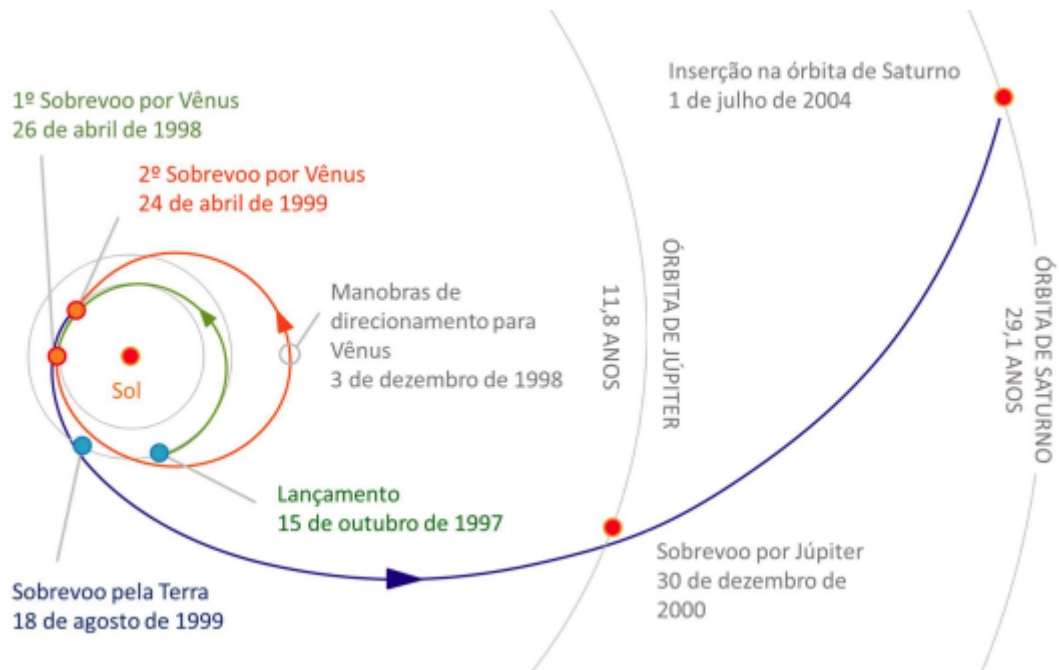
ampliar o entendimento sobre a composição do planeta e seus fenômenos, incluindo os anéis, luas geladas e sua magnetosfera, que ainda não haviam sido completamente observados. Os objetivos da missão eram variados e abrangiam diversos aspectos do sistema saturniano. No que se refere ao planeta Saturno em si, a Cassini-Huygens tinha o propósito de observar sua estrutura, composição atmosférica, ionosfera, ventos, temperatura de Titã, composição e distribuição de gases, bem como a superfície atmosférica.

No que se refere às luas geladas, o foco da missão estava na análise das características geológicas, composição da superfície, estrutura interna e suas interações com a magnetosfera. Também estava interessada em compreender os mecanismos que levavam à modificação da superfície dessas luas. A missão também se dedicou ao estudo da estrutura da magnetosfera de Saturno, investigando as correntes elétricas, a dinâmica planetária, os sumidouros de partículas, a interação com o vento solar e os efeitos da interação entre os anéis e a lua Titã com o vento solar. Esses eram os principais focos dos pesquisadores no que dizia respeito à magnetosfera saturniana.

A Cassini-Huygens foi lançada em outubro de 1997, sendo transportada pelo foguete IVB-Centaur saindo de Cabo Canaveral na Flórida (EUA). Durante sua jornada, a sonda realizou diversas etapas importantes. Em 1999, a Cassini sobrevoou Vênus (Matson, 2002), e no ano 2000, atravessou o cinturão de asteroides. Finalmente, em julho de 2004, a Cassini alcançou a órbita de Saturno, tornando-se a primeira espaçonave a entrar na órbita do gigante dos anéis. Em janeiro de 2005, a sonda Huygens, parte da missão Cassini-Huygens, fez história ao se tornar a primeira espaçonave a pousar em um objeto dentro do sistema saturniano.

Apesar de a Cassini ter inicialmente concluído sua missão, seu período operacional foi estendido até o ano de 2017. A figura 3.1 ilustra a trajetória da sonda e sua chegada a Saturno.

Figura 3.1: Jornada até o planeta Saturno.



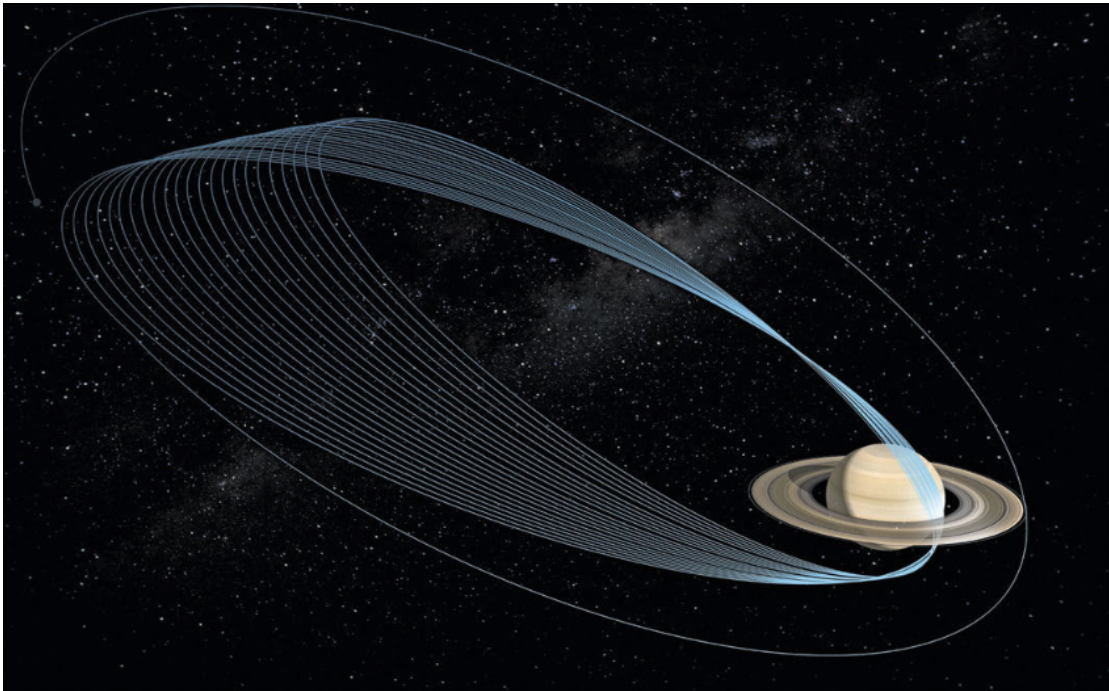
Fonte: J. D. Anderson (2008)

Durante o período de 2004 a 2017, a Cassini orbitou o planeta Saturno, concentrando-se na coleta de dados científicos sobre o sistema saturniano. Sua missão científica tinha como objetivo realizar uma série de observações e descobertas. Ao término de sua jornada, a sonda foi direcionada para adentrar a densa atmosfera de Saturno, o que ficou conhecido como "Grand Finale".

Em apoio às inúmeras descobertas obtidas pela espaçonave, a NASA optou por encerrar a missão de forma impressionante. A sonda Cassini foi direcionada a entrar na densa atmosfera saturniana, proporcionando imagens espetaculares de Saturno e seus anéis, na figura 3.2 mostra as órbitas da nave. Em setembro de 2017, durante sua última órbita, a sonda esgotou seu combustível e, após adentrar os gases densos da atmosfera, sua superfície foi progressivamente consumida, encerrando sua jornada de exploração. Esse evento, conhecido como "Grand Finale", marcou um acontecimento histórico para a

evolução científica, consolidando a missão Cassini como uma conquista notável.

Figura 3.2: Representação das órbitas feitas pela espaçonave.



Fonte:NASA/JPL (2017)

A sonda Cassini contava com 12 instrumentos científicos, enquanto a Huygens possuía 6, totalizando 18 equipamentos científicos. Esses instrumentos foram essenciais para revolucionar a compreensão da complexidade do sistema saturniano. Entre eles, incluíam-se sensores remotos e dispositivos para detectar a direção de diferentes fenômenos e propriedades.

Esses equipamentos permitiram a coleta de uma vasta gama de dados e informações sobre Saturno, suas luas e seus anéis, resultando em uma mudança substancial em nosso conhecimento sobre esse sistema planetário único. As tecnologias avançadas a bordo da Cassini-Huygens abriram novas perspectivas para a pesquisa científica e contribuíram significativamente para o avanço do entendimento da astrofísica e da exploração espacial.

3.2. Instrumentos de campo e de partículas

Nesta seção, vamos explorar em mais detalhes os equipamentos científicos de relevância para essa pesquisa. A bordo da sonda Cassini, foram instalados instrumentos de sensoriamento óptico e remoto de rádio, bem como dispositivos para medir as partículas do campo, observando a sonda na figura 3.3. Dois dos aparelhos usados como bússola nessa exploração eram o magnetômetro (MAG) e o espectrômetro de plasma Cassini (CAPS), que possibilitam a medição das partículas em movimento.

Figura 3.3: Espaçonave Cassini-Huygens.



Fonte: NASA/JPL (1999).

O magnetômetro (MAG) desempenhava um papel fundamental ao mapear e analisar o campo magnético de Saturno. Esse equipamento fornece informações valiosas sobre a intensidade e a direção do campo magnético, permitindo uma compreensão mais profunda da interação entre o planeta e sua magnetosfera.

Por outro lado, o espectrômetro de plasma Cassini (CAPS) era essencial para a análise das partículas em movimento na magnetosfera saturniana. Esse instrumento possibilita a identificação e caracterização das partículas carregadas presentes no ambiente espacial ao redor de Saturno, contribuindo para a compreensão das complexas interações entre o planeta, suas luas e o vento solar.

Esses equipamentos, juntamente com os demais instrumentos científicos a bordo da sonda Cassini-Huygens, foram a base para uma ampla gama de descobertas que revolucionaram nossa compreensão do sistema saturniano e expandiram os horizontes da exploração espacial

3.3 . Magnetômetro (MAG)

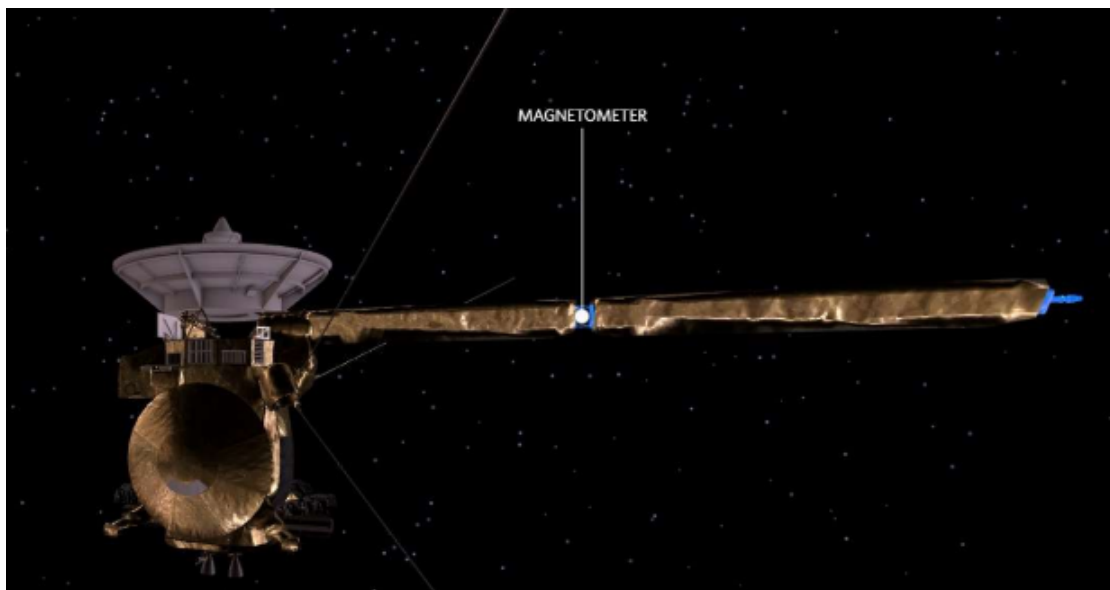
O instrumento conhecido como magnetômetro (MAG) desempenhou um papel crucial durante a missão Cassini-Huygens. Essa ferramenta era comparável a uma bússola altamente precisa e sensível, capaz de registrar tanto a direção quanto a intensidade do campo magnético enquanto a sonda percorria o sistema saturniano. Essas medições foram realizadas em várias regiões da magnetosfera, visando proporcionar uma compreensão abrangente dos dados relacionados ao planeta, à magnetosfera, aos anéis e suas luas.

Essas medições detalhadas foram essenciais para a obtenção de valiosos conhecimentos sobre a complexa interação entre Saturno e sua magnetosfera. Os dados coletados pelo magnetômetro permitiram que os cientistas produzissem modelos em três dimensões dessa cavidade magnética(Dougherty, 2002). Esses modelos levaram em consideração uma variedade de fatores, incluindo as influências das luas, anéis, poeira e gás presentes no ambiente saturniano.

Esses esforços contribuíram significativamente para a compreensão das características do campo magnético de Saturno e suas interações com os elementos circundantes, enriquecendo nossa visão sobre o sistema planetário e sua dinâmica.

Devido à sensibilidade e delicadeza do magnetômetro, foi adotada uma abordagem cuidadosa para evitar qualquer interferência da espaçonave. Para garantir resultados precisos, foi incorporado um braço mecânico de 11 metros de comprimento chamado "mag boom" (Dougherty, 2002) demonstrado na figura 3.4. Esse braço permitiu que os magnetômetros fossem posicionados a uma distância adequada da sonda, assegurando que as medições não fossem afetadas pelas influências da própria espaçonave.

Figura 3.4: Magnetômetro (MAG)



Fonte: NASA/Jet Propulsion Laboratory (2017)

Através dessas medidas de precaução, os cientistas puderam obter leituras mais confiáveis e precisas do campo magnético em torno de Saturno. Esses dados reforçaram a singularidade do sistema saturniano e também tiveram implicações significativas. Além de contribuir para nossa compreensão geral do sistema, as observações realizadas com o aparelho ajudaram a confirmar a presença de um oceano de água líquida sob a superfície de Encélado. Esse fato foi uma descoberta notável que ressalta ainda mais a

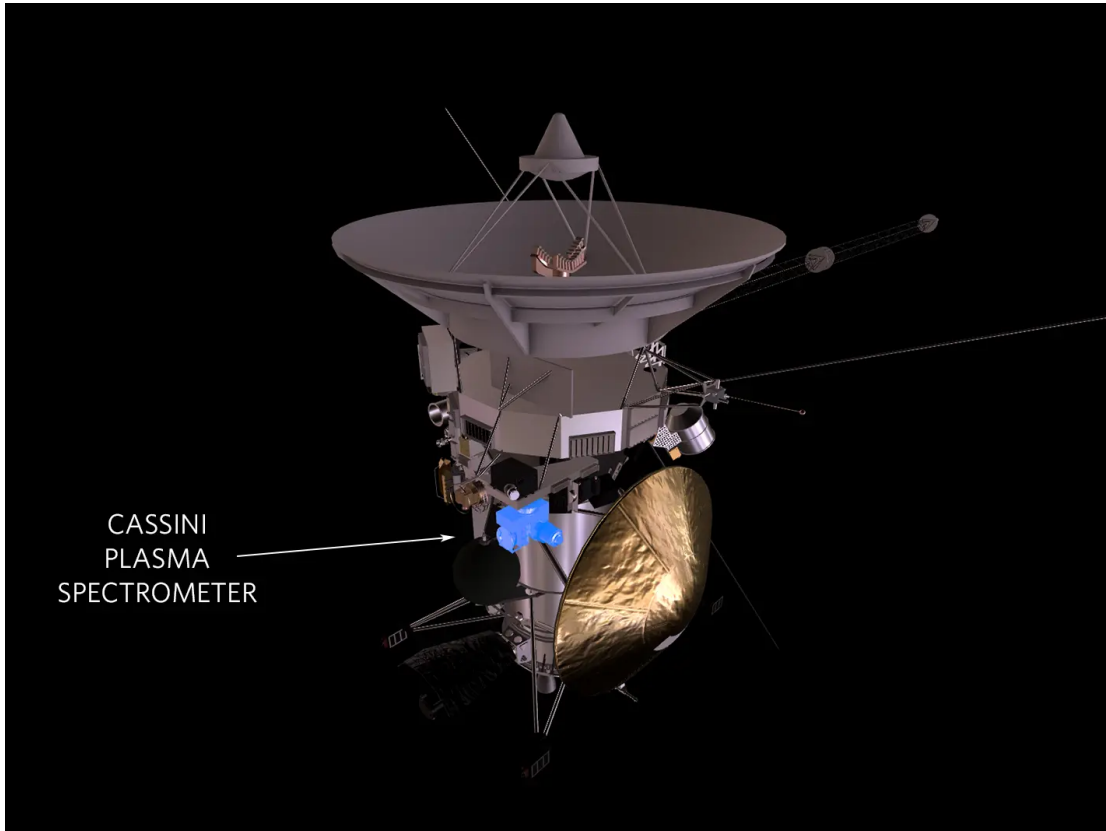
complexidade e diversidade do sistema de Saturno.

3.4. Espectrograma de plasma Cassini (CAPS)

Além das contribuições mencionadas anteriormente, o espectrômetro de plasma Cassini (CAPS) desempenhou um papel fundamental sobre o ambiente ao redor de Saturno. Equipado com sensores de elétrons e massa de íons, além do feixe de íons duplo, esse instrumento tinha a capacidade de medir a energia cinética das partículas e a direção em que elas estavam se movendo no meio interplanetário e planetário (Young, 2004).

Por meio das medições realizadas pelo CAPS, a sonda explorou diversas regiões de interesse e coletou uma quantidade significativa de dados relacionados a íons e elétrons. Esses dados foram essenciais para revelar a composição, temperatura e densidade dos íons na magnetosfera de Saturno. O espectrômetro de plasma CAPS permitiu a coleta de amostras de partículas carregadas, o que, por sua vez, auxiliou na compreensão da composição dos íons presentes na magnetosfera (Young, 2004) em sequência segue a figura 3.5. na qual representa o instrumento CAPS

Figura 3.5: Espectrômetro de plasma



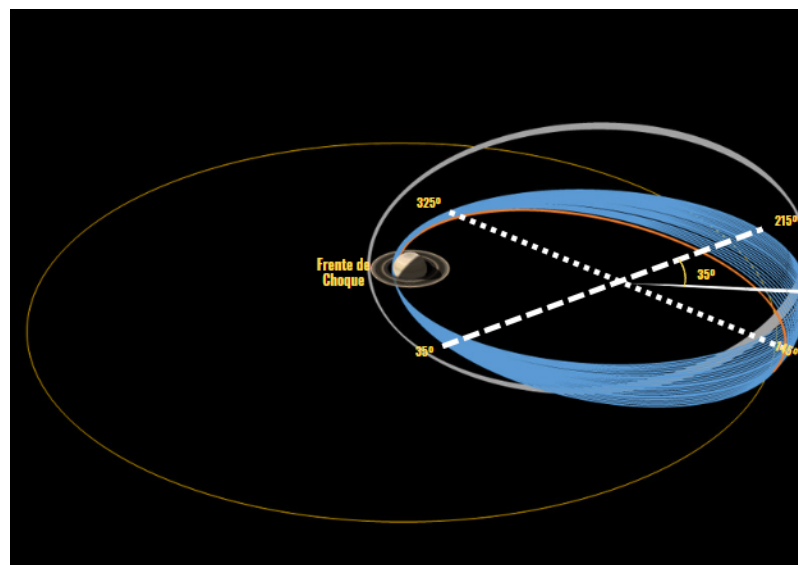
Fonte: NASA/Jet Propulsion Laboratory (2017)

Essa abordagem possibilitou a identificação das fontes de plasma na magnetosfera, contribuindo para um entendimento mais profundo das complexas interações que ocorrem no sistema saturniano. As informações obtidas pelo CAPS desempenharam um papel crucial na caracterização e análise do ambiente espacial ao redor de Saturno, adicionando mais uma camada de conhecimento à missão Cassini-Huygens.

4. RESULTADOS

Nesta sentença serão tratados os resultados obtidos nesse projeto. Mas, para que fosse possível o processamento de dados neste estudo foi necessário separar a órbita em 4 sessões pois os dados selecionados são de 1 de julho de 2004 até o dia 15 de setembro de 2017, ou seja 13 anos de dados. Para ser possível foi preciso dividir em setores a órbita da espaçonave com o intuito de demonstrar em que regiões da magnetosfera a Cassini passou. Sendo assim os dados foram cortados semelhante a elipse a figura 4.1. em quatro sessões e processadas separadamente.

Figura 4.1: Ilustração da órbita da Cassini-Huygens.



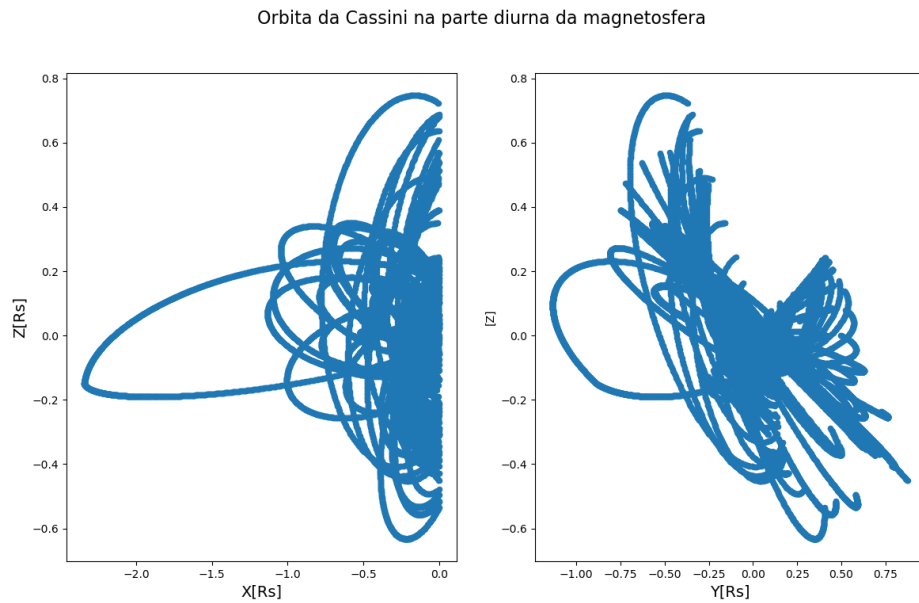
Fonte: Adaptado NASA/JPL-Caltech (20017)

4.1 Órbita na Frente de Choque

Sabendo que a Cassini percorreu inúmeras vezes sobre o planeta Saturno, o seu arsenal de dados e informações são bem vastos para que fosse possível catalogar quando a sonda passou pela região diurna, fiz com que a separação dos dados por meio do ângulo

de divisão. Então para conseguir plotar essa região da frente de choque foi necessário separar em bandas referente a latitude do planeta em questão. Com isso, entre os ângulos 325° e 35° foi possível catalogar a órbita nesse curto período demonstrado na figura 4.2.

Figura 4.3: Órbita da Cassini na Frente de Choque

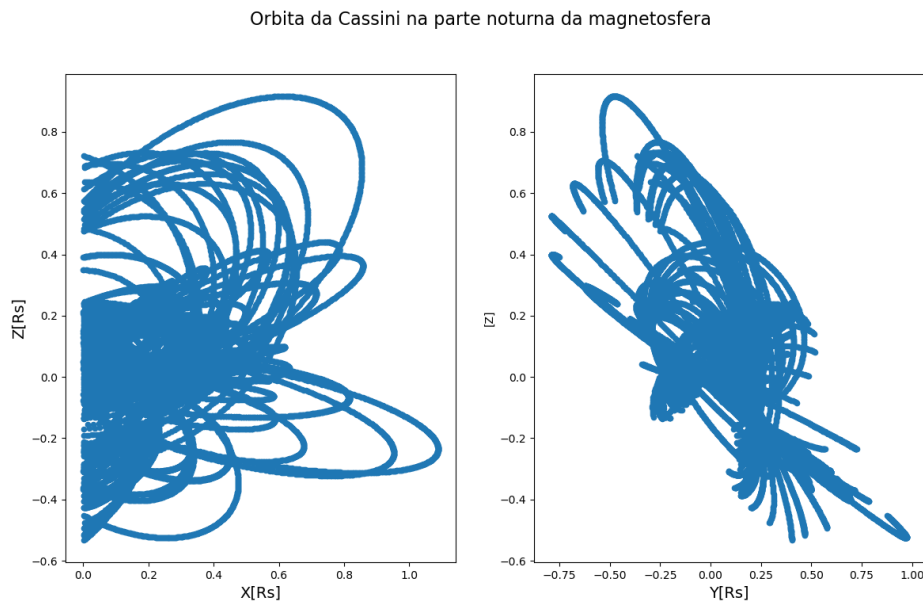


Fonte: Produção do autor

4.2. Órbita na Cauda Magnética

Semelhante a parte anterior, para que o mapeamento da órbita na região conhecida como cauda magnética foi feito também um corte de dados para que a representação fosse possível. Usando esse método de divisão em 4 setores por meio dos ângulos da elipse com isso, essa região foi representada pelos dados obtidos correspondentes aos graus 145° até 215° na latitude da magnetosfera. Além disso, entre a região da cauda é formado ao um ângulo de 70° ao leste sendo representado na figura 4.3.

Figura 4.3: Cassini passando pela cauda da magnetosfera.



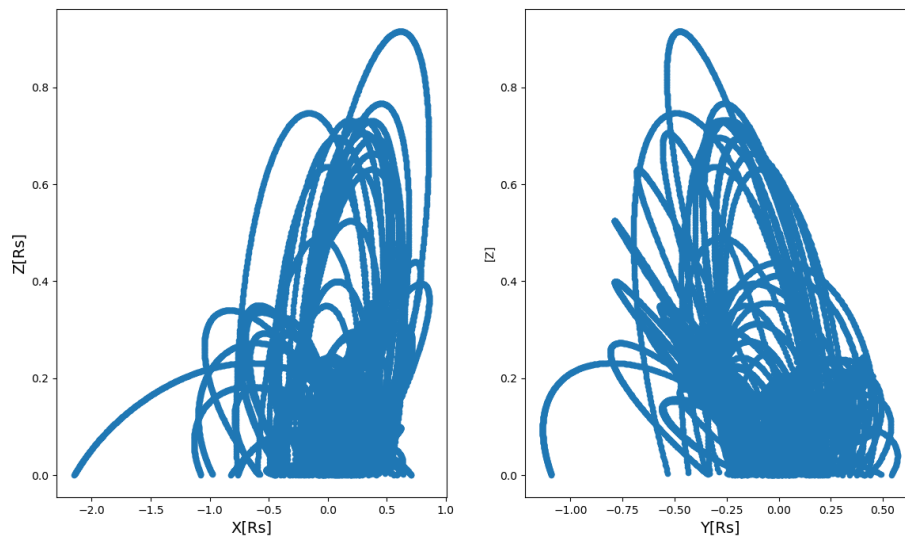
Fonte: Produção do autor

4.3. Órbita no Hemisfério Norte

Seguindo para a terceira divisão dos dados captados pelos equipamentos da sonda, essa região é a representação da passagem no pólo norte da magnetosfera do planeta Saturno. Os ângulos que representam a quantidade de dados obtidos em 13 anos da espaçonave sendo correspondidos pelos ângulos 215° até 325° e assim formando um ângulo de 110° e em sequência a cartografia na figura 4.4 deste local do pólo norte sendo um parâmetro para essa região a longitude.

Figura 4.4: Passagem da Cassini pelo polo norte.

Orbita da Cassini no hemisferio norte da magnetosfera



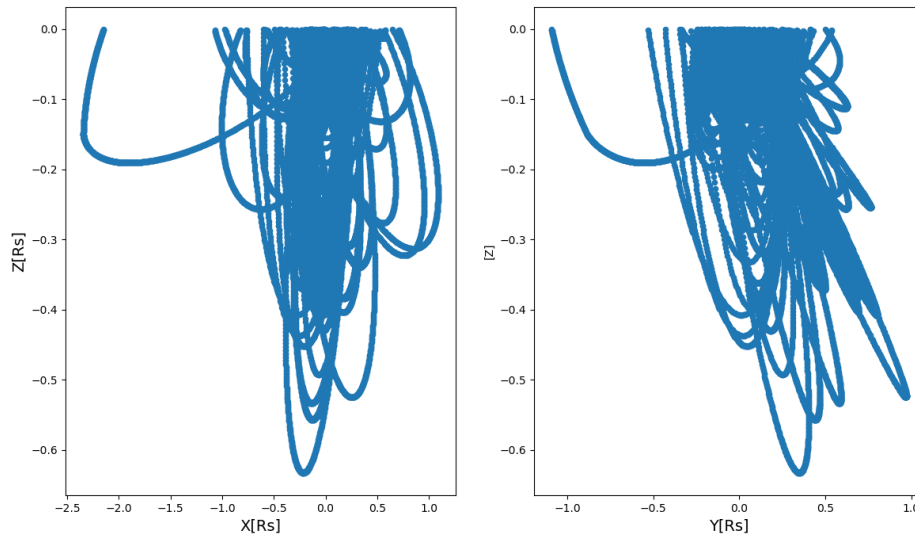
Fonte: Produção do autor

4.4 Órbita no Hemisfério Sul

Nessa quarta parte sendo localizada na região do polo sul do planeta, os dados do hemisfério sul são representados pelos ângulos entre 35° e 145° formando também um ângulo de 110° . Com isso os dados selecionados entre a gama de informações obtidas como as outras 3 sessões para que finalmente fosse possível observar a órbita completa da Cassini-Huygens. A seguir a demonstração da região do hemisfério sul na figura 4.5. e em seguida na figura 4.6 a órbita completa de saturno no ano de 2010.

Figura 4.5: Cassiane sobrevoando o polo sul de Saturno

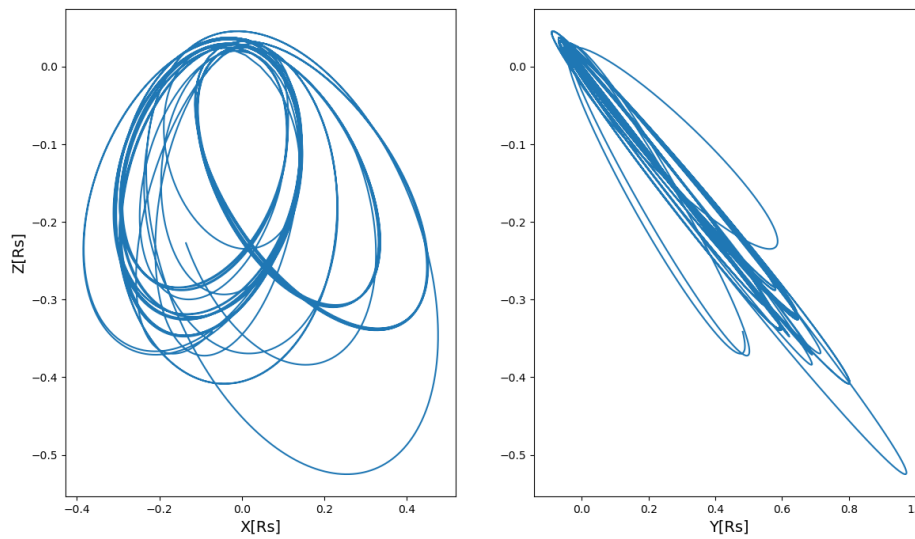
Orbita da Cassini no hemisferio sul da magnetosfera



Fonte: Produção do autor

Figura 4.6: A elipse formada pela rotação da espaçonave no ano de 2010.

Orbita da Cassini para o ano de 2010



Fonte: Produção do autor

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, notou-se as fantástica configuração e dinâmica da magnetosfera saturniana e as suas relações de interação com o vento solar como também a relação não apenas o vento solar na magnetosfera como nas luas e anéis e a relação dos anéis e luas com o próprio planeta saturno. Percebi que a interação do vento solar interfere com a dinâmica da magnetosfera seja como essa a pressão exercida, a temperatura ou a variação do tamanho da magnetosfera.

Além disso foram absorvidos os conceito introdutórios de física de plasma, eletromagnetismo e termodinâmica tendo o foco em campo magnético e a suas interações com o plasma presente no meio interplanetário.

Ademais a isso o conhecimento sobre a sonda Cassini-huygens e a sua trajetória e estudos, descobertas e muita informação sobre esse novo mundo que é o sistema saturnino e portanto único.

para concluir referente a trabalhos futuros a espaçonave tem um arsenal gigante de dados chegando impossível trabalhos em um único ano de iniciação científica possibilitando ainda um melhor aprofundamento dentro da dinâmica da magnetosfera saturnina em diferentes variações do vento solar

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Kallenrode M.B., **Space Physics: An Introduction to Plasmas and Particles in the Heliosphere and Magnetospheres**. Springer Verlag Berlin Heidelberg 2004. ISBN 978-3-642-05829-5

Echer E., **Magnetosferas planetárias** (Planetary magnetospheres) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José e dos Campos, SP, Brasil
Publicado em 17/1/2011. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 32, n. 2, 2301. 2010.

Michele K. Dougherty; Larry W.; Stamatios E. M. K., **Saturn from Cassini-Huygens**. Springer.B.V. 2009. ISBN 978-1-4020-9216-9 e-ISBN 978-1-4020-9217-6 DOI 10.1007/978-1-4020-9217-6

Costa E. Jr.; Simões, F.J.; Cardoso R.Jr; M.V. A. **O vento solar e a atividade geomagnética**. Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Preto, MG, Brasil. Departamento de Física, Fundação Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil. Laboratório Associado de Plasma, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil Recebido em 13/12/2009; Aceito em 13/6/2010; Publicado em 21/11/2011. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 4, 4301 (2011)

Martins. F.M. **Cassini-Huygens: A Sonda Espacial que Mudou a Compreensão Sobre Saturno e Suas Luas Geladas Titã e Encélado**. Physicae Organum, v. 8, n. 2, p. 1-24, Brasília, 2022. Instituto de Física - Universidade de Brasília, UnB, 70910-900, Brasília, Brasil

Silva. F .H. M. **Luas Geladas de Saturno Titã e Encélado: Descobertas Obtidas pela Sonda Espacial Cassini-Huygens.** UNB Brasília 2021.

Young D. T., et al., **Cassini Plasma Spectrometer Investigation. In The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations** (C. T. Russel), Springer, 2004.

Slipher, V. M. A **photographic study of the spectrum of Saturn.** *Astrophys. J.* 26, 59–62 (1905)Slipher, V. M. A photographic study of the spectrum of Saturn. *Astrophys. J.* 26, 59–62 (1905)

Sittler, E. C., Ogilvie K. W., e Scudder J. D., **Survey of low energy plasma electrons in Saturn’s magnetosphere: Voyagers 1 and 2.** *J. Geophys. Res.* 88, 8847–8870, 1983.

Lopes R. M. C., et al., **A Global Geomorphologic Map of Saturn’s Moon Titan,** *Nat Astron.*, 4: 228–233, 2020.