

ESTUDO DAS CAUSAS DA QUEDA DOS SATÉLITES STARLINK EM FEVEREIRO DE 2022

Leonardo Pedreira Molliet (IC) e Dr. Paulo J. A. Simões (Orientador)

Apoio: PIBIC CNPq

Resumo

RESUMO

Em 03/02/2022, a SpaceX lançou um foguete Falcon-9 carregando 49 satélites comerciais Starlink. Os satélites foram injetados em órbita de 210 km, onde eles permaneceriam até serem posicionados em sua órbita de operação a 450 km de altitude. Após quatro dias na órbita temporária, 40 dos satélites lançados reentraram na atmosfera terrestre. Atividade solar de níveis moderados foi reportada, e apontada como a causa da queda dos satélites. Este evento chamou atenção para a relevância dos efeitos da atividade solar e do clima espacial no nosso planeta e nossas atividades espaciais. Buscamos identificar os fatores que tiveram maior influência para o aumento da densidade na alta atmosfera, especificamente, tempestades geomagnéticas ou radiação solar direta. Tempestades geomagnéticas podem causar o aumento da intensidade das correntes elétricas na alta atmosfera e, devido ao subsequente aquecimento Joule e expansão térmica da atmosfera, podem causar o aumento da densidade na altitude da órbita dos satélites. A radiação direta do Sol nas faixas de ultravioleta e raios X, pode aquecer diretamente a alta atmosfera, causando o mesmo efeito de expansão da atmosfera. Estudamos o clima espacial entre 27/01/2022 e 07/02/2022, comparando a um período de baixa atividade em 2020. Os níveis de radiação estavam mais altos devido à presença de regiões ativas no Sol, mas a ocorrência de explosões solares foi baixa. Da mesma forma, as tempestades geomagnéticas registradas foram pouco intensas e ordinárias. Apresentamos também a modelagem da densidade atmosférica na alta atmosfera sob condições diferentes de atividade solar para completar esta análise.

Palavras-chave: dinâmica orbital; atividade solar; explosões solares; satélites artificiais; clima espacial

Abstract

ABSTRACT

On 03/02/2022, SpaceX launched a Falcon-9 rocket carrying 49 Starlink satellites, deployed at an altitude of 210 km, where they would remain until they were positioned in the operating orbit at approximately 450 km. After four days in the temporary orbit, 40 of the satellites re-entered into the atmosphere. Moderate solar activity was reported during the period, and indicated as the cause of the loss of the satellites. This event drew attention to the relevance of space weather events and their effects on our planet and human space activity. We aim to identify the main factors that influence the density increase in the upper atmosphere, namely, geomagnetic storms or direct solar irradiation. Geomagnetic storms can increase the intensity of electric currents in the high atmosphere and subsequent Joule heating and thermal expansion of the gases, enhancing the density at relevant orbital heights. Direct solar radiation in the ultraviolet and X-ray ranges can directly heat the upper atmosphere, causing the same expansion effect. We analyzed the geomagnetic storm and solar radiation data during the launch and reentry period, from 27/02/2022 to 07/02/2022, comparing to a period of low activity in 2020. We find that the solar radiation levels were high due to the presence of large active regions in the Sun, however, the occurrence of flares was low. At the same time, the recorded geomagnetic storm was also weak and ordinary. We present models of the density of the upper atmosphere under different solar activity scenarios to complement this study.

Keywords: instrumentation; solar activity; solar flares; spectroscopy; space weather.

1 INTRODUÇÃO

O Sol é a estrela ativa que está mais próxima de nós e por sua vez é a que mais se tem estudos sobre. Estudos da atividade solar começaram há muitos séculos, com a contagem das manchas solares. As diversas manifestações da atividade solar e seus efeitos no ambiente espacial da Terra, no entanto, só foram descobertos mais recentemente, há menos de cem anos. Algo que se tornou mais notório foi o estudo da atividade solar e como ela controla diretamente o clima espacial e conseqüentemente afeta o nosso planeta. Influenciando em sistemas de navegação, comunicação de rádio, linhas de transmissão e operações com satélites. Causando blackouts, problemas nos radares de aviões e reentradas de satélites que estão em órbita. É necessário o estudo da física da atividade dados os efeitos em nossa sociedade e cotidiano. Dois agentes da atividade solar podem gerar distúrbios no clima espacial: as tempestades ou explosões solares - irradiação direta do Sol - e perturbações magnéticas no campo geomagnético causadas por ejeções de massa coronal ou pelo vento solar. Tempestades solares são fenômenos originados na liberação de uma enorme quantidade de energia na atmosfera solar. Tais explosões têm duração típicas de minutos a horas, emitindo radiação em praticamente todo o espectro eletromagnético. A radiação, principalmente nas faixas do ultravioleta e raios X, é absorvida na alta atmosfera terrestre, causando um aumento de temperatura e conseqüente expansão da atmosfera (SILVA, 2006).

As ejeções de massa coronal (*coronal mass ejection*, CME) são ejeções de partículas (elétrons, prótons e íons) que são arremessadas para o interplanetário, em uma nuvem magnetizada. Em muitos casos as CMEs podem ser projetadas na direção da Terra e atingir nosso planeta, potencialmente causando as chamadas tempestades geomagnéticas. De forma semelhante, o vento solar - um fluxo de partículas originados no Sol que se espalham pelo meio interplanetário, podem também causar distúrbios no campo geomagnético, dependendo das suas características. Como conseqüência, diversos efeitos em satélites, sistemas de navegação e equipamentos elétricos e eletrônicos de relevância na nossa sociedade e cotidiano, podem ser desencadeados.

As tempestades geomagnéticas são desencadeadas quando o campo magnético de origem solar entra em contato com o campo magnético da Terra. Dependendo da configuração do campo da CME ou vento solar pode ocorrer uma reconexão magnética, permitindo a entrada de energia trazida pela CME ou vento solar no ambiente magnético da Terra. Os distúrbios causados no campo geomagnético alteram as correntes elétricas na alta atmosfera terrestre, causando aquecimento Joule e conseqüente expansão da atmosfera.

1.1 Problema de Pesquisa

Em ambos os casos, tempestades solares e geomagnéticas, existe a possibilidade de um aumento da densidade na alta atmosfera terrestre, chegando até a altitudes acima de 200 km. Satélites artificiais em órbitas baixas - (*low Earth orbits*, LEO) - portanto podem então sofrer um aumento da força de arraste - de resistência contra o seu movimento - devido ao aumento da densidade atmosférica em

suas órbitas. O aumento de força de arraste leva à redução da velocidade dos satélites, e consequente redução da altitude de suas órbitas - onde a densidade atmosférica é ainda maior, aumentando o problema. O resultado é uma redução da vida útil, isto é, seu tempo em órbita, de satélites que sofrem esses efeitos. Os efeitos da atividade solar sobre a alta atmosfera solar, e mais particularmente, sobre a órbita de satélites LEO, ainda é material de intensos estudos, tanto em universidades e institutos de pesquisa, como em empresas na área aeroespacial. Diversos trabalhos estudando o caso da queda dos satélites

Starlink já foram publicados ([Dang et al., 2022](#); [Kataoka et al., 2022](#); [Zhang et al., 2022](#); [Fang et al., 2022](#); [Tsyganenko et al., 2022](#); [Lockwood; Owens; Barnard, 2023](#); [Berger et al., 2023](#)). Isto evidencia a relevância e a demanda para estudos dos efeitos do Clima Espacial na operação de satélites artificiais.

1.2 Justificativa

Os problemas na área de satélites têm tido aumento devido às atividades solares. Como o caso dos satélites Starlinks, que diversos satélites em operação entraram em processo de decaimento. Em fevereiro de 2022 e necessita ser ressaltado. Mais especificamente um foguete Falcon 9 da SpaceX transportando 49 satélites Starlinks foi lançado no dia 4 de fevereiro de 2022. Os satélites foram deixados a uma órbita de 250km para que com seus propulsores entrassem em sua órbita de operação (450km). No período, já estava registrando uma atividade solar cerca de 50% maior do que o esperado que se manteve durante todo o processo. Por volta do dia 7 de fevereiro 40 dos 49 satélites [entraram em processo de reentrada](#) e perderam seu uso, gerando assim um prejuízo significativo para a empresa. Consequentemente a empresa em suas próximas missões tem tido maiores gastos com esses mesmos lançamentos, pois reduziu a quantidade de satélites e aumentou a altitude que são colocados para evitar eventos similares ao ocorrido. [Outro caso parecido](#) foi o da operação chamada Capella Space onde foram lançados cerca de 10 pequenos satélites, alguns deles lançados durante o momento de alta atividade em fevereiro de 2022. Consequentemente, a maioria deles retornou para Terra muito antes da sua previsão de operação. Recentemente com os relatos do futuro das viagens comerciais espaciais podem sofrer as mesmas adversidades, ressaltando a necessidade de melhor compreensão dos efeitos da atividade solar na alta atmosfera terrestre.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os efeitos solares como as tempestades solares têm ligação direta com o ciclo solar. O ciclo solar é estudado desde antiguidade e acontece a cada 11 anos, se trata da inversão dos polos magnéticos do Sol (Norte e Sul) ([SILVA, 2006](#)). Assim aumentando significativamente a atividade solar e causando alterações. A ocorrência das explosões solares na captação de fluxo de rádio F10.7 cm tem uma relação direta com o ciclo solar ([Woods; Rottman, 1997](#)), visto que o ciclo solar está relacionado com o posicionamento e quantidade de manchas solares. Atualmente estamos passando pelo 25 ciclo que está no período de crescimento da atividade solar. A alta atmosfera terrestre é atingida

indiretamente por essas atividades, principalmente pelas ondas de rádio (ultravioleta e SXR) (SWPC-NOAA, 2022b).

Termosfera é uma camada da atmosfera Terrestre entre a Mesosfera e a exosfera, que vai de 50 km de 1000 km de altitude acima da superfície. Na Figura 1 podemos observar o comportamento da densidade e da temperatura ao longo da Termosfera. Possui grande diferença nas suas temperaturas, possuindo elevadas temperaturas na baixa Termosfera (200 a 300 km) e que se mantém estáveis. Dando espaço para grandes variações de temperatura devido às atividades solares, podendo variar de 200° C (temperatura típica) até 2000° C graus. E ela é composta principalmente de Nitrogênio, Oxigênio e Hélio. Graças a presença desses gases nessa região, as altas atividades solares, como as CME's e as tempestades magnéticas causam expansão dessa camada. Variando o alto dessa camada com a acima, por volta dos 500 km. Essa variação altera a densidade local do ar nas altitudes orbitais (UCAR, 2022).

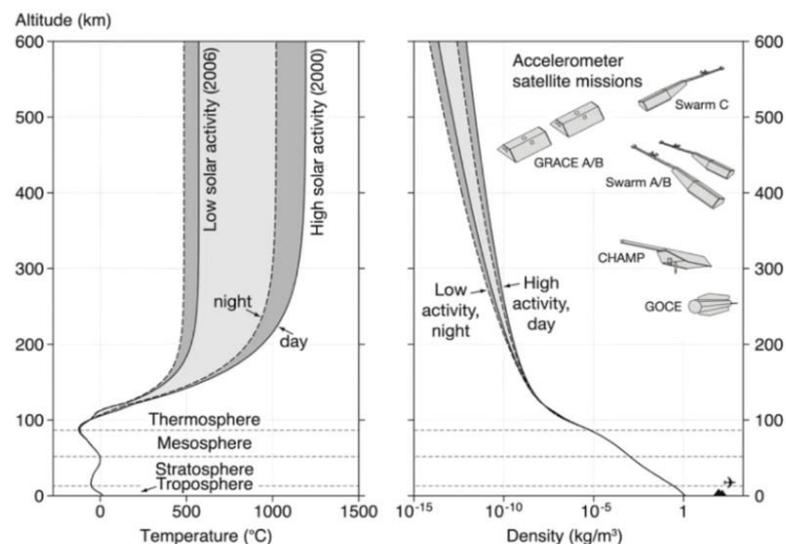


Figura 1 – Gráficos demonstrativos do aumento da variação de densidade e temperatura em decorrência do aumento da altitude. Demonstrando as alterações conforme período de baixa e alta atividade solar. FONTE:(VIRGILI-LLOP, 2014)

As tempestades geomagnéticas se trata de um evento que ocorre na corona solar e que atinge indiretamente a Terra, possibilitando mudanças na Magnetosfera Terrestre e portanto afetando a alta atmosfera. Essas tempestades são provocadas pelas ejeções de massa coronal do Sol, onde ocorre o choque de uma onda de partículas com o campo magnético terrestre. Essas partículas junto com vento solar alteram as correntes elétricas da alta atmosfera que por sua vez causam aquecimento Joule no local, na Figura 2 é possível ver o diagrama de correntes durante tempestades geomagnéticas. Esse aumento de temperatura faz com que a atmosfera se expanda e se torne mais densa (Palmroth et al., 2021). Em determinados casos os primeiros a serem afetados foram os satélites devido ao arraste originado do aumento da densidade, entre outros fatores como as linhas de transmissão que sofrem

com flutuação magnética e indução de corrente, causando sobrecargas e curto-circuitos em transformadores (SANTARINE; DOMINGOS, 2014).

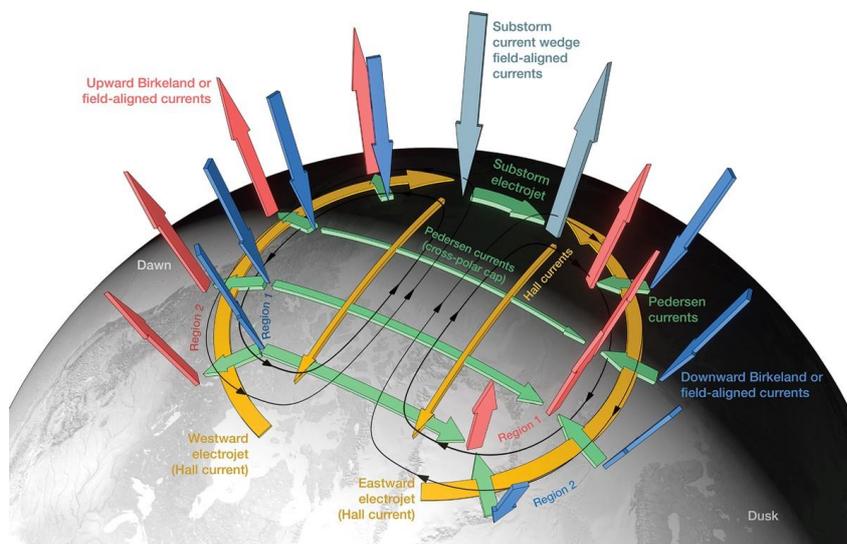


Figura 2 – Diagrama do sistema de correntes ionosféricas e das correntes magnetosféricas. Durante tempestades geomagnéticas, a intensidade das correntes aumenta, causando aquecimento (e conseqüente expansão) da atmosfera devido ao efeito Joule. FONTE: Palmroth et al. (2021).

A densidade atmosférica cria uma força de arraste no satélite que o faz perder energia e conforme essa perda ocorre sua altitude orbital decai. Esse cálculo pode ser dado pela Equação 1 do arraste

$$F_d = -\frac{1}{2}\rho C_d A v^2 \quad (1)$$

onde F_d é a força de arraste; ρ é densidade atmosférica; C_d é a constante de fluxo de escoamento, A área da seção transversal, e v é a velocidade do satélite. A função dos propulsores nos satélites é contrariar essa força e fornecer mais força para acelerar, pois como ela é contrária ao movimento se torna uma força negativa.

O fluxo de rádio no comprimento de onda 10,7 cm se trata de um indicador da atividade solar, também chamado de F10.7 se trata de um registro mais antigo do estudo da atividade solar. O F10.7 se correlaciona com o número de manchas solares, por isso se tem registro desde antiguidade. E costuma ser um índice relevante para previsão do clima espacial, pois vem direto da cromosfera e da coroa solar, servindo de rastreamento das outras emissões importantes das mesmas regiões solares (SWPC-NOAA, 2022a).

Tratando agora dos índices de irradiação direta, temos o raio x como principal onda de radiação, porém para analisar visando o clima devemos focar no Lyman α e SXR. SXR ou Soft X-ray são raios X do comprimento de onda de 0,3 e 4,5 nm, originados da coroa solar a camada mais quente do Sol. Ele

é emitido pelo plasma ativo da tempestade solar, funcionando como indicador da quantidade de energia liberada (MONTANA, 2022).

O Lyman- α é um tipo de radiação ultravioleta, que tem origem nas mudanças de camadas de elétrons no átomo de hidrogênio na Cromosfera liberando fótons. Assim, ao voltarem para sua camada de origem liberam energia em forma de radiação, essa energia possui comprimento de onda pequeno (121 nm). Tendo em vista o caso do nosso sistema solar, ela leva cerca de 8 minutos para se deslocar até a Terra na velocidade da luz. Considerando o meio terrestre o Lyman- α atua diretamente na camada terrestre da termosfera (ionosfera) (Hayes et al., 2021). Podemos observar esse fluxo de radiação pelas observações do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), acompanhando a atividade solar e as explosões solares de diversas escalas. Vale ressaltar que a Termosfera possui uma ligação direta entre temperatura e altitude, possuindo grande variação de temperatura devido a influência direta que o sol tem sobre ela. O Lyman- α atua como indicador da rádio na Termosfera sendo uma das principais faixas de radiação que gera a nossa Ionosfera. A Ionosfera se trata de um grupo de camadas da

Terra, composta por camadas com grande quantidade de átomos eletricamente carregados (ionizados). Ela pode ser subdividida em 3 regiões (D, E e F) categorizadas pelas suas altitudes. Conforme isso, a região mais baixa é a D que começa nos 60 km até os 90 km, seguida pela região E entre os 90 km até os 150 km e por fim região F dos 150 km até os 500 km. Na Figura 3 observa-se as regiões da ionosfera emparelhadas com as nomenclaturas de utilizadas nas camadas terrestres. A região que tem mais relevância é a região F, pois a ionosfera possui uma ligação direta entre maior concentração de moléculas ionizantes em maiores altitudes. Nessa camada, o ultravioleta e o raio-x do Sol estão sempre se chocando com esses átomos dos gases da camada, podendo ocorrer a liberação de elétrons que criam íons. Esses íons possuem um comportamento completamente diferente das moléculas, que acabam se movimentando e gerando um efeito Joule e conseqüentemente o aquecimento da atmosfera. Como comentado, o Lyman- α atua justamente principalmente na camada F, causando expansão da atmosfera e aumento da densidade global (Raulin et al., 2013).

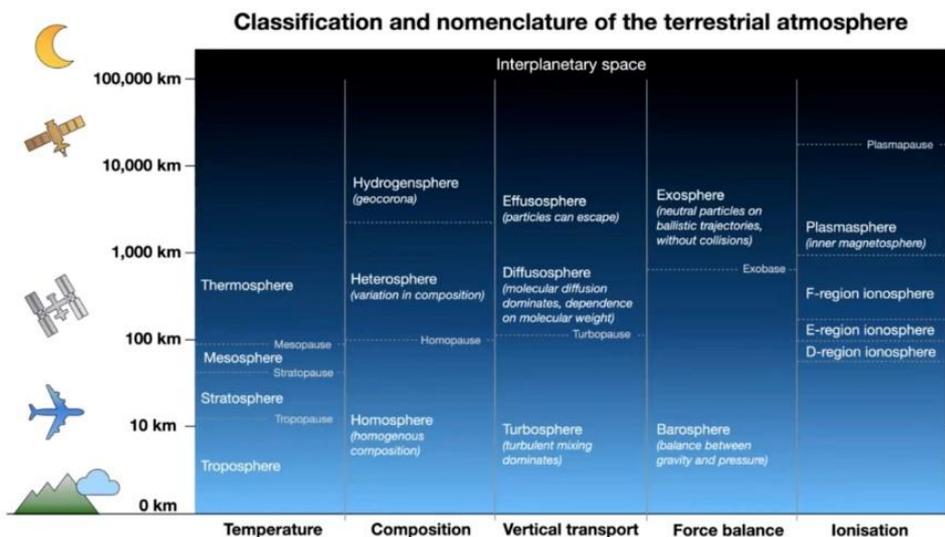


Figura 3 – Classificação das camadas Terrestres de acordo com as nomenclaturas, realizando emparelhamento entre elas. FONTE: (Prölss; Bird, 2004)

Percebe-se que a influência da irradiação é existente, uma vez que a ionização está ligada com o aumento da densidade global e avaliar esse índice é fundamental para estudo do clima espacial na alta atmosfera. Ressaltando que simples emissões de radiação do Lyman- α tem um comparativo com tempestades magnéticas de classe C (elevado), porém possuindo um efeito constante durante um período de alguns dias. Olhando pelo ponto de vista dos satélites, é visível que os dois fatores influenciam fortemente na reentrada dos mesmos.

Existem dois tipos de órbitas de satélites: geostacionária (*geostationary orbit*, GEO) e *Low Earth Orbit*, LEO) na Figura 4 pode-se ver os dois tipos de orbita. Os satélites GEO se movimentam na mesma velocidade angular da Terra, permanecendo estacionário sobre determinado ponto. Por isso sendo chamados de geostacionários e como estão fora do ambiente terrestre estão em um ambiente menos desafiador. Os satélites LEO operam mais perto da Terra operando até no máximo 1500 km. Costumam operar em um ambiente mais severo em comparação com o GEO, visando a radiação e o arrasto atmosférico. Diminuindo o tempo de vida dos mesmo em cerca de 5 anos, porém possuem menor custo de fabricação e são mais necessários. Para os satélites LEO, existem dois tipos de formas de alcançarem suas órbitas de operação, por meio da propulsão de hidrazina ou de iônica. A propulsão por hidrazina emprega propulsores de alto empuxo e baixo impulso específico que requerem muita massa para realizar manobras, e costuma ser a principal utilizada nos satélites. A propulsão iônica é de baixo empuxo e alto impulso específico que requer muita energia, que foi usada nos Starlinks. Ou seja, na a hidrazina são poucas manobras de grande impulso direto e a iônica são de manobras constantes até atingirem sua órbita de operação. Servindo de fator atenuante em período de conturbação do clima espacial como há uma demora para se obter a posição de órbita (Krauss et al., 2012).

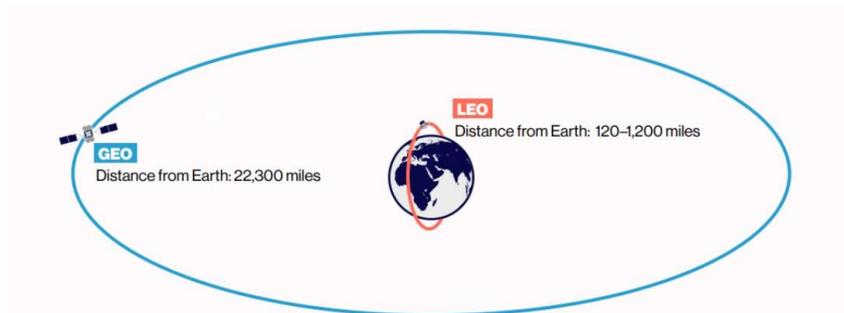


Figura 4 – Comparativo dos tipos de orbitas de satélites, LEO e GEO. Identificados por suas respectivas altitudes de orbitas. FONTE: Avanti (2022)

Essa questão dos efeitos do clima espacial na órbita de operação dos satélites (LEO), está tendo aumento dos estudos devido à importância de uma previsão do clima espacial. Dado isso, um

estudo realizado por Krauss et al. (2012) tratou de observar o evento de alta atividade chamado de Halloween que ocorreu em outubro/novembro de 2003 e se tratou de um evento extremo, segue a Figura 5 mostra evento graficamente. No trabalho para fins comparativos e analisar as condições climáticas foram utilizados dados do arraste e aceleração do satélite GRACE e a modelagens empíricas JB2008 (Bowman; Tobiska, 2020) e NRLMSISE. As duas modelagens trabalham com dados de temperatura densidade na alta atmosfera. Dados os resultados do período chegou-se a conclusão que a modelagem JB2008 possui melhor resolução em reproduzir a densidade de massa total. Também vale ressaltar que o evento solar ocorreu enquanto o satélite GRACE estava no lado noturno terrestre e o satélite no lado diurno observou as consequências do evento apenas. Considerando também que além da radiação direta os eventos de emissão de partículas energéticas como CMEs podem ter impacto mais forte que a radiação direta na órbita de satélites.

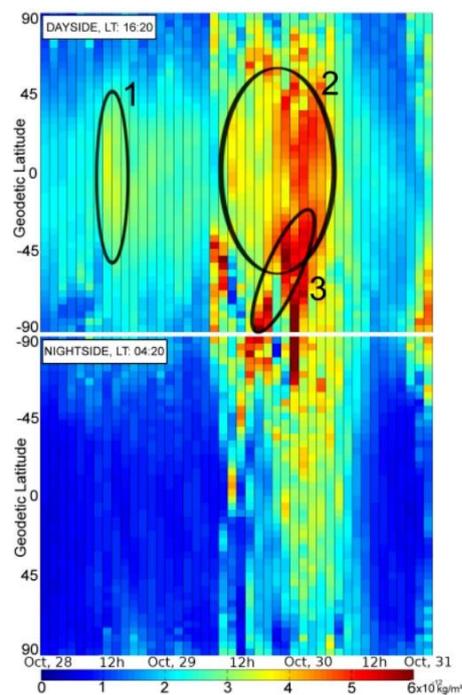


Figura 5 – Impacto da tempestade geomagnética na alta atmosfera terrestre entre 28 e 30 de outubro de 2003, de intensa atividade solar. (1) indica o aumento de densidade devido à radiação no lado diurno devido à tempestade solar X17 de 28 de outubro, enquanto (2) e (3) indicam o aumento de densidade devido à tempestade geomagnética associada à chegada da CME na Terra, que afeta tanto o lado diurno quanto o lado noturno. FONTE: Krauss et al. (2012).

Outro estudo que chamou atenção foi sobre o caso dos Starlinks de fevereiro de 2022 em específico (Dang et al., 2022). Nesse estudo foi levado em conta os índices geomagnéticos e simulações numéricas. Usando dados do vento solar e outros índices de tempestades geomagnéticas. Foi utilizado as imagens corográficas do LASCO para identificar a propagação das CME's e aplicou-se a modelagem *Graduated Cylindrical Shell* (GCS) de Thernisien. O modelo se baseia no estudo da propagação das CME's em três dimensões para fins de identificar seu fluxo de partículas. Na Figura 6 mostra um

exemplo de evento de duas CME's registradas pelo coronógrafo do LASCO. E foi utilizado o satélite SWARM-C como comparativo identificando a recuperação do acelerômetro. Dado as simulações numéricas, analisou-se que a altitude de lançamento dos satélites de 210 km foi um fator comprometedor visto que o arrasto dessa altitude foi significativo. Tendo em vista esse ponto se evidenciou a hipótese dos efeitos das ejeções de massa coronal que ocorreram no dia 3 e 4 de fevereiro como possíveis agentes.

E quão grande é a dificuldade de se prever o clima espacial.

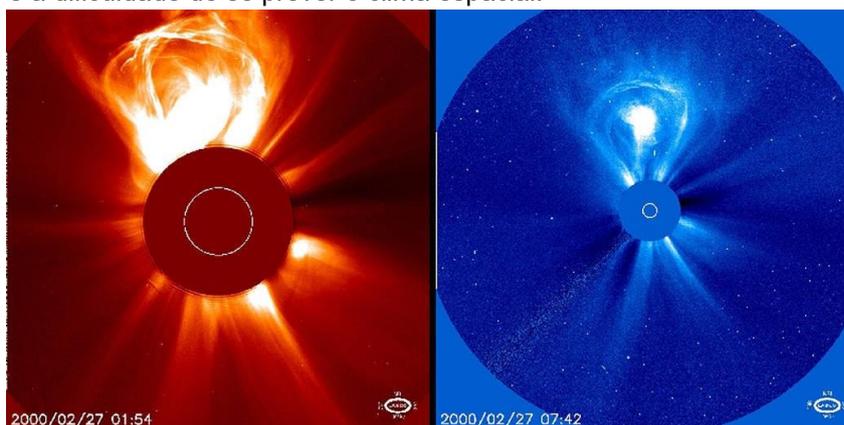


Figura 6 – CME's Capturadas pela câmera do LASCO no dia 27/02/2000. FONTE: NASA (2022)

3 METODOLOGIA

O processo adotado teve início pelo estudo da atividade solar de maneira teórica. Descrevendo os processos físicos em três partes: Sol, interplanetário; Terra. Sobretudo visualizando casos parecidos com alta atividade solar e quais foram consequências. Como o teórico estabelecido, seguimos estudando as condições climáticas no período de 27 de janeiro a 4 de fevereiro (período registrado com alta atividade) até 4 de fevereiro, dando destaque para o dia 3 de fevereiro em que ocorreu o lançamento dos satélites. Para analisarmos a irradiação solar utilizamos dados em raio X do SXR e Lyman- α . Os dados foram obtidos pelo GOES X-Ray Sensor (XRS), que registra e disponibiliza publicamente.

Os índices geomagnéticos das CME's também serão adquiridos pelo repositório Omni¹, disponibilizando dados do vento solar, índice K_p (grau de do distúrbio magnético), intensidade do campo magnético interplanetário B_z e o índice Dst (índice de atividade magnética equatorial proveniente de uma rede de magnetômetros terrestres).

Outra ferramenta que utilizamos foi o Solar Monitor² tendo aplicação para visualizar como estava o sol no período, podendo observar as manchas solares e seu deslocamento.

¹ <<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>> ² <<https://www.solarmonitor.org/>>

Para-se obter uma base de dados mais convincente, foi aplicado a modelagem de [Bowman e Tobiska \(2020\)](#). O JB2008 se trata de um modelo termosférico de modelagem das condições da atmosfera terrestre em função de distúrbios do clima espacial. Trabalhando com os índices solares de um sensor em órbita, que tem função de captar irradiação solar. Mais especificamente o ultravioleta, raio-x e Lyman- α , F10,7 em seus respectivos comprimentos de onda. Demonstrando seus efeitos na Termosfera quanto a temperatura atmosférica, temperatura neutra e a massa de densidade total. Os dados são baseados numa média de 81 dias assim provendo uma precisão alta. E produz modelos dos efeitos das tempestades geomagnéticas, utilizando índice Dst como condutor de mudanças na densidade global. A modelagem possui uso para altitudes de 175 km até 1000 km. E tem base dos seus valores de entrada como a data do período, a altitude de órbita e as coordenadas de longitude e latitude geodésicas. Possibilitando análises aprofundadas do meio para fim de auxiliar no parecer. As modelagens foram feitas com o Pacote Satellite Toolbox², desenvolvido na linguagem Julia⁴.

Todos os casos de retirada de dados foram para duas datas: a data do evento da queda dos satélites (27/01/2022 - 07/02/2022) e um período calmo (baixa atividade) que seria na mesma data, porém no ano de 2020, para comparação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para descobrir qual dos dois fatores foi decisivo para o aumento da densidade atmosférica no período é essencial a visualização gráfica. As tempestades geomagnéticas afetam a alta atmosfera através das correntes elétricas, assim aumentando as correntes durante grandes atividades e dessa forma causando o aquecimento (expansão da atmosfera) devido ao efeito Joule. No momento de órbita houve um grande aumento no valor registrado do Dst e dos ventos solares, porém durante curto período. Temos que ressaltar que a irradiação SXR está ligada a quantidade de energia liberada pelos flares e acaba sendo usada apenas como indicador do nível de irradiação. O Lyman- α se manteve em alta durante todo período da operação com os satélites, se tratando de um ultravioleta está relacionado com a densidade na alta atmosfera.

² <<https://github.com/JuliaSpace/SatelliteToolbox.jl>> ⁴ <<https://julialang.org/>>

4.1 Atividade solar

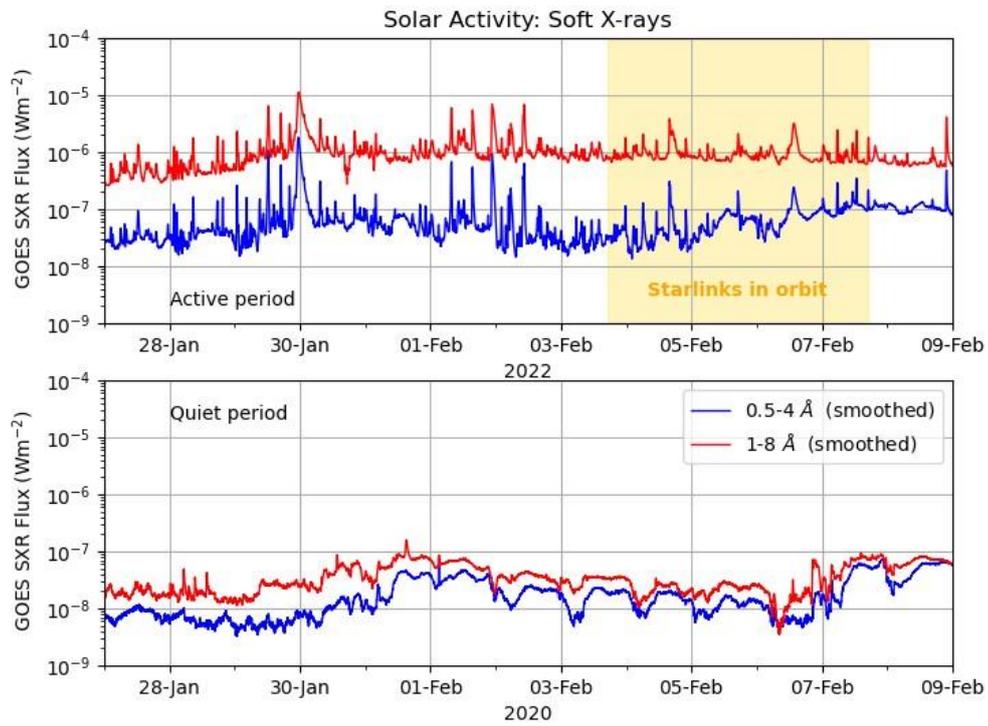


Figura 7 – Fluxo de radiação de raios X solares, comparando o período ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022, e calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020.

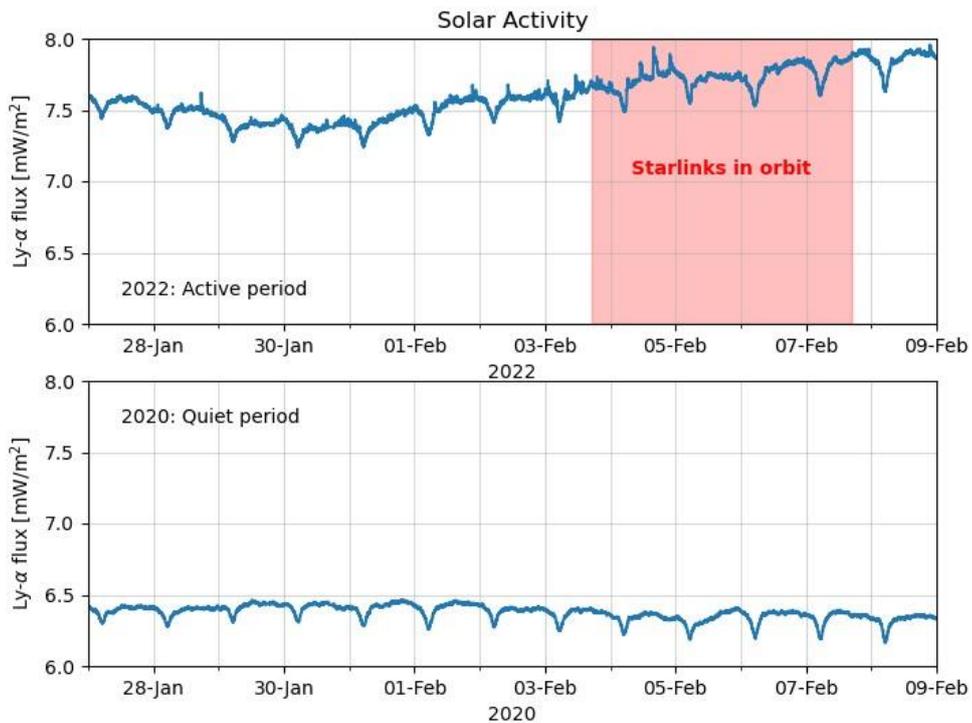


Figura 8 – Fluxo de radiação Lyman= α solar, comparando os período ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022, e calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020.

Utilizamos dados de fluxo de SXR e Lyman- α , ambos registrados pelo GOES, para verificar os níveis de atividade solar, em termos da radiação direta. As Figuras 7 e 8 mostram o fluxo de SXR e Lyman- α , respectivamente, para os períodos ativo e calmo. Em ambas as faixas de radiação, note-se que o nível de fluxo em SXR e Lyman- α é superior no período ativo, e também note-se a ocorrência de diversas explosões solares, mais evidente na emissão em SXR.

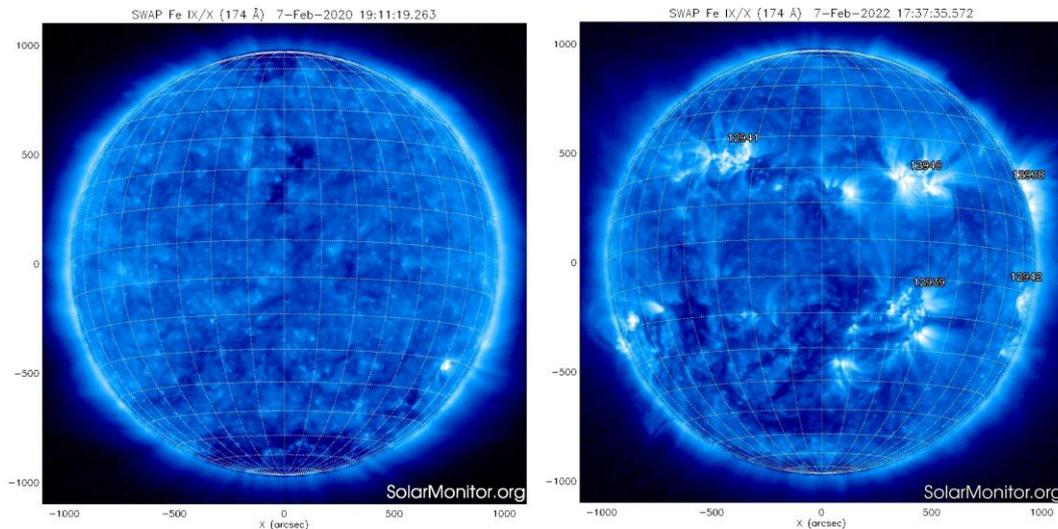


Figura 9 – Imagens do Sol em ultravioleta registradas nos períodos calmo (fev/2020) e ativo (fev/2022).
 FONTE: DIAS (2022)

Na Figura 9 mostramos imagens do Sol em ultravioleta registradas nos períodos calmo (fev/2020) e ativo (fev/2022). Pode-se visualizar a maior quantidade de regiões ativas solares (numeradas pelo NOAA) de grande porte. Regiões ativas não são visíveis no período calmo. Isto é coerente com os níveis de radiação observados em Lyman- α e SXR, nas Figuras 8 e 7, respectivamente.

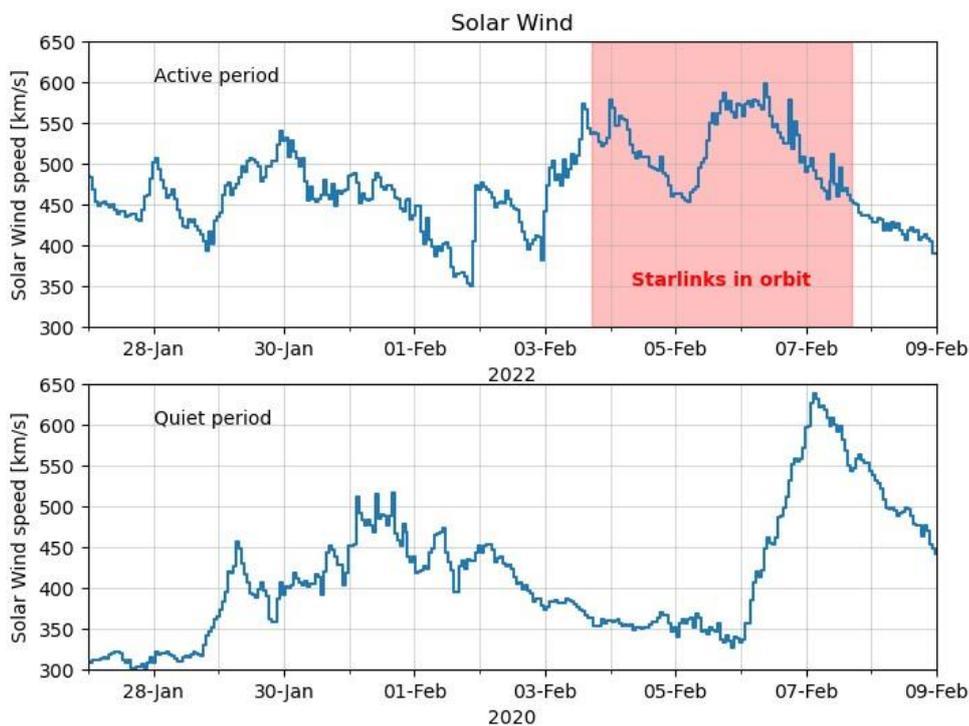


Figura 10 – Velocidade do vento solar, comparando o período ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022, e calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020.

A velocidade do vento solar nos períodos ativo e calmo, mostrado na Figura 10, não sugere muita diferença entre os dois períodos. Apesar da variação da velocidade, está se mantendo entre 300 e 650 km/s, sem uma relação clara com eventos ocorridos no Sol.

4.2 Índices geomagnéticos

Mostramos o índice geomagnético Dst, usado para identificar a ocorrência de tempestades geomagnéticas, comparando o período ativo (fev/2022) e calmo (fev/2020), na Figura 11. Dst com valores mais negativos indicam tempestades geomagnéticas mais severas. Na Figura estão marcados os limites definidos para tempestades fracas ($Dst < -30nT$) e moderadas ($Dst < -50nT$). No período de estudo, duas tempestades moderadas são identificadas, no dia 03/fev e 05/fev. Pode-se observar 2 picos principais no dia 3 e 4 de fevereiro, tempestades associadas a CMEs captadas pelo coronógrafo LASCO.

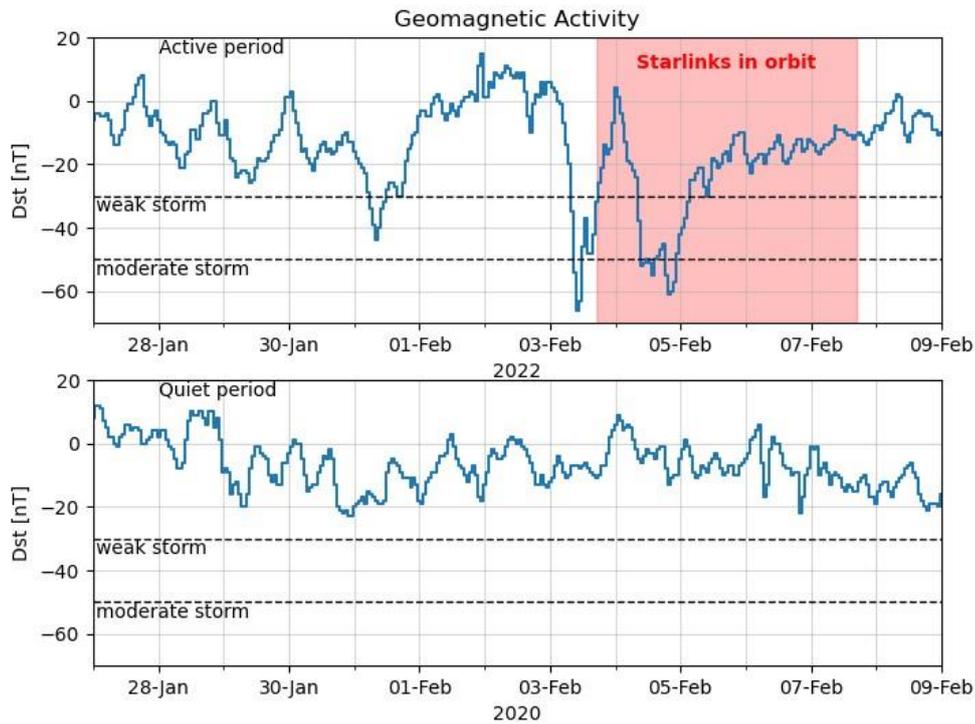


Figura 11 – Índice geomagnético Dst, usado para identificar a ocorrência de tempestades geomagnéticas, comparando o período ativo (fev/2022) e calmo (fev/2020). O período da órbita dos satélites está indicado pela região sombreada.

Certamente as análises gráficas podem mostrar os impactos, porém cabe a necessidade dessa modelagem das órbitas e densidade do satélite para exemplificar o caso.

4.3 Modelagem da termosfera

Usando o modelo JB2008, obtivemos os valores da densidade total ρ da atmosfera e a temperatura na altitude de 250 km, na posição latitude 0° e longitude 0° , que é a posição de referência neste estudo.

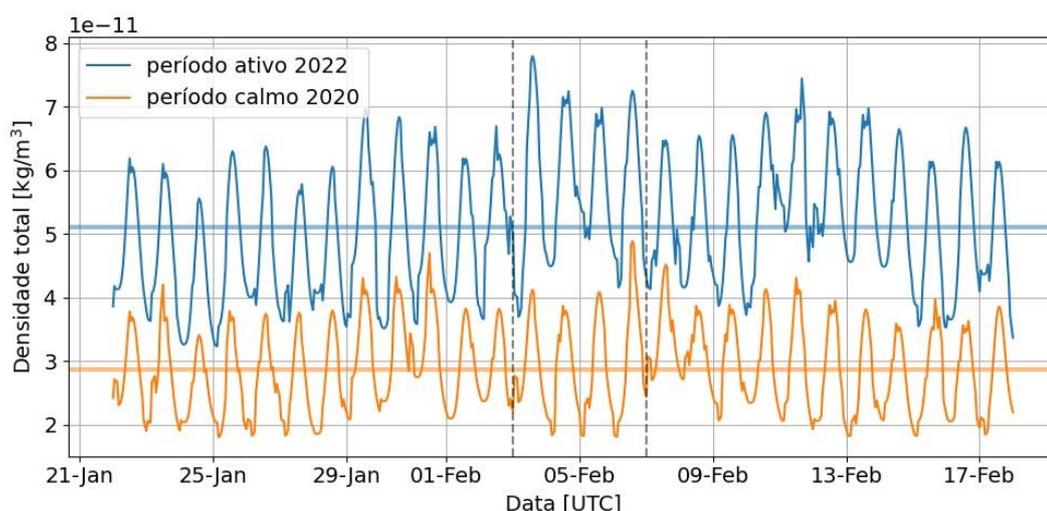


Figura 12 – Densidade atmosférica total na altitude de 250 km, na posição de latitude 0° e longitude 0° (posição referência neste estudo), obtida pelo modelo JB2008, no período ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022 (azul), e no período calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020 (laranja). Os valores médios de cada período estão indicados pela linha horizontal. As linhas tracejadas verticais indicam os tempos de lançamento e reentrada dos satélites.

Na Figura 12 mostramos a densidade total obtida pelo modelo JB2008 para o período ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022, e no período calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020. A periodicidade é resultado da rotação da Terra, ou seja, a variação dia-noite da iluminação solar. A densidade média no período ativo é de $\rho_{ativo} = (5,1 \pm 1,0) \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$, enquanto no período calmo este valor é de $\rho_{calmo} = (2,9 \pm 0,7) \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$, ou seja, um aumento médio de 1,75 vezes na comparação entre os dois períodos.

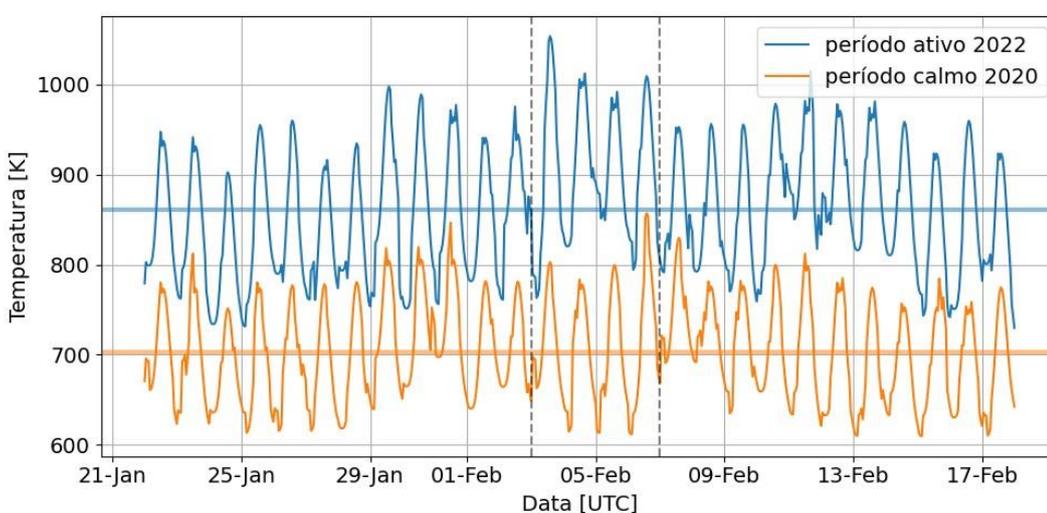


Figura 13 – Temperatura atmosférica na altitude de 250 km, obtida pelo modelo JB2008, no período ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022 (azul), e no período calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020 (laranja). Os valores médios de cada período estão indicados pela linha horizontal. As linhas tracejadas verticais indicam os tempos de lançamento e reentrada dos satélites.

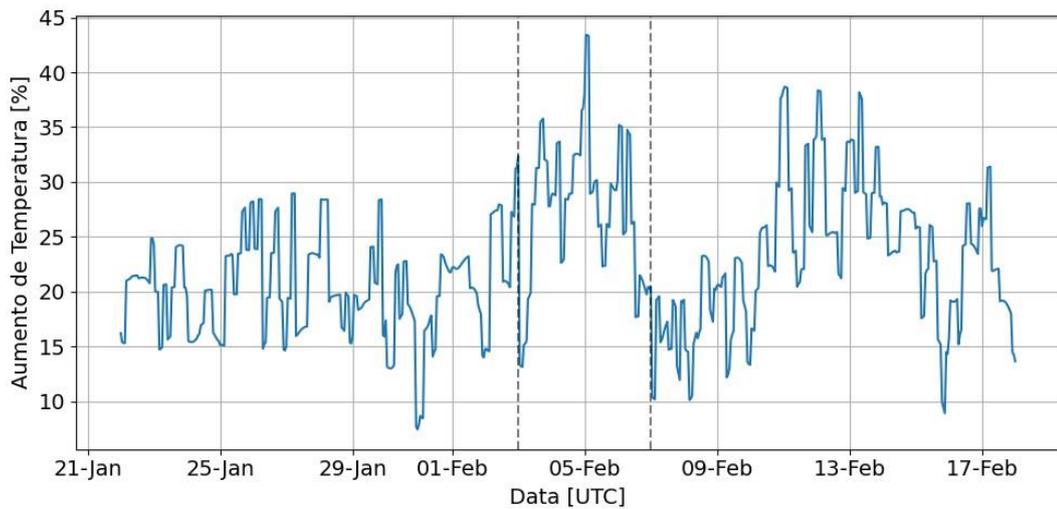


Figura 14 – Variação percentual da temperatura atmosférica na altitude de 250 km, obtida pelo modelo JB2008, comparando os períodos ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022 (azul), e no período calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020. As linhas tracejadas verticais indicam os tempos de lançamento e reentrada dos satélites.

Na Figura 13 mostramos a temperatura obtida pelo modelo JB2008 para o período ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022, e no período calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020. Como na Figura 12, a periodicidade é resultado da rotação da Terra. A temperatura média no período ativo é de $T_{ativo} = 861 \pm 72$ K, enquanto no período calmo este valor é de $T_{calmo} = 702 \pm 57$ K, ou seja, um aumento médio ≈ 160 K na comparação entre os dois períodos.

A comparação da densidade total e da temperatura da atmosfera em 250 km de forma mais direta está apresentada nas Figuras 15 e 14, onde temos a densidade relativa $\rho_{ativo}/\rho_{calmo}$ e a variação percentual de temperatura $(T_{ativo} - T_{calmo})/T_{calmo}$, respectivamente. Notamos um aumento da densidade entre 1,5 a 2,75 vezes, em particular no período da órbita dos satélites. Também se nota um aumento de 15 a 40% na temperatura.

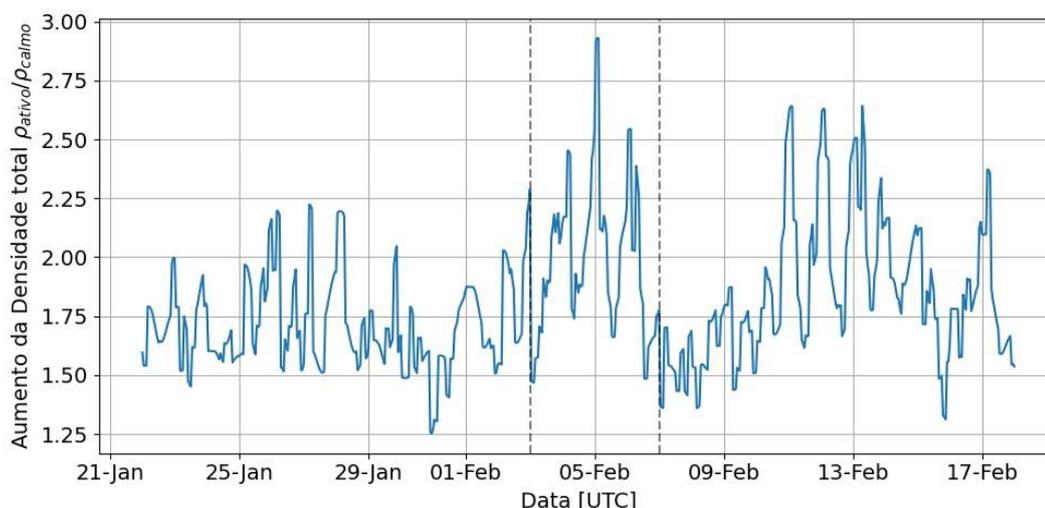


Figura 15 – Densidade atmosférica relativa $\rho_{ativo}/\rho_{calmo}$ na altitude de 250 km, obtida pelo modelo JB2008, comparando o período ativo, 22/01/2022 a 18/02/2022, e calmo, 22/02/2020 a 18/02/2020. As linhas tracejadas verticais indicam os tempos de lançamento e reentrada dos satélites.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentamos uma análise dos efeitos da atividade solar e do clima espacial na órbita de satélites, usando como estudo de caso a reentrada de 40 satélites Starlink da SpaceX, em fevereiro de 2022. Usamos dados observacionais para verificar o nível da atividade solar, em particular, os níveis de radiação em ultravioleta Lyman- α e raios X e das condições geomagnéticas, pelo índice Dst. A atividade do período de interesse foi comparada à atividade de um período calmo, em 2020.

Ao analisar os dados obtidos durante os momentos, nosso estudo indica a necessidade do comparativo entre os índices de irradiação solar e os magnéticos. Foi constatado que os dois índices estavam em alta e durante o lançamento foram registradas duas CME's. Porém para se evidenciar o principal é necessário levar dois pontos em consideração, primeiramente é necessário saber a posição de orbitária para identificar a possível geolocalização dos satélites durante os eventos e seu movimento de órbita. Também devemos levar em conta que pelos gráficos a densidade já estava alta antes mesmo das CME's. Ressaltando a questão que a termosfera já se encontrava em um estado perturbado (com densidade média maior do que em situações sem atividade) no lançamento dos satélites, portanto para identificar se o arraste foi contínuo ou momentâneo era necessário identificação de sua órbita. Isto indica que os efeitos da radiação direta, mais intensa devido à presença de regiões ativas no Sol, mantém a termosfera em estado de maior densidade, enquanto eventos transientes, como explosões solares e tempestades geomagnéticas, talvez não tenham um efeito direto no aumento da densidade, pelo menos para explosões e tempestade fracas e moderadas.

Neste trabalho podemos reparar a dificuldade de prever o clima espacial, para reduzir os problemas com os satélites LEO. Levando em conta para futuras operações durante eventos de alta atividade é necessário tomar providências como a SpaceX de reduzir a quantidade de satélites e lançar em altitudes mais elevadas. Evitando grandes prejuízos como nesse episódio. Também podemos ver a importância no meio da engenharia, em que muitas das vezes os gastos com superdimensionamento de tanques de combustíveis e operações mais caras podem ser diminuídos quando o estudo preventivo for realizado.

6 REFERÊNCIAS

- AVANTI. GEO vs LEO <https://www.avanti.space/wp-content/uploads/2020/09/GEO-vs-LEO_Quick-Facts_Avanti-Communications.pdf> . Acessado em 11/10/2022. 2022. Citado na página 7.
- Berger, T. E. et al. The Thermosphere Is a Drag: The 2022 Starlink Incident and the Threat of Geomagnetic Storms to Low Earth Orbit Space Operations. *Space Weather*, v. 21, n. 3, p. e2022SW003330, mar. 2023. Citado na página 3.
- Bowman, B.; Tobiska, W. K. *JB2008: Empirical Thermospheric Density Model*. 2020. ascl:2007.021 p. Astrophysics Source Code Library, record ascl:2007.021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 9.
- Dang, T. et al. Unveiling the Space Weather During the Starlink Satellites Destruction Event on 4 February 2022. *Space Weather*, v. 20, n. 8, p. e2022SW003152, ago. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.
- DIAS. Solar Monitor <<https://solarmonitor.org/>> . Acessado em 11/10/2022. 2022. Citado na página 13.
- Fang, T.-W. et al. Space Weather Environment During the SpaceX Starlink Satellite Loss in February 2022. *Space Weather*, v. 20, n. 11, p. e2022SW003193, nov. 2022. Citado na página 3.
- Hayes, L. A. et al. Solar Flare Effects on the Earth's Lower Ionosphere. *Sol. Phys.*, v. 296, n. 11, p. 157, nov. 2021. Citado na página 6.
- Kataoka, R. et al. Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022. *Journal of Space Weather and Space Climate*, v. 12, p. 41, out. 2022. Citado na página 3.
- Krauss, S. et al. Solar flares as proxy for the young Sun: satellite observed thermosphere response to an X17.2 flare of Earth's upper atmosphere. *Annales Geophysicae*, v. 30, n. 8, p. 1129–1141, ago. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- Lockwood, M.; Owens, M. J.; Barnard, L. A. Universal Time Variations in the Magnetosphere and the Effect of CME Arrival Time: Analysis of the February 2022 Event that Led to the Loss of Starlink Satellites. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 128, n. 3, p. e2022JA031177, mar. 2023. Citado na página 3.
- MONTANA, U. of. The Sun in X-Rays <<https://solar.physics.montana.edu/yipop/Spotlight/Today/xray.html>> . Acessado em 11/10/2022. 2022. Citado na página 5.
- NASA. NASA CME <<https://www.nasa.gov/content/goddard/what-is-a-coronal-mass-ejection>> . Acessado em 22/10/2022. 2022. Citado na página 9.
- Palmroth, M. et al. Lower-thermosphere-ionosphere (LTI) quantities: current status of measuring techniques and models. *Annales Geophysicae*, v. 39, n. 1, p. 189–237, fev. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.

Prölss, G. W.; Bird, M. K. *Physics of the Earth's Space Environment: an introduction*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página 6.

Raulin, J.-P. et al. Response of the low ionosphere to X-ray and Lyman- α solar flare emissions. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 118, n. 1, p. 570–575, jan. 2013. Citado na página 6.

SANTARINE, G. A.; DOMINGOS, R. N. Tempestades geomagnéticas e o evento carrington. *Holos Environment*, v. 14, n. 1, p. 103–113, jun. 2014. Disponível em: <<https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/8080>>. Citado na página 4.

SILVA, A. da. *Nossa Estrela O Sol*. LIVRARIA DA FÍSICA, 2006. (Temas atuais de física). ISBN 9788588325654. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=sNJy9WZI9NsC>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

SWPC-NOAA. F10.7cm radio emissions <<https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>>. Acessado em 11/10/2022. 2022. Citado na página 5.

SWPC-NOAA. SPACE WEATHER PREDICTION CENTER, NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION <<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>>. Acessado em 11/10/2022. 2022. Citado na página 3.

Tsyganenko, N. A. et al. Magnetosphere Distortions During the “Satellite Killer” Storm of February 3-4, 2022, as Derived From a Hybrid Empirical Model and Archived Data Mining. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 127, n. 12, p. e2022JA031006, dez. 2022. Citado na página 3.

UCAR. The Thermosphere <<https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/thermosphere>>. Acessado em 11/10/2022. 2022. Citado na página 4.

VIRGILI-LLOP, J. *Spacecraft Flight in the Atmosphere*. Tese (Doutorado), 11 2014. Citado na página 4.

Woods, T. N.; Rottman, G. J. Solar Lyman α irradiance measurements during two solar cycles. *J. Geophys. Res.*, v. 102, n. D7, p. 8769–8780, abr. 1997. Citado na página 3.

Zhang, Y. et al. Thermospheric Conditions Associated With the Loss of 40 Starlink Satellites. *Space Weather*, v. 20, n. 10, p. e2022SW003168, out. 2022. Citado na página 3.

Contatos: leomolliet@gmail.com e paulo.simoies@mackenzie.br