



Universidade Presbiteriana Mackenzie

Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

IMPACTO DAS VIBRAÇÕES NO APONTAMENTO DO RADIOTELESCÓPIO POEMAS

Universidade Presbiteriana Mackenzie
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - Coordenadoria de Fomento
à Pesquisa

Geovanne Petillo de Castro Boscatti (IC) ¹

Apoio: PIVIC Mackenzie.

Adriana Benetti Marques Valio (Orientadora) ²

¹Escola de Engenharia

²Unidade Acadêmica e/ou Programa de Pós-graduação do Orientador

Universidade Presbiteriana Mackenzie – São Paulo, SP – Brasil

<10388054@mackenzista.com.br¹>
<avalio@craam.mackenzie.br²>



Universidade Presbiteriana Mackenzie

Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

RESUMO

O radiotelescópio POEMAS (**P**OLarização de **E**missão **M**ilimétrica da **A**tividade **S**olar), um instrumento de monitoramento solar em 45 GHz e 90 GHz, tem apresentado significativas inconsistências de apontamento desde sua instalação em 2011 no CASLEO (Complexo Astronômico El Leoncito). Este estudo teve como objetivo diagnosticar as vibrações observadas e seus impactos. Na análise foram empregados a análise de vídeos com o software Tracker para estimativa de frequências de oscilação, juntamente com a revisão de um relatório técnico dos engenheiros do CASLEO e a análise de dados históricos de temperatura de brilho solar. Os resultados obtidos confirmaram que o erro de apontamento é intrínseco ao instrumento, evidenciado por variações e picos de temperatura máxima consistentes em ângulos de elevação específicos (17°, 27°, 38°, 53°, 61° e 79°) e um padrão sazonal. Para trabalhos futuros, propõe-se comparar os ângulos identificados com observações do POEMAS e utilizar acelerômetros na estrutura do telescópio para validação experimental das frequências de vibração, visando compreender a natureza do problema e otimizar a precisão dos dados.

Palavras-chave: Vibrações. Apontamento. Radiotelescópio.



Universidade Presbiteriana Mackenzie

Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

ABSTRACT

The POEMAS (**P**olarization **E**mission of the **M**ilimeter **A**ctivity at the **S**un) radiotelescope, an instrument for solar monitoring at 45 GHz and 90 GHz, has shown significant pointing inconsistencies since its installation in 2011 at CASLEO (Complexo Astronômico El Leoncito). This study aimed to diagnose observed vibrations and their impacts. In the analysis, we employed a video with Tracker software to estimate oscillation frequencies, along with reviewing a technical report from CASLEO engineers and analyzed the historical solar brightness temperature data. The obtained results confirmed that the pointing error is intrinsic to the instrument, evidenced by consistent variations and maximum temperature peaks at specific elevation angles (17°, 27°, 38°, 53°, 61°, and 79°) and a seasonal pattern. For future work, we proposed to compare the identified angles with POEMAS observations and to use accelerometers in the structure of the telescope for experimental validation of vibration frequencies, aiming to understand the problem's nature and optimize data precision.

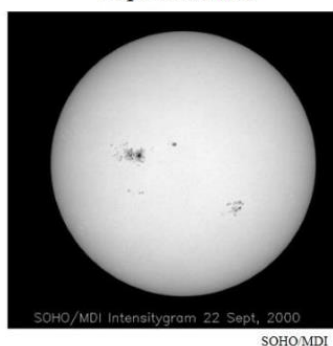
Keywords: Vibration. Pointing. Radiotelescope.

1. INTRODUÇÃO

Os radiotelescópios desempenham um papel crucial na observação do universo, permitindo a captação de ondas de rádio emitidas por corpos celestes, como o Sol, e, com isso, fornecendo informações para o entendimento de seus comportamentos e fenômenos associados. Por meio dessas observações, em múltiplos comprimentos de onda, é possível identificar eventos como manchas solares, explosões solares (flares) e ejeções de massa coronal (CMEs). Estes fenômenos, além de relevantes do ponto de vista científico, podem causar impactos significativos no ambiente espacial próximo à Terra, como interferências em comunicações, pane em satélites e apagões elétricos, tornando seu monitoramento indispensável para a análise e mitigação dos efeitos do clima espacial. A Figura 1 mostra duas imagens do Sol, em luz branca (à esquerda) e em microondas (17 GHz, à direita).

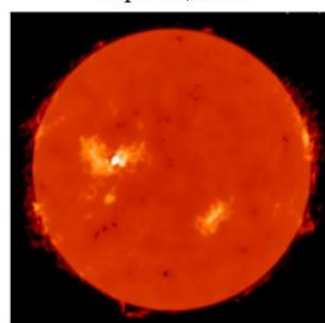
Figura 1: Imagem do Sol na luz visível (esquerda) e no comprimento de onda de 17 GHz em rádio (direita) no dia 22 de setembro de 2000.

The Sun: Visible Light,
Sept. 22, 2000



SOHO/MDI

The Sun: Radio Waves
Sept. 22, 2000



Nobeyama 17 GHz

Fonte: <https://slideplayer.com/slide/9425062>.

Para captar as ondas de rádio, as antenas dos radiotelescópios são projetadas para sintonizar as frequências específicas desejadas, mantendo-se apontadas com precisão para os corpos de interesse durante longos períodos. Este alinhamento é garantido por montagens especiais, sendo as mais comuns as equatoriais, orientadas de acordo com as coordenadas celestes de ascensão reta e declinação, e as azimutais, que seguem as direções de azimute (horizontal) e altitude (vertical). Contudo, cada tipo de montagem apresenta características e

limitações que impactam a qualidade e precisão das observações.

O radiotelescópio POEMAS (**P**olarização de **E**missão **M**ilimétrica da **A**tividade **S**olar), localizado no Observatório CASLEO (Complexo Astronômico El Leoncito) na Argentina (Figura 2), é um importante exemplo dessa tecnologia. Desde sua instalação em 2011, o POEMAS, composto por dois telescópios, monitora diariamente o Sol em duas polarizações (circular à direita e à esquerda) nos comprimentos de onda de 45 GHz e 90 GHz (VALIO et al., 2013). Entretanto, o instrumento enfrenta problemas de apontamento que dificultam a análise precisa das observações solares nessas frequências.

Figura 2: Sistema de radiospolarímetros POEMAS, cada um funciona a 45GHz e 90GHz com as polarizações à direita e à esquerda. Instalado no observatório El Leoncito nos Andes, na Argentina.



Fonte: Acervo do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM).

Após os primeiros dados coletados, observou-se que, em ângulos de elevação do Sol acima de 50°, frequentemente registrados entre 15h e 19h (UTC), a temperatura de brilho apresentava redução considerável, chegando a perder até 20% em determinadas ocasiões como visto na Figura 3.

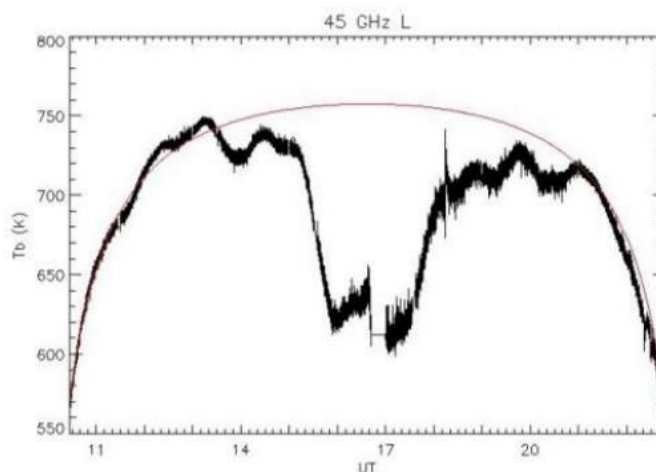


Universidade Presbiteriana Mackenzie

Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

Figura 3: Temperatura de antena do Sol em 45 GHz, medida na polarização circular à esquerda, para o dia 25 de dezembro de 2011. A curva vermelha mostra a variação esperada, que é diferente da observada (em preto) especialmente próximo ao meio-dia local, quando o Sol apresenta sua maior elevação no céu.



Fonte: Valio, 2012.

Como forma de contornar o problema, os dados em dias em que ocorrem explosões solares precisam passar pela meticulosa subtração do ruído de fundo, gerado em parte pela variação no sinal captado pela antena. Como esta variação poderia ter sido causada por ventos, na tentativa de minimizar os ruídos gerados, foram instalados braços estruturais no telescópio para dar suporte às antenas (ver Figura 4). Esses suportes de antena foram fabricados na Alemanha e enviados para a Argentina, onde foram instalados pelos engenheiros do CASLEO, em novembro de 2012, praticamente um ano após o início das atividades do POEMAS. Apesar de os suportes ajudarem com o problema, reduzindo o “backlash”, ainda é possível notar visualmente as vibrações na estrutura do telescópio (VALIO A. B. M., 2013).

Figura 4: Foto da estrutura de suporte (em cinza) instalada no POEMAS, como forma de diminuir o impacto dos ventos.



Fonte: Valio, 2013.

Neste estudo, investigaremos detalhadamente a montagem utilizada pelo telescópio POEMAS, buscando compreender sua relação com os problemas de vibração e apontamento. Ao analisar com precisão os movimentos gerados pela estrutura durante as observações, espera-se identificar as interferências e seus impactos no desempenho do radiotelescópio. Este esforço visa não apenas otimizar o funcionamento do POEMAS, mas também contribuir para avanços no desenvolvimento de radiotelescópios de alta precisão, fundamentais para as pesquisas em astronomia solar e espacial.

1.1. Objetivos

Este projeto teve como objetivo principal analisar as observações do POEMAS para então descobrir a causa e natureza das vibrações que estão causando a perda do fluxo solar, e se possível propor soluções para mitigar o problema.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O radiopolarímetro POEMAS, mostrado nas Figuras 3 e 4, responsável pelas observações nas frequências de 45 GHz e 90 GHz, possui montagem azimutal e é capaz de escanear praticamente todo o céu (azimute: 0° a 360°, elevação: 15° a +90°) com resolução de 0,1°. O tamanho do feixe é ajustado para cobrir todo o Sol com um HPBW (Half Power Beam Width) de abertura angular de aproximadamente 1°. O radiopolarímetro é composto por uma antena de grande precisão e um receptor GPS (Global Positioning System) que determina a posição do sistema e a referência de tempo UTC (Coordinated Universal Time). Para fins de rastreamento, o software do radiômetro calcula a localização do Sol no céu a partir dessas informações (ROSE, 2012).

De forma a entender a vibração do telescópio, um time-lapse do movimento do telescópio foi feito por uma câmera go-pro, o que permitiu observar e relatar a presença da vibração responsável por grande parte do ruído gerado nas observações do POEMAS. Pelo vídeo, é possível notar que os braços de sustentação de antena já estão instalados no telescópio (ver Figura 5), entretanto, a amplitude de oscilação continua facilmente notada a olho nu. O vídeo possui apenas 31 segundos e por se tratar de um time-lapse, está acelerado, o que dificulta a compreensão do real impacto da duração das vibrações, nos dados coletados pelo polarímetro. Portanto, foi utilizado o “ExifTool”, um programa de software gratuito e de código aberto para leitura, gravação e manipulação de metadados de imagem, áudio, vídeo e PDF. O programa forneceu informações de quando ocorreu a gravação do time-lapse e da duração real do vídeo. Neste caso, o vídeo foi gravado em 16 de setembro de 2019, e o horário inicial é 14:35:36, com a duração de 1 hora, 18 minutos e 30 segundos.

Figura 5: Imagens do telescópio POEMAS retiradas do time-lapse.





Um movimento que se repete ao longo do tempo, como exemplificado no vídeo, é referido como um movimento oscilatório ou vibratório. Durante esse processo, o sistema armazena energia potencial devido à sua elasticidade, tal como uma mola deformada, ou por causa de sua massa posicionada a uma certa altura de seu ponto de equilíbrio, como um pêndulo solto. Quando a energia do sistema é conservada, a energia potencial máxima é convertida em energia cinética à medida que a massa se move, ganhando velocidade e aceleração. Ao atravessar o ponto de equilíbrio, a energia cinética, então máxima, transforma-se novamente em energia potencial, seguindo as dinâmicas do sistema, e o processo se repete. Assim, a vibração implica na conversão de energia potencial em energia cinética, e vice-versa. A cada ciclo de oscilação, uma certa quantidade de energia é dissipada até que o sistema alcance o equilíbrio estático. Portanto, para manter a vibração, uma fonte externa de energia é necessária (GRILLO, 2021).

As vibrações podem ser classificadas como vibração livre e vibração forçada. Na primeira, se um sistema, após ser perturbado, continuar a vibrar por conta própria, sem que nenhuma força aja sobre o sistema, a vibração resultante é conhecida como vibração livre, como por exemplo, a oscilação de um pêndulo simples. Mas caso o sistema permaneça sujeito a forças externas muitas vezes, como uma força repetitiva, a vibração resultante é conhecida como vibração forçada, como por exemplo, a oscilação que surge em máquinas, como motores a diesel (RAO, 2008).

Os movimentos vibratórios que surgem de uma fonte de excitação podem ser categorizados como determinísticos ou não determinísticos. Os movimentos determinísticos podem ser descritos por relações matemáticas explícitas, com as fontes de excitação conhecidas, como força ou deslocamento, impulsionando o sistema vibratório. Dentro dos movimentos determinísticos, estão o movimento periódico não harmônico e o movimento harmônico.

Os movimentos não determinísticos ou aleatórios se distinguem pela ausência de um padrão temporal definido de repetição, por exemplo a vibração das asas de um avião. Por outro lado, o movimento periódico é caracterizado por repetições regulares ao longo do tempo, seguindo um intervalo definido, embora não necessariamente seja harmônico, para este, a função temporal assume a forma de uma senoide ou cossenoide.



Universidade Presbiteriana Mackenzie

Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

O ciclo de um movimento oscilatório ocorre quando o movimento parte de uma posição inicial, como o repouso, percorre todas as posições ou fases e retorna à posição equivalente de partida, repetindo-se ao longo do tempo.

A frequência de oscilação (f) corresponde ao número de ciclos decorridos por uma unidade de tempo, unidade ciclos por segundo (cps) ou Hertz (Hz). A frequência angular (ω) é expressa como:

$$\omega = 2\pi f \text{ [rad/s]}$$

O período de oscilação (T) é o tempo necessário para se descrever um ciclo. O período é o inverso da frequência:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \text{ [S]}$$

Na frequência natural (f_n), ao ser deformado e solto, um corpo vibra e oscila sem depender de uma fonte externa de excitação. Essa frequência pela qual ele oscila naturalmente é denominada frequência natural, sendo um fenômeno intrínseco ao corpo, determinado pelas propriedades de seu material, sua forma, dimensão e massa.

Na ressonância, quando um corpo é estimulado por uma fonte cuja frequência de ação coincide com sua frequência natural ele se torna instável e passa a ter grandes amplitudes.

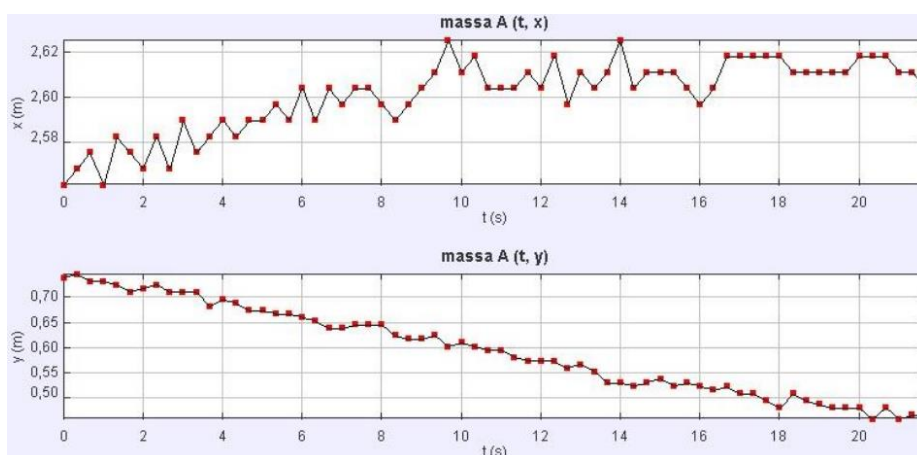


3. METODOLOGIA

Apesar de muitos dados ainda estarem em processo de análise, algumas suposições devem ser feitas para prosseguir com o diagnóstico do problema. Por exemplo, de acordo com o que é possível observar nos vídeos, existe a possibilidade das vibrações observadas no telescópio serem causadas pela ressonância. Nesse contexto, um ciclo de movimento oscilatório ocorre onde a estrutura do telescópio ou sua montagem vibram em uma frequência natural específica. E como na ressonância, quando a frequência de um corpo coincide com sua frequência natural ele se desestabiliza e passa a ter grandes amplitudes. Essa frequência natural é fundamental para compreender como as vibrações podem ser amplificadas, contribuindo para o fenômeno da ressonância.

Portanto, a partir do vídeo, com ajuda do software de análise de vídeo, Tracker, será analisada a trajetória do telescópio durante o vídeo para estimativa dos valores de frequência das oscilações, que ocorrem durante as observações do telescópio. Pelo software é possível escolher um ponto de massa do telescópio e a partir dele traçar sua posição no espaço em função do tempo frame por frame, como mostrado na Figura 6 abaixo.

Figura 6: Gráficos de posição em função do tempo de um ponto de massa escolhido no vídeo do radiopolarímetro POEMAS. O gráfico de cima é traçado em relação ao movimento horizontal do telescópio e o de baixo em relação ao movimento vertical.



Fonte: o Autor.

Inicialmente o proposto seria compreender as vibrações observadas não apenas analiticamente como os dados obtidos pelo software Tracker, mas com o uso de acelerômetros e comparar os dados obtidos pelos dois meios. Entretanto, devido a restrições de tempo e orçamento, essa etapa passou por um impedimento.



Universidade Presbiteriana Mackenzie

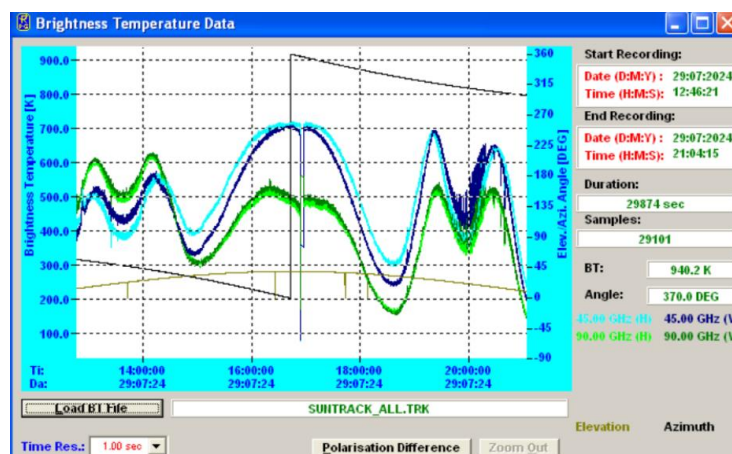
Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

No entanto, devido ao trabalho dos engenheiros do CASLEO, que iniciaram uma análise do telescópio em que um relatório foi gerado e compartilhado, foi possível continuar a pesquisa partindo do estudo desse relatório. Os engenheiros investigaram detalhadamente os problemas estruturais e operacionais do telescópio, gerando um relatório técnico. Esse relatório incluiu diagnósticos e soluções simples, como o reposicionamento e ajuste de cabos tensionados e a verificação do alinhamento do posicionador e do trem de engrenagens. Além disso, observações de temperatura de brilho solar foram analisadas e comparadas com valores esperados, observando-se inconsistências que reforçaram as hipóteses de problemas de apontamento. A análise detalhada desses dados ao longo de dias e anos distintos forneceu importantes insights sobre o impacto das vibrações no desempenho do telescópio. O relatório, utilizou dados de temperatura de brilho, gerados pelo POEMAS, em dias e épocas diferentes do ano.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão apresentamos os resultados obtidos e reportados pelos engenheiros do CASLEO. Estes dados foram analisados por nós para identificação dos ângulos de elevação onde os picos de oscilação ocorrem indicando um maior movimento do radiopolarímetro. Na Figura 7, mostra-se como exemplo, a variação da temperatura de antena para o dia 29 de julho de 2024.

Figura 7: Gráfico de Temperatura de Antena Solar do dia 29 de julho de 2024.



Fonte: CASLEO

A análise dos dados de temperatura de brilho solar no dia 29 de julho de 2024 apontou inconsistências no apontamento do telescópio, como o esperado. A linha em preto representa

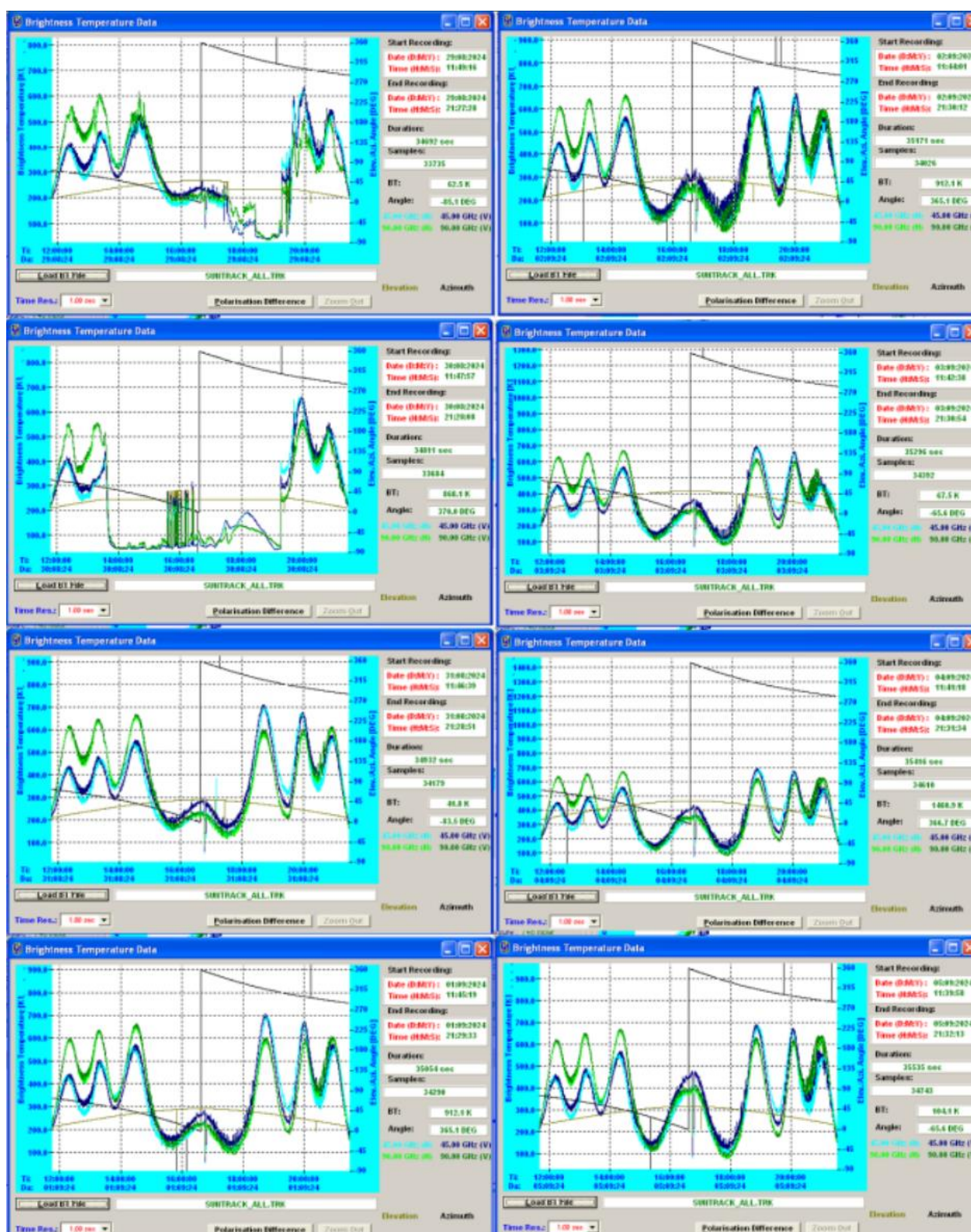
M Universidade Presbiteriana Mackenzie

Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

o comportamento do ângulo de elevação do telescópio, enquanto a linha em amarelo indica o movimento em azimute durante a observação. Na Figura 8, observa-se a variação gradual das temperaturas obtidas ao longo de oito dias consecutivos, de 29 de agosto a 5 de setembro de 2024.

Figura 8: Gráficos de Temperatura de Antena Solar dos dias de 29 de agosto a 5 de setembro de 2024.



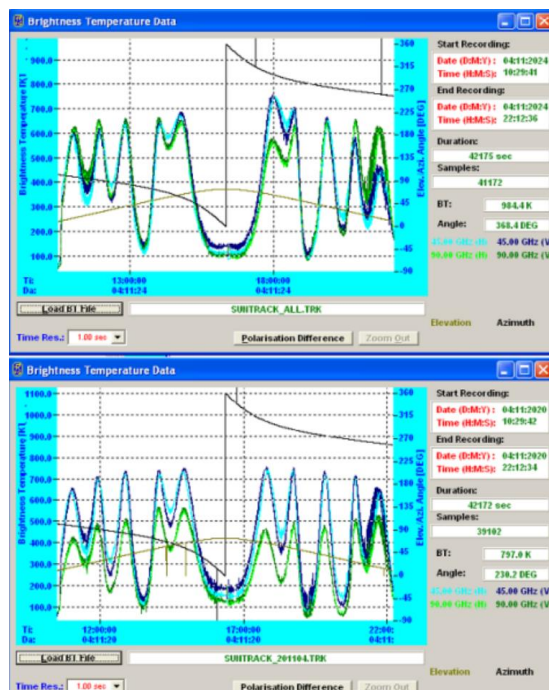
Fonte: CASLEO



Universidade Presbiteriana Mackenzie

Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG
Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

Figura 9: Gráficos de Temperatura de Brilho Solar do dia 4 de novembro de 2020 e 2024.



Fonte: CASLEO

Pela Figura 9, fornecida pelos engenheiros de CASLEO, observa-se a comparação do dia 4 de novembro de 2024 em relação ao mesmo dia, porém do ano de 2020. Nota-se que a quantidade de picos é a mesma e ocorre nos mesmos tempos e, portanto, ângulos de elevação. Isso demonstra que o erro não é aleatório, mas que depende de algum fator intrínseco ao instrumento. Ao observar essa tendência, foi realizada uma análise do que ocorreu durante todo um ano. Neste caso, foram buscados arquivos de anos anteriores para preencher os meses em que ainda não havia sido obtidos dados para esta campanha de análise.

Figura 10: Compilação anual de Gráficos de Temperatura de Antena Solar.


Fonte: CASLEO

A primeira aquisição corresponde ao dia 22 de dezembro de 2023 e a última ao dia 16 de dezembro de 2024, para fechar o ciclo anual. Nota-se, nesses dias que há a maior quantidade de picos em que o instrumento atinge a temperatura máxima (doze no total: seis antes e seis depois do meridiano), pois o posicionador aponta para o centro do Sol. À medida que o ano avança, esses máximos vão ‘desaparecendo’ até chegar a um total de quatro (dois antes e dois depois). De acordo com Fernández (2025), isso ocorre porque, no solstício de verão, o Sol atinge aproximadamente 81° e, no de inverno, cerca de 35° de elevação. Pela compilação anual da Figura 10, observou-se que os ângulos nos quais os máximos ocorreram são aproximadamente: 17° , 27° , 38° , 53° , 61° e 79° .

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo principal diagnosticar as vibrações observadas no radiotelescópio POEMAS, buscando não apenas identificar suas causas, mas também propor soluções eficazes para mitigar os problemas de apontamento decorrentes. Para isso, foram empregadas diferentes metodologias, incluindo a análise de vídeos por meio do software Tracker para estimar frequências de oscilação e o estudo aprofundado de um relatório técnico fornecido pelos engenheiros do CASLEO, que detalhava os problemas estruturais e operacionais do telescópio, além de dados de temperatura de brilho solar.

Os resultados obtidos confirmaram a presença de inconsistências significativas no apontamento do POEMAS. A análise dos dados de temperatura de antena revelou variações inesperadas em diferentes períodos, como demonstrado nos gráficos de 29 de julho de 2024, de 29 de agosto a 5 de setembro de 2024 e na comparação do dia 4 de novembro de 2020 e 2024. Notou-se que a quantidade de picos de temperatura máxima e os ângulos de elevação nos quais ocorrem são consistentes, indicando que o erro de apontamento é de natureza intrínseca ao instrumento, e não aleatório. A compilação anual de dados também revelou um padrão sazonal na ocorrência de picos de temperatura máxima, com ângulos específicos como 17°, 27°, 38°, 53°, 61° e 79° apresentando maior incidência.

Para trabalhos futuros, os ângulos obtidos serão analisados e comparados com as observações do POEMAS escolhidas para a pesquisa. Além do uso de acelerômetros para constatar de forma experimental os valores de frequência das vibrações do telescópio. A partir desses dados e da análise dos ângulos espera-se compreender a natureza do problema e poder propor novos testes que resolvam a imprecisão dos dados obtidos pelo POEMAS.



Universidade Presbiteriana Mackenzie

Pró-reitoria de pesquisa e Pós-graduação – PRPG

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa – CFP

6. REFERÊNCIAS

Fernández, Germán. **Informe de diagnóstico de POEMAS**. Rev. 1.0, 2025. 22 p. Relatório técnico

GRILLO, Newton L. **Introdução ao estudo de vibrações mecânicas**. Editora Blucher, 2021

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2008

Rose, T. (2012). **Proposal for a 45/90 GHz L/R Circular Polarisation Solar Patroller**. Radiometer Physics GmbH, Meckenheim / Germany. (Manual).

Silva, A. V. R. (2006). **Nossa Estrela: o Sol**. Ed. Livraria da Física

Valio, A. (2012). **Solar Patrol Polarization Telescope at 45 and 90 GHz**. Relatório Parcial do projeto FAPESP 2009/50637-0. Setembro de 2012.

Valio, A. (2013). **Solar Patrol Polarization Telescope at 45 and 90 GHz**. Relatório Final do projeto FAPESP 2009/50637-0. Abril de 2013.

Valio, A., Kaufmann, P., Giménez de Castro, C. G., Raulin, J. -P., Fernandes, L. O. T., Marun (2013). **A. Polarization Emission of Millimeter Activity at the Sun (POEMAS): New Circular Polarization Solar Telescopes at Two Millimeter Wavelength Ranges**. Solar Physics, 283(2), 651-665