

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – FÍSICA

SUELEN APARECIDA RAMOS

ESTUDO SOBRE AS VARIAÇÕES NO RAIO SOLAR UTILIZANDO O HMI/SDO

PONTA GROSSA

2021

SUELEN APARECIDA RAMOS

ESTUDO SOBRE AS VARIAÇÕES NO RAIO SOLAR UTILIZANDO O HMI/SDO

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, área de concentração em Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Emilio.

PONTA GROSSA

2021

R175 Ramos, Suelen Aparecida
Estudo sobre as variações no raio solar utilizando o HMI/SDO / Suelen
Aparecida Ramos. Ponta Grossa, 2021.
89 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Área de Concentração: Física),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Emilio.

1. Raio solar. 2. Hmi. 3. Variação no raio solar. I. Emilio, Marcelo. II.
Universidade Estadual de Ponta Grossa. Física. III.T.

CDD: 530.1

TERMO DE APROVAÇÃO

SUELEN APARECIDA RAMOS

“Estudo sobre as variações no raio solar utilizando o HMI/SDO .”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção no grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências – Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.



Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Emilio– UEPG/PR – Presidente



Prof.ª. Dr.ª. Maria Cristina Rabello Soares - UFMG– Titular



Prof. Dr. Francisco Carlos Serbena- UEPG– Titular

Ponta Grossa, 26 de agosto de 2021.

*Dedico este trabalho a todos os meus outros sonhos,
para que estes também venham a se tornar realidade*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida, saúde e por estar comigo nessa caminhada.

Segundo a minha família, meu esposo Yuri Aparecido Opata, que mais do que apoio sempre me ajudou a ver as coisas de uma nova maneira. E a nossa nova razão de viver: nosso bebê que esta chegando.

Agradeço a minha família, que o mais importante sempre me deram: sua presença e seu apoio.

Aos colegas que encontrei durante o mestrado e que estavam nessa jornada juntos. Pudemos além de trocar experiências, nos apoiar e alegrar.

Aos professores que tive durante o mestrado, que me ajudaram a ter uma visão maior de muitas coisas.

Ao professor Dr. Marcelo Emilio pela orientação, guia e tempo desprendido, sua paciência e incentivo.

Agradeço ao programa da Capes pela bolsa concedida, foi de grande auxílio e incentivo.

Por fim, o meu muito obrigada a todos que diretamente ou indiretamente ajudaram este trabalho a ser concluído.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*Quando olho para o teu céu,
obra de tuas mãos,
vejo a lua e as estrelas que criaste:
Que coisa é o ser humano,
para dele te lembrares,
o filho do homem, para o visitares?
(Sl 8,4-5)*

RESUMO

As técnicas de observar e medir o raio solar evoluíram no decorrer da história da evolução científica. Hoje em dia os métodos mais confiáveis de medir o raio solar são as técnicas em que é eliminada a influência da atmosfera terrestre (*seeing*) nas medidas do raio. Nesse quesito, os satélites espaciais são excepcionais. Os dados de medida do raio solar obtidos pelo instrumento *Heliosismic and Magnetic Imager* (HMI) a bordo do telescópio espacial *Solar Dynamics Observatory* (SDO) foram utilizados nesse trabalho para verificar se o raio solar tem variado no período analisado (2013 a 2019). Também foi utilizado os dados da temperatura no instrumento HMI para contruir um modelo empírico para verificar a influência da temperatura dos instrumentos nas medidas do raio solar. Com o modelo, encontramos o valor da variabilidade do raio solar máxima para o período analisado de $\Delta R_{\odot M\acute{E}DIO} = 40 \text{ mas}$.

Palavras-chaves: Raio solar, HMI, Variação no raio solar

ABSTRACT

The techniques of observing and measuring the solar radius have evolved throughout the history of scientific evolution. Nowadays, the most reliable methods of measuring the solar radius are the techniques in which the influence of the terrestrial atmosphere (*seeing effect*) in the measurements of the radius is eliminated. In this regard, space satellites are exceptional. The data of the solar radius obtained by the instrument *Heliosismic and Magnetic Imager* (HMI) onboard the space telescope *Solar Dynamics Observatory* (SDO) were used in this work to verify if the solar radius has varied in the analyzed period (2013 to 2019). The temperature data on the HMI instrument was also used to build an empirical model to verify the influence of the temperature of the instruments on the solar radius measurements. With the model, we find the maximum value for the variability in the solar radius in the analyzed period of $\Delta R_{\odot \text{MÉDIO}} = 40 \text{ mas}$.

Keywords: Solar radius, HMI, solar radius variations

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Imagem do Sol feita usando telescópio Coronado CaK PST contendo as seguintes regiões ativas do Sol: fáculas, praias e manchas solares com as suas regiões, umbra e penumbra destacadas no canto inferior direito, onde a primeira é a parte mais interna da mancha e a segunda a parte externa da mancha. 19
- Figura 2 – Comparação da diminuição da intensidade do limbo solar para manchas solares, Sol quieto e praias com a distância do raio medido em mili arcsec (*mas*). As linhas sólidas representam as intensidades no contínuo e as linhas pontilhadas são as intensidades com respeito a linha central do Fe I. 20
- Figura 3 – Esquema de um elemento de casca, onde dr é a espessura da casca, P_e a pressão externa, P_i a pressão interna e g a gravidade. 22
- Figura 4 – Medidas médias do raio solar (ano médio de quando as medidas foram feitas). A linha pontilhada trás o valor de referência (959,63 *arcsec*) do Almanaque Astronômico feito por Auwers (1891). As medidas feitas com eclipse solar estão marcadas com um asterisco vermelho e foram feitas por (FIALA; DUNHAM; SOFIA, 1994), (KUBO, 1993), (RAPONI et al., 2012), (KILCIK et al., 2009), (LAMY et al., 2015), (ADASSURIYA; GUNASEKERA; SAMARASINHA, 2011) e (THUILLIER et al., 2017). Já as medidas feitas com astrolábio são mostrados com um quadrado verde e são de (NOEL, 2001), (SANCHEZ et al., 1995), (LACLARE et al., 1996), (KILIC; GOLBASI; CHOLLET, 2005), (JILINSKI et al., 1999), (PULIAEV et al., 2000), (GOLBASI et al., 2001) e (EMILIO; LEISTER, 2005). Já as medidas feitas através da técnica de trânsito planetário que estão marcadas com um diamante azul foram feitas por (EMILIO et al., 2012), (HAUCHECORNE et al., 2014), (MEFTAH et al., 2014), (EMILIO et al., 2014) e (MEFTAH et al., 2018). 29
- Figura 5 – As observações para medida do raio solar consistem em marcar os tempos de contato externo t_1 e t_4 e de contato interno t_2 e t_3 32
- Figura 6 – Família de LDFs, $I(r, \theta_i)$, para uma imagem típica. A cada 22,5 graus leva a uma LDF para aquele conjunto angular dentro de 6" do limbo. 33
- Figura 7 – Função típica do escurecimento do limbo com dados de uma única observação. A intensidade do limbo é plotado com estrelas, já o quadrado da derivada radial é mostrada com os sinais de mais. A curva mostra o ajuste derivado o qual o máximo determina o raio solar. 33

Figura 8 – Imagens do Sol contendo Mercúrio perto dos tempos de contato, para ambos os trânsitos de 2003 e 2006, assim como a trajetória de Mercúrio e o ajuste do limbo.	34
Figura 9 – LDFs obtidas quando se tem PSF não corrigido (Painel a) e corrigido (Painel b).	35
Figura 10 – Medidas do raio solar em função do comprimento de onda.	36
Figura 11 – Esquema de como os feixes de Baily são formados. A curva de luz depende unicamente da geometria lunar no momento do eclipse.	38
Figura 12 – Diferença entre os dados para o perfil lunar <i>Kaguya</i> , Watts, um eclipse feito em 2006 e ocultações estelares.	39
Figura 13 – Cada passo na geometria das camadas Sol-Lua (parte superior) correspondem a um dado instante na curva de luz (parte inferior). A curva de luz mostra a contribuição de todas as camadas.	39
Figura 14 – Esquema do SDO mostrando na parte superior o instrumento AIA e suas quatro câmeras, já na parte inferior tem-se destacados os instrumentos EVE e HMI, também a antena de comunicação, no lado temos os painéis solares.	42
Figura 15 – Pacote óptico com seus componentes e o caminho que a luz faz ao entrar no instrumento HMI.	45
Figura 16 – Exemplo das posições dos perfis do HMI obtidos do procedimento de calibração de dependência do comprimento de onda. Seis posições ajustáveis são mostradas com respeito a linha solar Fe I (linha preta) no centro do disco e em repouso, no topo da posição ajustável do contínuo (linha tracejada). O perfil de linha Fe I foi provida por R.K. Ulrich e obtida no Observatório do Monte Wilson.	46
Figura 17 – Esquema do pipeline feito pela equipe do SPD para obtenção dos observáveis do HMI.	48
Figura 18 – Escala de placa do HMI (Painel a) e variação de temperatura no pacote óptico (Painel b), no tubo do telescópio (Painel c) e na janela frontal (Panel d).	49
Figura 19 – Raio solar retornado pelo <i>limb finder</i> como função do comprimento de onda efetivo em 17/05/2010. Cada um dos seis loops mostra um raio determinado por uma rotação do sistema de filtros do HMI. A linha sólida é o ajuste gaussiano.	50
Figura 20 – Intensidade média do HMI com o tempo observado pela câmera 1 (em vermelho) e para câmera 2 (em azul). Temos que a intensidade média do HMI diminuiu com o tempo para ambas as câmeras.	56

Figura 21	–Variação na temperatura da porta frontal. Onde temos as quedas verticais provocadas pelos eclipses do HMI com a Terra e um aumento da temperatura da porta frontal com tempo, devido as mudanças ocorridas proximas a janela frontal.	57
Figura 22	–Variação na temperatura do anel de montagem da janela frontal. Onde temos um aumento da temperatura durante os eclipses, pois nesse caso os aquecedores eram ligados para que a recuperação dos componentes próximos a eles fosse mais rápidos após o eclipse.	58
Figura 23	–Variação na temperatura da caixa elétrica frontal da câmera 2.	58
Figura 24	–Variação na temperatura da CCD 2 (frontal). Nesse caso as temperaturas eram mantidas em torno de -50° Celcius.	59
Figura 25	–Variação na temperatura do banco óptico frontal.	59
Figura 26	–Variação na temperatura do forno de filtros.	60
Figura 27	–Painel a temos o $RAIO_0$ obtido com a equação 4.3. E no Painel b $RaioI_0$, obtido com a equação 4.4. No painel a temos o $RAIO_0$ para as duas câmeras, onde temos uma diferença no raio para cada câmera. O mesmo ocorre para o $RAIO_I_0$ (painel b). Notamos ainda o salto no sinal do raio a partir de meados de 2018 para ambas as câmeras e raios analisados.	61
Figura 28	–Painel a temos o $RAIO_6$ obtido com a equação 4.3. E no Painel b $RaioI_6$, obtido com a equação 4.4. Neste caso, temos que os dados do raio eram coletados a cada seis meses para ambas os raios analisados. Notamos também o salto ocorrido em meados de 2018 no sinal do raio para ambos os raios analisados.	62
Figura 29	–Média da diferença do $RLFS_6$ e a interpolação do $RLFS_7$ feito no tempo_7 dividido pela Média de $dist_6$. Temos que a variação média desses dados de 0,004 pixels é um norteador para o tamanho da variação no raio solar que devemos esperar nos dados obtidos pelo HMI.	63
Figura 30	–Curva do gráfico da Figura 27 sem os pontos a partir de 2019, onde os pontos (3689 pontos) em cinza foram observados pela câmera 1 e os em rosa (3679 pontos) pela câmera 2. Os pontos foram tratados de forma que foram removidos àqueles que estavam a mais de 2σ da curva principal.	64
Figura 31	–Intensidade do HMI observado pela câmera 1 (em vermelho) e câmera 2 (em cinza) obtidos com o parâmetro $CMEAN_0$. Temos uma queda significativa na intensidade média do pixels centrais observados pelo HMI com o tempo para ambas as câmeras.	65

Figura 32	–Temperatura do mecanismo de porta não interpolada (em vermelho) e interpolada (em preto). Os tempos da temperatura (mecanismo de porta) foram interpolados no tempos do RAIO_0.	67
Figura 33	–Modelo para cada uma das sete temperaturas em pixel à 1 UA para câmera 1. Painel a = parâmetro I0C1T2, Painel b = I0C1T3, Painel c = I0C1T6, Painel d = I0C1T8, Painel e = I0C1T14, Painel f = I0C1T26, Painel g = CMCAM01. Para referências das nomenclatura ver Tabela 9, no apêndice.	71
Figura 34	–Modelo para cada uma das sete temperaturas em pixel à 1 UA para câmera 2. Painel a = parâmetro I0C1T7, Painel b = I0C1T9, Painel c = I0C1T24, Painel d = I0C1T2, Painel e = I0C1T15, Painel f = I0C1T28, Painel g = I0C1T29. Para referências das nomenclatura ver Tabela 9, no apêndice.	72
Figura 35	–Resultados para câmera 1.Painel a: Raio solar RAIO_0 a 1UA, painel b: Raio do modelo empírico considerando as sete temperaturas do modelo (Tabela 7), painel c: Raio criado pelo modelo. Vemos que o modelo (Painel b) conseguiu corrigir algumas das interferências da temperatura dos instrumentos do HMI utilizando os coeficientes encontrados na Tabela 7.	73
Figura 36	–Resultados para câmera 2. Painel a: Raio solar RAIO_0 a 1UA, painel b: Raio do modelo empírico considerando as sete temperaturas do modelo (Tabela 8), painel c: Raio criado pelo modelo. Vemos que o modelo (Painel b) conseguiu corrigir algumas das interferências da temperatura dos instrumentos do HMI utilizando os coeficientes encontrados na Tabela 8.	74
Figura 37	–Resíduo raio solar para câmera 1. Podemos ver que alguns efeitos instrumentais não foram corrigidos com o modelo proposto utilizando os coeficientes encontrados na Tabela 7.	75
Figura 38	–Resíduo raio solar para câmera 2. Podemos ver que alguns efeitos instrumentais não foram corrigidos com o modelo proposto utilizando os coeficientes encontrados na Tabela 8.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variabilidade do raio solar - Mudança no ciclo solar (a) - Mudança secular (b).	28
Tabela 2 – Características dos instrumentos MDI e HMI	44
Tabela 3 – Exemplos de <i>Filtergram ID</i> (FID) obtidos pelo HMI, seus respectivos estados de polarização e o deslocamento do comprimento de onda respectivo à linha central de emissão do ferro de 6173,34 Å.	46
Tabela 4 – PALAVRA-CHAVES para análise do raio solar utilizadas neste trabalho, sua descrição e unidade.	52
Tabela 5 – PALAVRA-CHAVES para análise da temperatura do instrumento HMI utilizadas neste trabalho e suas descrições.	53
Tabela 6 – FIDs que compuseram a base de dados utilizadas nas análises desta dissertação, suas polarizações e o deslocamento do comprimento de onda respectivo à linha central de emissão do ferro de 6173,34 Å. . . .	54
Tabela 7 – Parâmetros usado no modelo da câmera 1, seus respectivos coeficientes e erros.	68
Tabela 8 – Parâmetros usado no modelo da câmera 2, seus respectivos coeficientes e erros.	68
Tabela 9 – Vetores utilizadas nas análises neste trabalho, suas descrições e manipulações.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIA	<i>Atmospheric Imaging Assembly</i>
AVC	<i>AIA Visualization Center</i>
CCD	Dispositivo de carga acoplada
CPU	Unidade de processamento central
EVE	<i>EUV Variability Experiment</i>
FID	<i>Frame ID</i> (Identificador de definição de quadro)
FITS	<i>Flexible Image Transport System</i>
FSW	Programa de voo
GPU	Unidade de processamento de imagens
HMI	<i>Helioseismic Michelson Imager</i>
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
JSOC	<i>Joint Science Operations Center</i>
LWS	<i>Living with a Star</i>
LDF	Função de escurecimento de limbo
MAS	mili arco segundos
MDI	<i>Michelson Doppler Imager</i>
PSF	Função de espalhamento pontual
SDO	<i>Solar Dynamics Observatory</i>
SDP	<i>Science Data Processing</i>
SODISM	<i>Solar Diameter Imager and Surface Mapper</i>
SOHO	<i>Solar and Heliospheric Observatory</i>
IST	Irradiância Solar Total
UA	Unidade Astronômica
UIA	União Internacional de Astronomia

RCP	Polarização circular para direita
LCP	Polarização circular para esquerda
UTC	Tempo Universal Coordenado

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
1 HISTÓRIA DAS MEDIDAS E VARIAÇÕES DO RAO SOLAR	18
1.1 O TEOREMA VIRIAL	21
1.2 VARIAÇÕES NOS PARÂMETROS SOLARES	26
2 ALGUMAS TÉCNICAS DE MEDIDAS DO RAO SOLAR	31
2.1 MEDIDAS COM TRÂNSITO PLANETÁRIO	31
2.1.1 Trânsito de Mercúrio	31
2.1.2 Trânsito de Vênus	35
2.2 MEDIDAS DO RAO SOLAR COM ECLIPSE	37
3 O SATÉLITE SDO E O INSTRUMENTO HMI	42
3.1 O INSTRUMENTO <i>HELIOSEISMIC AND MAGNETIC IMAGER</i>	43
3.2 OS DADOS DO HMI	47
3.3 MEDIDAS DO RAO SOLAR UTILIZANDO O HMI	48
4 ANÁLISE DE DADOS	52
4.1 DADOS BRUTOS E POR FID	53
4.2 CORREÇÃO DO RAO E DA DISTÂNCIA	54
4.3 MUDANÇAS NA OPACIDADE DA LENTE	55
4.4 MUDANÇAS DE TEMPERATURA NO INSTRUMENTO HMI	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1 MODELO EMPÍRICO DE CORREÇÃO DOS EFEITOS INSTRUMENTAIS	66
5.1.1 Interpolação	66
5.1.2 Teste F	68
5.1.3 Modelos	69
6 CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS	77
APÊNDICE A ESQUEMA DE NOMENCLATURA DAS MANIPULAÇÕES DOS DADOS UTILIZADOS	82

INTRODUÇÃO

Os experimentos para aferir alguns dos parâmetros fundamentais do Sol, historicamente, só foram iniciados com os filósofos gregos em 467 a.C. (como pioneiros na observação solar) e mesmo os chineses em 28 a.C. (GALILEO GALILEI, 1613). Uma das primeiras características a serem notados e registradas a respeito do Sol foram as manchas solares, uma vez que se destacam na superfície do Sol como regiões escuras. Hoje em dia sabe-se que as manchas solares são regiões na fotosfera solar que tem uma temperatura inferior que a do restante do sol, devido a força do campo magnético que podem ser de algumas dezenas de Tesla nesta região (CARROLL; OSTLIE, 2017).

Com o avanço tecnológico houve uma melhor precisão e qualidade das medidas dos parâmetros fundamentais do Sol. O uso do telescópio como instrumento para observações celestiais representou um grande avanço para o estudo do Sol, destacando-se o astrônomo Galileu Galilei como pioneiro na observação e registro das manchas solares a partir de 1609 (GALILEO GALILEI, 1613). Também outras características solares passaram a ser de interesse dos cientistas da época, entre eles, a irradiância solar total (IST), que trata da quantidade total de energia do Sol que chega a Terra, o interesse principal sobre o assunto vem do fato que a produção radiativa total do Sol estabelece o ambiente de radiação da Terra e influencia a temperatura e composição atmosférica (PAP et al., 2001).

O raio solar é outro parâmetro de grande interesse e importância para ser estudado, uma vez que uma determinação precisa do raio solar pode impor limites nos modelos usados da evolução estelar (PAP et al., 2001). Dessa forma nos permitindo entender com mais precisão os processos ocorridos no Sol e por consequência em outras estrelas.

As medidas visuais do raio solar eram inicialmente feitas por observadores que, mais tarde, foram substituídas por CCDs (Dispositivo de carga acoplada). O que permitiu que o raio solar fosse definido encontrando o ponto de inflexão no perfil da intensidade do limbo solar (HABERREITER; SCHMUTZ; KOSOVICHEV, 2008). Ainda hoje, essa é a definição de raio solar mais comumente usada e os instrumentos avançados de observação solar usam essa definição em seus cálculos.

As técnicas para medir o raio solar são diversas e há registros desde os gregos antigos, como será visto com mais detalhes no capítulo 1, estas sendo rudimentares a princípio, mas que permitiram se ter uma idéia do tamanho do raio do Sol. As definições de como o raio do Sol é calculado e medido também se encontram no capítulo 1. Afinal, um corpo gasoso demanda técnicas mais elaboradas para determinar a borda do que de um corpo sólido (SIGISMONDI, 2009). Ainda no capítulo 1, descrevemos com mais detalhes sobre os parâmetros solares que podem influenciar as medidas do raio solar, também serão descritos os mecanismos de produção de energia no interior solar e sobre o teorema do virial. Por fim, ainda apresentamos no primeiro capítulo panorama sobre a precisão da

variação do raio solar através da história de sua observação através de algumas técnicas de medida do raio solar.

A partir do progresso tecnológico, as medidas passaram a serem cada vez mais sofisticadas e portanto mais precisas. Com isso, novas técnicas de medida do raio solar foram surgindo. No capítulo 2, são apresentadas duas técnicas bastante utilizadas ainda hoje, que são a do trânsito planetário e as medidas com eclipses solares. Ainda no capítulo 2 são discutidos as precisões de cada técnica e suas vantagens e desvantagens.

A história das medidas do raio solar segue com o avanço tecnológico até o surgimento dos telescópios espaciais, em que a precisão do raio medido é maior comparada com os métodos de medida do raio usados no solo. O telescópio espacial *Solar Dynamics Observatory* (SDO) trazendo consigo o instrumento *Heliosismic and Magnetic Imager* (HMI) é apresentado no capítulo 3, onde também são mostrados as técnicas de obtenção do raio solar nesse tipo de instrumento e como são feitas a captura e armazenamento dos dados.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia da análise dos dados obtidos através do telescópio espacial SDO, retiradas da plataforma do *Joint Science Operations Center* (JSOC)¹, com objetivo de verificar se houve variação do raio solar no período de 2013 a 2019. Também no capítulo 4 apresenta-se a análise dos dados da temperatura do satélite SDO, uma vez que as medidas do raio solar podem ser influenciadas pela variação da temperatura no satélite, de forma que, por mais que a temperatura seja controlada em alguns dos instrumentos do SDO, como veremos no capítulo 5, ainda assim podem influenciar de maneira significativa as medidas do raio solar feitas com alta precisão.

No capítulo 5 é apresentado os resultados e gráficos feitos através da análise de dados do capítulo 4, também é apresentado um modelo empírico para as medidas do raio solar e são discutidas a extensão da melhora nas medida do raio solar. Por fim, no capítulo 6 temos as conclusões a respeito das análises feitas no capítulo 4 e 5 e as perspectivas de como estas análises podem ser melhoras em trabalhos futuros.

¹ <http://jsoc.stanford.edu/> (JSOC, 2021a)

1 HISTÓRIA DAS MEDIDAS E VARIAÇÕES DO RAIOS SOLAR

Medidas do tamanho do Sol já eram feitas desde os tempos dos gregos, sendo a de Aristarchus de Samos uma das mais conhecidas feita em mais ou menos 350 a.C (PAP et al., 2001). Ele chegou à conclusões sobre o tamanho do Sol usando as relações geométricas entre Sol, Lua e Terra e considerando um valor para o diâmetro da Terra, que já havia sido estimado nesta época (THUILLIER; SOFIA; HABERREITER, 2005). O valor padrão do diâmetro angular do Sol a uma unidade astronômica (UA) é 1919,26 segundos de arco ($arcsec$) e o raio solar ($R_{\odot}$) é de 959,63 $arcsec$. Este valor foi dado por Auwers em 1891 e desde então é usado como referência pela União Internacional de Astronomia (UIA)(SIGISMONDI; MORCOS, 2011).

Conhecer o raio do Sol precisamente é algo de extrema importância, pois como visto na introdução, isto pode nos dar restrições e parâmetros para modelos da irradiância total do Sol e suas variações, sejam estas de longo ou curta duração (HIREMATH et al., 2020). Porém os instrumentos tecnológicos que permitem observações precisas são relativamente recentes. Através da teoria da gravitação, pode-se conhecer a massa de objetos celestes e a sua densidade média (THUILLIER; SOFIA; HABERREITER, 2005). Para um corpo gasoso como o Sol um parâmetro importante é o chamado esfericidade, que ocorre quando o Sol têm desvios do formato de uma esfera (KILCIK et al., 2009). Outro parâmetro relacionado é o achatamento que é a diferença fracional entre o raio polar e equatorial (EMILIO et al., 2007) ou como definido por cálculos numéricos $\epsilon = (R_e - R_p)/R_e$ (KIPPENHAHN; WEIGERT; WEISS, 1990). Enquanto a busca pelos valores precisos do raio solar e suas variações continuam, podemos nos perguntar o que estas medidas podem nos dizer a respeito dos processos que ocorrem no Sol (RIBES et al., 1991).

Uma importante distinção que deve ser feita é entre o raio solar e seu raio aparente. O primeiro é dado em relação a alguns parâmetros teóricos como densidade, potencial gravitacional e profundidade óptica ¹ em um comprimento de onda específico. Já o raio aparente é a medida resultante de alguma técnica específica. O que ocorre na verdade é a medida do diâmetro aparente solar e, portanto, a maioria dos resultados são discutidos em termos do semi diâmetro solar² (RIBES et al., 1991).

Outra distinção importante é entre o raio real e o raio sísmico, o primeiro se refere ao raio obtido através do observações em que se usam medidas feitas no limbo solar. Enquanto o segundo, também chamado de raio acústico, é determinado usando um modelo solar para calibrar o raio obtido pelas frequências observadas, resultando no valor na ca-

¹ A profundidade óptica monocromática ao longo da linha de visão é definida como: $\tau(x) = \int_0^x (\kappa + \sigma) ds$ onde κ é o coeficiente de absorção e σ é o coeficiente de espalhamento monocromático e x é a profundidade geométrica ao longo da linha de visão (FONTENLA et al., 1999)

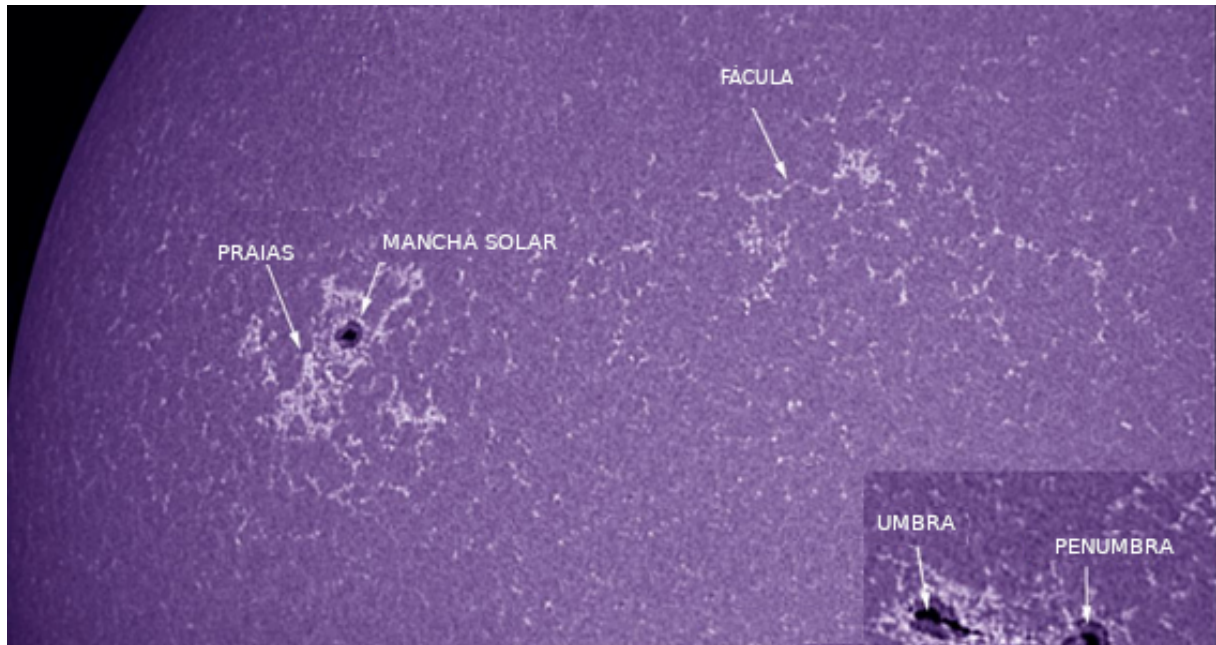
² O semi diâmetro é definido como $s = \arcsen(R_{\odot}/d)$ onde d é a distância do Sol calculada usando as efemérides para o Sol.

mada definida no modelo como o raio (JAIN; TRIPATHY; HILL, 2018). Uma interessante correlação entre os valores desses dois raios é feita nos estudos de Haberreiter, (2008) e de Meftah (2018) que afirma que a diferença entre os raios sísmico e real é de aproximadamente 333 km ($\approx 0,46$ arcsec), reconciliando as medidas feitas através do ponto de inflexão (que veremos abaixo) e do raio sísmico dentro das incertezas (HABERREITER; SCHMUTZ; KOSOVICHEV, 2008)(MEFTAH et al., 2018).

Para determinar o raio solar, usa-se a distância do Sol e a medida do diâmetro angular do disco visível. Para o método fotométrico este diâmetro é definido como a distância angular entre os pontos de inflexão dos perfis de intensidade em dois pontos opostos da borda do Sol (limbo) (STIX, 2012).

Nos modelos do Sol para o cálculo do raio, leva-se em consideração a irradiância, o comprimento de onda estudado e os modelos para o número de manchas solares e praias (regiões brilhantes de emissão de $H\alpha$ que aparecem próximas as manchas solares (CARROLL; OSTLIE, 2017)). Uma configuração dessas características no Sol podem serem vistas na Figura 1.

Figura 1 – Imagem do Sol feita usando telescópio Coronado CaK PST contendo as seguintes regiões ativas do Sol: fáculas, praias e manchas solares com as suas regiões, umbra e penumbra destacadas no canto inferior direito, onde a primeira é a parte mais interna da mancha e a segunda a parte externa da mancha.

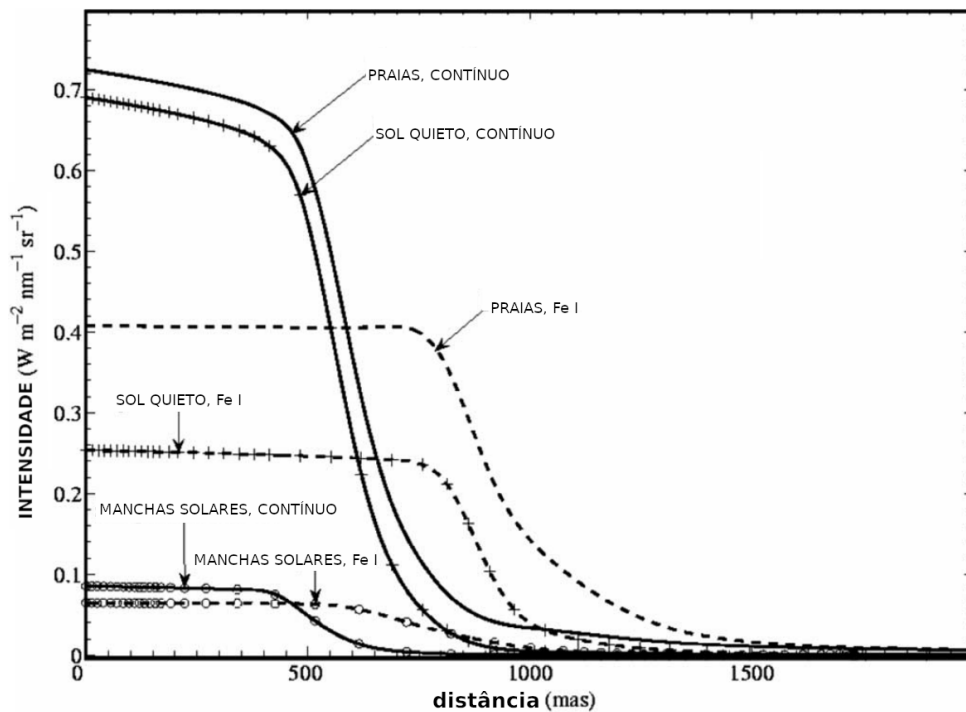


Fonte: Adaptada de HART, A (2021)

Um dos modelos chamado de o Sol quieto, ocorre quando o Sol está em seu mínimo de atividade, ou seja, sem muitas manchas solares, é o mais usado. Neste modelo, a profundidade óptica é a de $\tau_{(500\text{ nm})} = 1$. Mas usando valores diferentes de profundidade

óptica, obtém-se valores diferentes de raio como mostrado na simulação realizada por Gerard Thuillier, Sabatino Sofia e Margit Haberreiter, mostrado na Figura 2 (THUILLIER; SOFIA; HABERREITER, 2005). Nesta tem-se a comparação de perfis da borda solar calculados com o código de transferência radiativa COSI de Haberreiter and Schmutz, (2003) (HABERREITER; SCHMUTZ, 2003), onde um ponto de inflexão mais alto na fotosfera foi encontrado para a linha do Fe I, ou seja, um maior raio, para os três casos analisados.

Figura 2 – Comparação da diminuição da intensidade do limbo solar para manchas solares, Sol quieto e praias com a distância do raio medido em mili arcsec (*mas*). As linhas sólidas representam as intensidades no contínuo e as linhas pontilhadas são as intensidades com respeito a linha central do Fe I.



Fonte: Adaptada de Thuillier et al., (2005).

O desafio comum em determinar a borda de uma estrela está na definição da posição da borda, uma vez que uma superfície gasosa não tem uma borda definida como de um planeta rochoso ou satélite natural, dependendo da definição usada, haverá resultados diferentes para o valor do raio. Dessa forma, por mais precisa a técnica ainda apresentarão baixa acurácia devido a erros sistemáticos e os valores obtidos por definições diferentes raramente podem ser comparadas (THUILLIER et al., 2017).

A definição mais comumente usada para a borda do Sol é a determinação do ponto de inflexão do perfil do Limbo, usando as chamadas funções de escurecimento de borda (LDF) (MEFTAH et al., 2012). O processo do escurecimento de borda ocorre uma vez que as imagens solares no espectro do visível mostram que o centro do disco é mais brilhante do que na região da borda (RAPONI et al., 2012). O ponto de inflexão é definido

como o quadrado da derivada máxima da LDF no sistema de coordenadas polares (um exemplo de LDF típica pode ser visto na Figura 6) (MEFTAH et al., 2012).

Dependendo do método e do equipamento utilizado há outras definições que podem ser adotadas. Também é importante definir um comprimento de onda para observar o Sol, já que alguns instrumentos operam numa faixa específica das linhas de Fraunhofer, enquanto outros operam no espectro contínuo fotosférico. A escolha de qual será o domínio do espectro usado é importante, pois ao longo do perfil espectral das linhas de Fraunhofer condiz com fótons que se originam a diferentes camadas no Sol, podendo corresponder a fótons desde a fotosfera até a cromosfera solar (THUILLIER; SOFIA; HABERREITER, 2005). Também há evidências de que certas linhas variam de acordo com a atividade solar (AVRETT, 1992).

A dependência do raio solar com o comprimento de onda ficou mais clara através medidas feitas pela missão PICARD (em homenagem ao astrônomo francês do século XVII Jean PICARD que mediu o raio solar e sua rotação diferencial) feitas com o telescópio SODISM (*Solar Diameter Imager and Surface Mapper*) a bordo da espaçonave PICARD. No trabalho relatado por Meftah (2018) foram feitas medidas do raio solar em diversos comprimentos de onda, indo de 535.7 nm à 1025.0 nm mostrando que a dependência do raio com o comprimento de onda é fraca, sendo menores que 100 *mas* (MEFTAH et al., 2018).

Como a forma fotométrica do limbo é o que mais importa na determinação do raio e como regiões ativas podem aparecer muitas vezes no limbo solar, deve-se cuidadosamente detectar e levar em conta estas regiões. Por exemplo, uma mancha solar causa uma diminuição na intensidade local (chamado efeito Wilson), o que pode levar a uma diminuição no raio determinado, já as fáculas, que são regiões mais brilhantes na fotosfera solar, podem gerar o efeito oposto (THUILLIER; SOFIA; HABERREITER, 2005). Assim, quando o objetivo principal é obter o raio solar o melhor é evitar medidas no limbo em que contém tais regiões (RAPONI et al., 2012).

Outro ponto a ser considerado na determinação do raio é o tratamento do ruído nas imagens. No espectro visível, o ponto de inflexão geralmente está na região de baixa intensidade da imagem, se comparada com a região central, assim deve ser cuidado para que as técnicas de suavização destes ruídos não afetem a posição do ponto de inflexão (THUILLIER; SOFIA; HABERREITER, 2005)

1.1 O TEOREMA VIRIAL

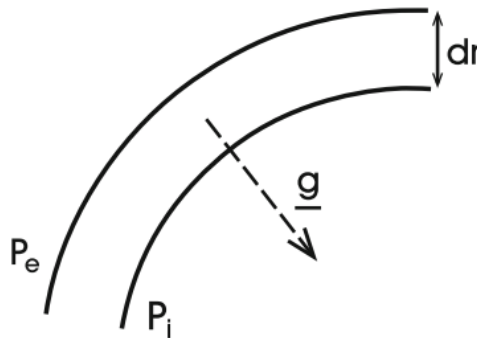
Quando pensamos em variações dos parâmetros do Sol, como raio, luminosidade e massa, comparado com escalas de tempo nucleares, pode-se dizer que o raio e luminosidade são praticamente constantes. Entretanto, as observações de grandes variações no número

de manchas solares que vemos em relativamente curtos períodos de tempo (de décadas à séculos), sugerem que também uma certa variação tanto no raio como na luminosidade, ainda que pequenas (cerca de 1%), devem ocorrer (GILLILAND, 1981). Analisando os modelos estelares pode-se ter um melhor entendimento dos processos que estão ocorrendo no Sol.

O modelo de estrelas em que há um equilíbrio mecânico, ou seja, em que todas as forças agindo em um elemento de massa dentro de uma estrela se compensam, é chamado de equilíbrio hidrostático. Neste modelo, o teorema virial tem um papel fundamental, pois conecta os dois reservatórios de energia na estrela: a energia gravitacional e a energia interna.

Considerando uma casca esférica com uma espessura infinitesimal dr em um raio r dentro da estrela, cuja massa e peso da casca, por unidade de área da casca, são respectivamente ρdr e $-g\rho dr$. Este peso é a força gravitacional agindo em direção ao centro da estrela. Para impedir o elemento de casca de ser acelerado nesta direção, deve haver uma força devido a pressão agindo na direção contrária. Assim, a casca deve sentir uma pressão maior no seu interior P_i , ou seja, na camada mais abaixo da casca do que na camada externa (onde temos P_e), como mostra Figura 3 (KIPPENHAHN; WEIGERT; WEISS, 1990).

Figura 3 – Esquema de um elemento de casca, onde dr é a espessura da casca, P_e a pressão externa, P_i a pressão interna e g a gravidade.



Fonte: KIPPENHAHN, WEIGERT, WEISS, 1990, p. 10.

A força total por unidade de área agindo nessa casca, devido a diferença de pressão, é:

$$P_i - P_e = -\frac{\partial P}{\partial r} dr \quad (1.1)$$

Assim para a configuração de equilíbrio hidrostático, sabe-se que as somas das

forças devido a pressão e a gravidade devem ser igual a zero, ou seja:

$$\frac{\partial P}{\partial r} + g\rho = 0 \quad (1.2)$$

Usando $g = Gm/r^2$, temos:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{-Gm}{r^2} \rho \quad (1.3)$$

Que mostra o equilíbrio de forças da pressão e gravidade. Agora, tomando m como variável independente ao invés de r , obtém-se a condição hidrostática, levando em consideração que $\partial r / \partial m = (4\pi r^2 \rho)^{-1}$, temos:

$$\frac{\partial P}{\partial m} = \frac{-Gm}{4\pi r^4} \quad (1.4)$$

Agora, multiplicando esta equação por $4\pi r^3$ e integrando sobre dm no intervalo $[0, M]$, ou seja, do centro à superfície, obtemos uma integral que pode ser simplificada por integração por partes, como:

$$\int_0^M 4\pi r^3 \frac{\partial P}{\partial m} dm = [4\pi r^3 P]_0^M - \int_0^M 12\pi r^2 \frac{\partial r}{\partial m} P dm \quad (1.5)$$

onde o termo em colchetes some, uma vez que $r = 0$ no centro e $P = 0$ na superfície. Usando a condição $\partial r / \partial m = (4\pi r^2 \rho)^{-1}$, o integrando do último termo da Equação 1.5 é reduzido a $3P/\rho$. Assim, depois de multiplicar a Equação 1.4 por $4\pi r^3$ e integrar, temos:

$$\int_0^M \frac{Gm}{r} dm = 3 \int_0^M \frac{P}{\rho} dm \quad (1.6)$$

onde ambos os lados da Equação 1.6 tem dimensão de energia e podem ser facilmente interpretadas. Definimos, portanto, a energia gravitacional E_g como:

$$E_g \equiv - \int_0^M \frac{Gm}{r} dm \quad (1.7)$$

Vemos que E_g varia se a configuração estelar sofre uma expansão ou contração: se todas as cascas de massa dentro da configuração expandem ou contraem, então E_g aumenta ou diminui, respectivamente.

Em ordem de entender o significado do termo a direita da Equação 1.6, primeiro assumimos um gás perfeito, então:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{R}{\mu} T = (c_p - c_v) T = (\gamma - 1) c_v T, \quad (1.8)$$

onde c_p, c_v são os calores específicos, por unidade de massa, e μ é a massa molar. Foi usado $R/\mu = c_p - c_v$ e substituindo c_p/c_v por γ . Para um gás monoatômico temos que $\gamma = 5/3$, assim:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{2}{3} u \quad (1.9)$$

onde $u = c_v T$ é a energia interna de um gás perfeito por unidade de massa, assim, podemos reescrever a Equação 1.6 como:

$$E_g = -2E_i \quad (1.10)$$

com a energia interna total da estrela sendo:

$$E_i = \int_0^M u \, dm \quad (1.11)$$

A Equação 1.10 é o teorema virial para um gás perfeito monoatômico. Agora, definimos a energia total da configuração como:

$$E \equiv E_i + E_g \quad (1.12)$$

Em geral, E , E_g e E_i são conectados, assim, uma mudança da energia total da configuração é seguida de uma mudança da sua energia interna e também de uma expansão ou encolhimento. Um gás a temperatura finita deve irradiar e E deve diminuir. Seja L a luminosidade da estrela, ou seja, a perda total de energia por unidade de tempo devido a irradiação, então a conservação de energia demanda que $(dE/dt) + L = 0$. Para um gás perfeito, temos que:

$$L = -\frac{\dot{E}_g}{2} = \dot{E}_i \quad (1.13)$$

Que significa que metade da energia liberada por contração é irradiada e a outra metade é usada para aquecer a estrela com $L > 0$ e $\dot{E}_i > 0$. Portanto, é a luminosidade que causa encolhimento e uma configuração no equilíbrio hidrostático tem uma temperatura finita e assim irradia para o universo frio (KIPPENHAHN; WEIGERT; WEISS, 1990).

A partir da equação 1.13, podemos definir o escala temporal característica:

$$\tau_{KH} := \frac{|E_g|}{L} \approx \frac{E_i}{L} \quad (1.14)$$

chamada de escala de tempo de Kelvin–Helmholtz (em homenagem aos dois físicos que estimaram esta como sendo a escala de tempo evolucionária para uma estrela que está se contraindo ou expandindo) (KIPPENHAHN; WEIGERT; WEISS, 1990).

Para encontrarmos uma Estimativa para E_g , consideramos a força gravitacional em uma massa pontual dm_i localizada fora de uma massa esfericamente simétrica M_r como sendo (CARROLL; OSTLIE, 2017):

$$dF_{g,i} = G \frac{M_r dm_i}{r^2} \quad (1.15)$$

E aponta para o centro da esfera. Assim, a energia potencial gravitacional da massa pontual é:

$$dU_{g,i} = -G \frac{M_r dm_i}{r} \quad (1.16)$$

Agora, se considerarmos ao invés de massas pontuais, como a massa sendo uniformemente distribuída dentro de uma casca de espessura dr e massa dm (onde dm é a soma de todas as massas pontuais dm_i), então:

$$dm = 4\pi r^2 \rho dr \quad (1.17)$$

onde ρ é a densidade de massa da casca e $4\pi r^2$ é seu volume. Assim:

$$dU_g = -G \frac{M_r 4\pi r^2 \rho}{r} dr \quad (1.18)$$

Integrando sobre todas as cascas de massa do centro da estrela à superfície, a energia potencial total se torna:

$$U_g = -4\pi G \int_0^R M_r \rho r dr \quad (1.19)$$

onde R é o raio da estrela.

O cálculo exato de U_g requer saber como ρ e consequentemente M_r dependem em r . Mesmo assim, um valor aproximado pode ser obtido considerando ρ constante e igual ao seu valor médio, ou seja:

$$\rho \approx \bar{\rho} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \quad (1.20)$$

M sendo a massa total da estrela. Agora, podemos aproximar M_r por:

$$M_r \approx \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{\rho} \quad (1.21)$$

Se substituirmos a equação (1.19), a energia potencial gravitacional se torna:

$$U_g \approx \frac{-16\pi}{15} G \bar{\rho}^2 R^5 \approx -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \quad (1.22)$$

E então, aplicando o teorema virial, temos que a energia mecânica total da estrela é:

$$E_g \approx -\frac{3}{10} \frac{GM^2}{R} \quad (1.23)$$

Podemos escrever,

$$\Delta E_g = -(E_f - E_i) \approx -\frac{3}{10} \frac{GM^2}{(R_f - R_i)} \quad (1.24)$$

Usando os valores padrões de $G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, $M_\odot = 1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$, $R_i = R_\odot = 6,957 \times 10^8 \text{ m}$ e $R_f = 6,95845 \times 10^8 \text{ m}$, onde foi usado o valor da variação no raio de $0,2$ em um ciclo solar, que equivale a $145,05 \times 10^3 \text{ m}$, como reportado por Laclare (1996) (LACLARE et al., 1996), temos

$$|\Delta E_g| = \left| -\frac{3}{10} GM^2 \left(\frac{1}{(R_f)} - \frac{1}{(R_i)} \right) \right| \quad (1.25)$$

E assim:

$$|\Delta E_g| = 2,37411 \times 10^{37} \text{ J} \quad (1.26)$$

Usando a equação 1.14 podemos estimar o tempo necessário para o Sol produzir essa energia:

$$\tau = \frac{\Delta E_g}{L_\odot} = 1,965 \text{ anos} \quad (1.27)$$

A luminosidade é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$L = \sigma T^4 \quad (1.28)$$

com $\sigma = 5,6696 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, temos a luminosidade do Sol:

$$L_\odot = 3,828 \times 10^{26} \text{ W} \quad (1.29)$$

Assim, a variação na luminosidade devido a uma variação no raio de $0,2$, seria usando R_f e R_i mencionados acima e $T_\odot = 5778 \text{ K}$:

$$\Delta L = 4\pi T_\odot^4 (R_f - R_i) \quad (1.30)$$

E portanto:

$$\Delta L = 2,95358 \times 10^{26} \text{ W} \quad (1.31)$$

O que equivale a 77% da luminosidade total solar em 11 anos .

Essa variação na luminosidade não é observada e portanto a observação da variação de $0,2$ no raio solar reportada por Laclare (1996) é muito grande para ser atribuída ao raio solar. Seguindo as equações acima o Sol levaria cerca de 2000 anos para irradiar todo esse brilho. A variação da luminosidade observada em 11 anos é de 0,1% segundo Willson, Hudson (1991) (WILLSON; HUDSON, 1991). Porém na teoria de evolução estelar na escala a variação na luminosidade esperada segundo a escala de Kelvin-Helmholtz é de cerca de $10^{-11} L/L_\odot$ dentro de um ciclo solar. Isso equivaleria a uma variação no raio de $9,6 \times 10^{-8} R/R_\odot$ no ciclo solar.

1.2 VARIAÇÕES NOS PARÂMETROS SOLARES

Os modelos do Sol geram um parâmetro W que conecta a variação relativa do diâmetro fotosférico D com a variação relativa da luminosidade L , ou seja:

$$W = (\Delta D/D)/(\Delta L/L) \quad (1.32)$$

Para obter W é necessário o conhecimento da variação relativa tanto do diâmetro quanto da luminosidade solar. Embora providenciado por muitos autores, usando diferentes hipóteses, estas reconstruções da luminosidade geralmente diferem em certos períodos. Para fazer este tipo de estimativa de longo termo da luminosidade solar, é usado a irradiância total solar (IST) e dois mínimos solares consecutivos³ (THUILLIER; SOFIA; HABERREITER, 2005).

O estudo de Jain, (2018) sobre a relação entre a variação do raio solar (sísmico) e o IST revelou uma fraca anticorrelação e concluiu que a variação máxima do raio sísmico nos ciclos solares 23 e 24 não excedeu 5 Km, enquanto afirma que a variação de 0.1% entre o média máximo e mínimo observada no ciclo, corresponderia a uma mudança no raio sísmico de 10 Km. Também trouxe a importante conclusão de que as variações no IST mais relevantes estão relacionados ao campo magnético, enquanto a variação no raio solar teve um papel secundário. Embora esses resultados apenas se apliquem a estrutura exterior da zona convectiva, é um método bastante seguro para diagnosticar mudanças no raio sísmico a apenas alguns megametros abaixo da superfície do Sol, onde é definido o raio sísmico, e como vimos difere apenas 0,3 Mm do raio solar real (JAIN; TRIPATHY; HILL, 2018).

Vários modelos apresentam valores distintos de W . Por exemplo, dependendo dos detalhes do modelo solar e da forma de perturbação, estimativas teóricas de W variam entre 2×10^{-4} e $7,5 \times 10^{-2}$. Sendo que amplitude da luminosidade no ciclo solar é de 0,1%, uma sensibilidade das medidas do raio de pelo menos 70 *mas* é necessária para discriminar entre algum desses modelos. Há também especulações que sugerem que W pode ter valores positivos e negativos (EMILIO et al., 2000). Num estudo sobre a constância no raio do Sol, Emilio & Kuhn (2000), usando o instrumento Michelson Doppler Imager (MDI) a bordo do telescópio espacial *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO), calcularam a variação linear residual no raio solar em $8,1 \pm 0,9$ *mas* por ano e também os autores adotaram o valor teto para W como sendo 2×10^{-2} (EMILIO et al., 2000).

Devido as variações nas medidas de luminosidade, irradiância total e raio, entende-se que algum processo no interior do Sol está perturbando o equilíbrio da estrutura estelar. Conhecer a magnitude da flutuação destes parâmetros possibilitaria compreender a origem do ciclo solar (EMILIO et al., 2000). Assim, as medidas precisas do raio solar são de extrema importância, pois possibilitariam os modelos do Sol ficariam mais precisos e o entendimento sobre os processos ocorridos no interior solar mais claros.

Existem medidas do raio do Sol feitas na Terra durante os últimos 300 anos, porém muitos apresentam resultados controversos e inconsistentes. Dados históricos mostram que o raio solar pode ter sido maior durante o Mínimo de Maunder, que coincide com os períodos de extremo frio na Europa e nas regiões atlânticas. Estes mesmos resultados são sugeridos pela medida do raio solar pelo equipamento francês CERGA, que mediu o raio

³ O mínimo solar é medido durante o ciclo de manchas solares que dura cerca de 11 anos

solar durante um mínimo de atividades solares. Existem também pistas de uma variação solar periódica em uma escala de 1000 dias a 80 anos, mas as medidas geralmente não são nem consistentes nem conclusivas (EMILIO et al., 2000)

A Tabela 1 resume a variabilidade do raio solar no período de 1631 a 2013 por diversos autores. Quando a variação do raio está em fase com o ciclo de manchas solares, os valores são positivos e quando estão negativos indicam uma anticorrelação com a atividade solar (MEFTAH et al., 2012).

Tabela 1 – Variabilidade do raio solar - Mudança no ciclo solar (a) - Mudança secular (b).

Autores	Período	$[mas]^a$	$[mas/ano]^b$
Eddy and Boornazian (1979)	1836-1953	-	-11.25
Parkinson (1980)	1715-1980	-	-1.4
Shapiro (1980)	1736-1973	-	-1.5
Gilliland (1981)	1715-1979	-100	-1.5
Wittmann (1993)	1990-1992	+400	-
Ulrich and Bertello (1995)	1970-2003	+200	-
Emilio (2000)	1996-2000	<+21	+8.1
Sveshnikov (2002)	1631-1979	+80	-
Antia (2003)	1995-2004	+3	-
Kuhn (2004)	1996-2004	<+7	<-15
Noel (2004)	1991-2002	+52	
Kiliç (2005)	2001-2003	-17	-
Chapman (2008)	1986-2004	+136	-
Bush (2010)	1996-2010	<+23	-1.2
Meftah (2014)	2011-2013	-50	-
Vaquero (2016)	1773-2006	0	-
Thuillier (2017)	2010-2013	<+26	-
Hiremath (2020)	1923-2011	-1	-

Fonte: Adaptado de Meftah (2012).

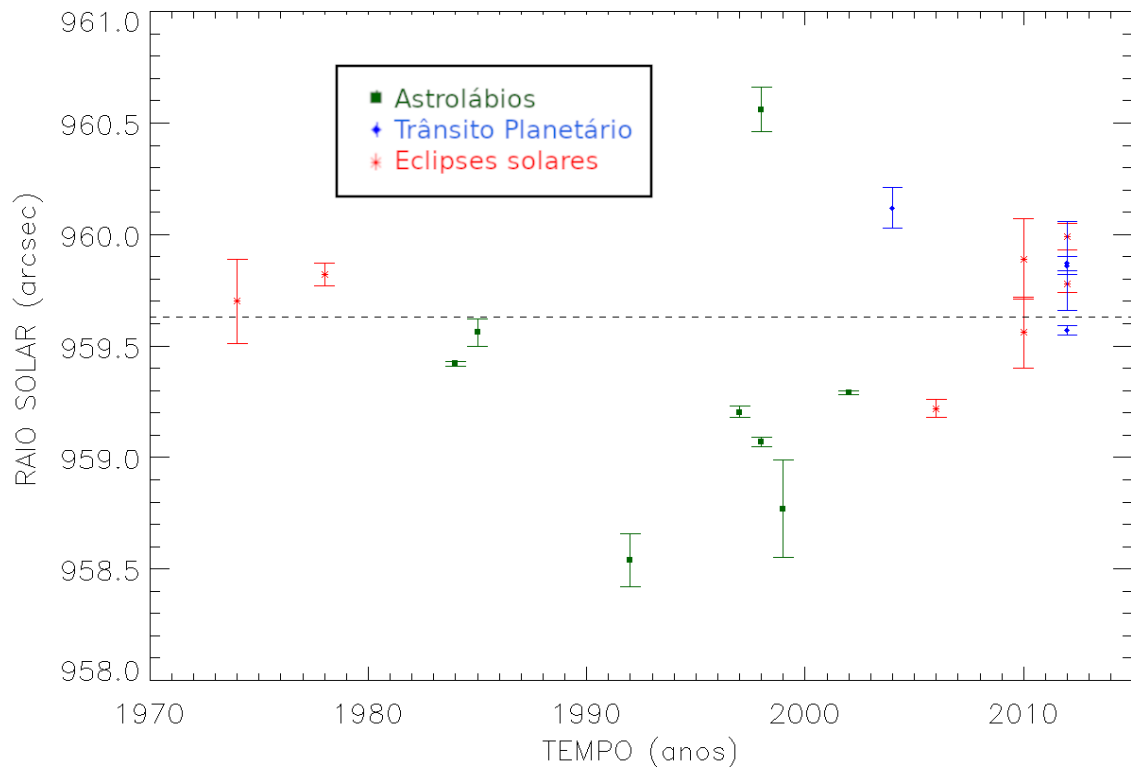
Dado a magnitude pequena do sinal de variações no raio, está claro que as medidas feitas na Terra estão limitadas pelo efeito da atmosfera terrestre, chamado de efeito *seeing*. Entretanto, usando instrumentos como o *Michelson Doppler Imager* (MDI) que é um interferômetro Michelson de imagem Doppler a bordo do satélite *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO), assim como com o instrumento HMI, que é uma versão melhorado do MDI a bordo da satélite SDO, temos a possibilidade de medidas mais acuradas do raio solar que só podem ser obtidas do espaço (EMILIO et al., 2000).

Muitos autores analisaram conjuntos de dados de medidas do raio solar usando diferentes técnicas. Mesmo que nem sempre seja possível fazer uma comparação direta entre os resultados obtidos por técnicas diferentes, ainda é possível tirar algumas conclusões destes resultados. Um estudo de Vaquero (2016), trouxe medidas do raio solar feita pelo observatório real da marinha espanhola, que monitora o Sol desde sua criação em 1753. Nesse estudo não foi revelado nenhuma tendência significativa de longo termo

e confirmou a constância no raio solar nos últimos 250 anos (VAQUERO et al., 2016). Conclusões semelhantes são encontradas no estudo recente de Himemath (2020) a respeito da constância do raio solar no período de 1926 a 2011, as análises foram feitas por imagens em luz branca do Sol, disponibilizadas pelo programa de arquivos Kodaikanal do Instituto Indiano de Astrofísica em Bangalore . Ainda nesse estudo detectou-se o período atualizado do ciclo solar de 11,4 anos (HIREMATH et al., 2020).

Na Figura 4 é mostrado algumas medidas de vários autores do raio solar obtidas por três técnicas diferentes: trânsito planetário, astrolábios e eclipses solares.

Figura 4 – Medidas médias do raio solar (ano médio de quando as medidas foram feitas). A linha pontilhada trás o valor de referência (959,63 *arcsec*) do Almanaque Astronômico feito por Auwers (1891). As medidas feitas com eclipse solar estão marcadas com um asterisco vermelho e foram feitas por (FIALA; DUNHAM; SOFIA, 1994), (KUBO, 1993), (RAPONI et al., 2012), (KILCIK et al., 2009), (LAMY et al., 2015), (ADASSURIYA; GUNASEKERA; SAMARASINHA, 2011) e (THUILLIER et al., 2017). Já as medidas feitas com astrolábio são mostrados com um quadrado verde e são de (NOEL, 2001), (SANCHEZ et al., 1995), (LACLARE et al., 1996), (KILIC; GOLBASI; CHOLLET, 2005), (JILINSKI et al., 1999), (PULIAEV et al., 2000), (GOLBASI et al., 2001) e (EMILIO; LEISTER, 2005). Já as medidas feitas através da técnica de trânsito planetário que estão marcadas com um diamante azul foram feitas por (EMILIO et al., 2012), (HAUCHECORNE et al., 2014), (MEFTAH et al., 2014), (EMILIO et al., 2014) e (MEFTAH et al., 2018).



Fonte: A autora.

No próximo capítulo vamos conhecer melhor algumas das principais técnicas de

medidas do raio solar e ver quais conclusões algumas destas trazem a respeito da variação no raio solar.

2 ALGUMAS TÉCNICAS DE MEDIDAS DO RAIOS SOLAR

2.1 MEDIDAS COM TRÂNSITO PLANETÁRIO

As medidas com trânsito planetário são as que nos dão o valor mais preciso para detectar mudanças de longo prazo no raio solar (PARKINSON; MORRISON; STEPHENSON, 1980). Consistem em observações do tempo que os planetas internos Mercúrio e Vênus levam para cruzar a face do sol para a medida do raio solar. Estas medidas podem ser feitas todas as vezes que estes planetas passam na frente do Sol, entretanto deve-se ter filtros e equipamentos adequados para observação do Sol e captação das imagens. Foi somente em 2014 que a medida mais precisa do raio do Sol, utilizando esta técnica, foi obtida. Esta medida usou o trânsito de Vênus ocorrido em 2012 e o equipamento HMI, a bordo da satélite SDO (EMILIO et al., 2014).

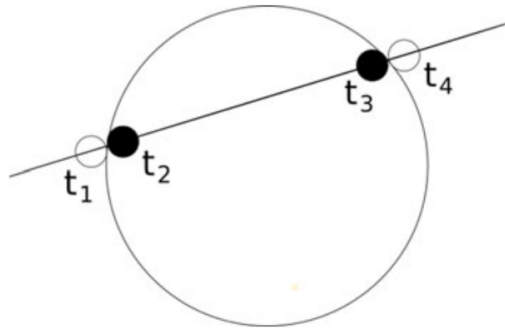
2.1.1 Trânsito de Mercúrio

As medidas do raio do Sol utilizando o trânsito planetário de Mercúrio podem serem feitas 14 vezes a cada século, ocorrendo apenas nos meses de maio e novembro quando a Terra e Mercúrio estão aproximadamente alinhados no mesmo lado do Sol (SHAPIRO, 1980). A duração máxima do trânsito central em maio é de 8 horas e em novembro de 6 horas. Conseguindo marcar o tempo em que Mercúrio toca a borda do Sol com precisão de 1 segundo a resolução obtida para o raio do Sol seria de 0,1 *arcsec*, entretanto, como existe a dificuldade observacional de saber precisamente quando Mercúrio tocou o limbo do Sol, esta precisão cai para 0,5 à 1 *arcsec*.

Para cada trânsito, deve-se gravar 4 tempos de contato, onde dois são externos e dois são internos (quando o planeta aparenta estar completamente fora e dentro do Sol, respectivamente). Estes últimos são determinados com mais precisão e portanto são usados para medidas na variação do raio do Sol (PARKINSON; MORRISON; STEPHENSON, 1980). O esquema dos tempos de contato são mostrados na Figura 5 (EMILIO et al., 2019).

As observações do trânsito feitas na Terra, são limitadas por quão precisamente pode-se determinar o instante em que Mercúrio cruzou o limbo. Já os tempos de contato podem ter erros devido principalmente a distorções na atmosfera e a intensidade do gradiente de luminosidade próximo ao limbo. Observar o Sol do espaço melhoraria pelo menos 10 vezes a acurácia das observações clássicas (EMILIO et al., 2012). Até o surgimento dos telescópios espaciais, como o SOHO não existiam experimentos espaciais que podiam fornecer dados astrométricos interessantes sobre o disco completo do Sol (KUHN

Figura 5 – As observações para medida do raio solar consistem em marcar os tempos de contato externo t_1 e t_4 e de contato interno t_2 e t_3 .



Fonte: Emilio (2019).

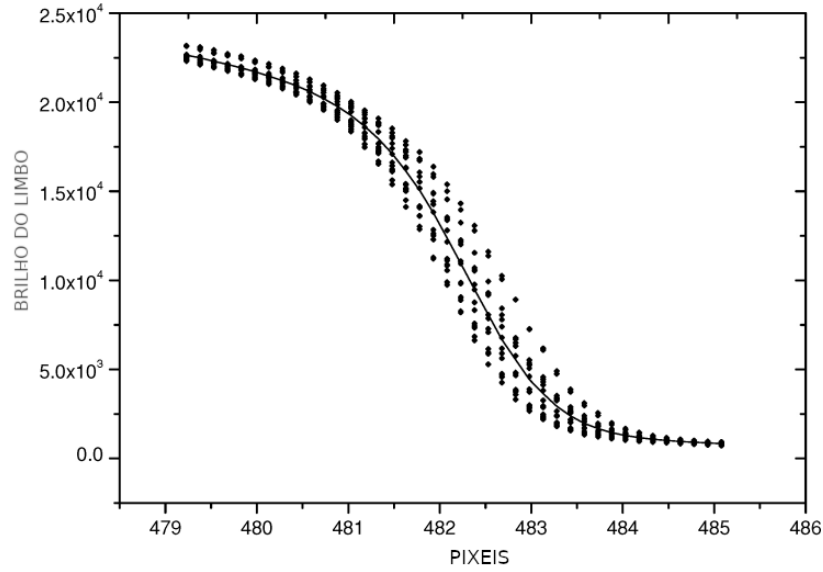
et al., 1997). Os tempos de contato entre Mercúrio e o limbo solar já eram usadas para calcular o tamanho do Sol desde o século dezessete, porém, com o advento do SOHO, foi a primeira vez que foi conseguido uma imagem de alta qualidade tirada fora da atmosfera da Terra (EMILIO et al., 2012).

O componente MDI do SOHO mede a variação e o valor absoluto do raio solar, este consiste em um instrumento de banda estreita de filtrogramas, designados inicialmente para medir a velocidade estrutural de rotação da fotosfera solar (SCHERRER et al., 1995). O conjunto de dados consiste de medidas de intensidade de 6 pixels obtidas de imagens solares produzidas durante as operações de rotina do experimento MDI. Depois das imagens serem calibradas, as LDFs são calculadas através de histogramas de cada pixel em cada 16 subregiões angulares ao redor do limbo. Cada 22,5 graus leva a uma LDF para aquele conjunto angular dentro de 6 *arcsec* do limbo (EMILIO; KUHN; BUSH, 2009). Na Figura 6 é mostrado uma família de LDFs, $I(r, \theta_i)$, para uma imagem típica.

A definição da posição da borda do limbo é feita ajustando uma gaussiana por mínimos quadrados mais uma função quadrática de fundo para a distância radial do centro da imagem r , ao quadrado da derivada radial da LDF média. Isto garante valores positivos mesmo para casos com grande flutuações e ruídos, como pode é mostrado na Figura 7. Assim, é adotado o máximo desta função de ajuste como sendo o raio do limbo. A posição do limbo de cada conjunto é obtida encontrando o ponto de inflexão da LDF (EMILIO; KUHN; BUSH, 2009).

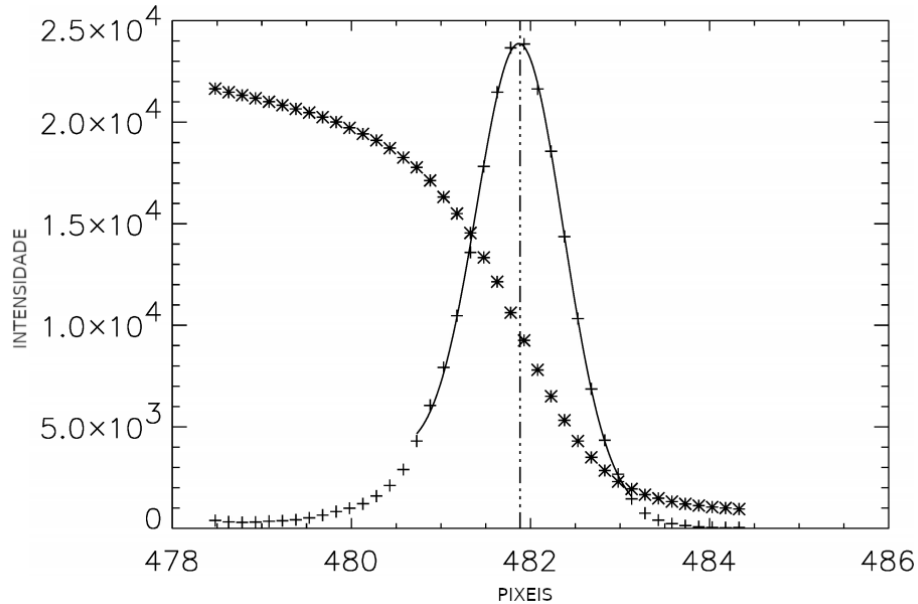
No trabalho de Emilio et al., (2012) os tempos de contatos eram encontrados de um ajuste por mínimos quadrados da posição central de Mercúrio na trajetória $x_{FB}(t)$ e $y_{FB}(t)$ para as intersecções com o limbo próximo dos primeiros/segundos e terceiros/quartos contatos. O valor do raio solar reportado pelos autores nesta análise foi $960'', 12 \pm 0'', 09$ ($696,342 \pm 65$ km), também reportaram não encontrar nenhuma variação no raio solar nos últimos 3 anos observados pelos dois trânsitos (EMILIO et al., 2012). Na Figura 8 é mostrado em destaque as imagens do Sol feitas pelo SOHO contendo

Figura 6 – Família de LDFs, $I(r, \theta_i)$, para uma imagem típica. A cada 22,5 graus leva a uma LDF para aquele conjunto angular dentro de 6" do limbo.



Fonte: Adaptado de Emilio et al., (2010).

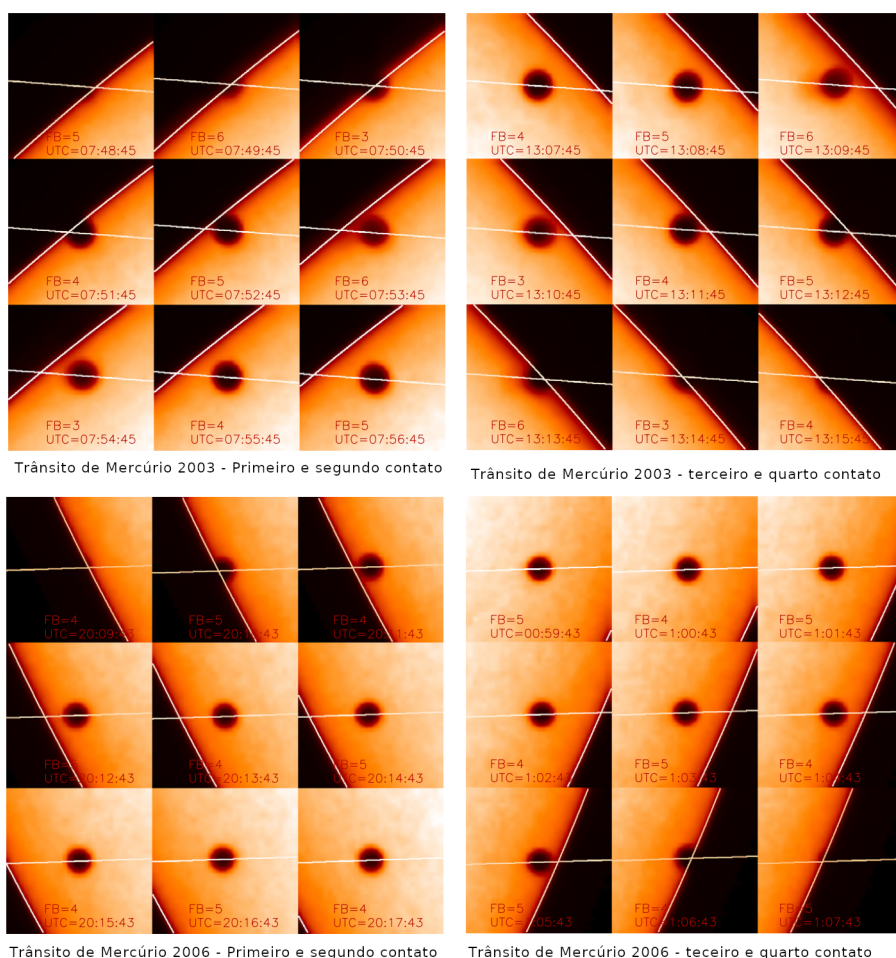
Figura 7 – Função típica do escurecimento do limbo com dados de uma única observação. A intensidade do limbo é plotado com estrelas, já o quadrado da derivada radial é mostrada com os sinais de mais. A curva mostra o ajuste derivado o qual o máximo determina o raio solar.



Fonte: Adaptado de Emilio et al., (2010).

Mércurio perto dos tempos de contato para ambos os trânsitos de 2003 e 2006, assim como a trajetória de Mércurio e o ajuste do limbo (EMILIO et al., 2012)

Figura 8 – Imagens do Sol contendo Mercúrio perto dos tempos de contato, para ambos os trânsitos de 2003 e 2006, assim como a trajetória de Mercúrio e o ajuste do limbo.



Fonte: Adaptado Emilio et al., (2012).

Uma análise com mais de 2000 medidas de tempos de contato interno feitas em 30 trânsitos de Mercúrio, distribuídos pelos últimos 250 anos, foram analisados por Parkinson e colaboradores em 1980. Essas medidas, coletadas principalmente para determinar as variações da taxa de rotação da Terra e o avanço relativístico do periélio da órbita de Mercúrio, permitem obter uma combinação entre os diâmetros do Sol e de Mercúrio, por intermédio da separação angular entre esses objetos. Nesta análise, Parkinson encontrou uma diminuição no semi diâmetro solar de $0'',14 \pm 0'',08$ para o período de 1723 a 1973 (PARKINSON; MORRISON; STEPHENSON, 1980)

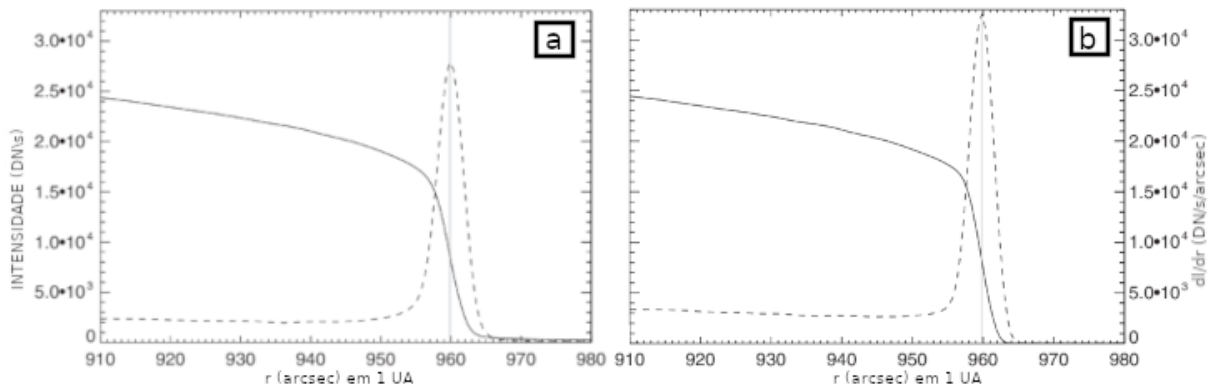
Um arquivo com mais de 4500 observações de tempos de contatos para o trânsito de Mercúrio através do disco solar desde 1631 a 1973 foi criado no Instituto de Astronomia aplicada (Academia Russa de ciências). Baseado na análise dinâmica dessas observações, Sveshnikov (2002) encontrou que a diminuição do raio solar secular não excede a $0'',06 \pm 0'',03$ e é causada por erros sistemáticos. Também reportou uma variação no raio de 80 anos, cuja amplitude desta variação é de $0'',24 \pm 0'',05$ em fase com as atividades solares,

o que concorda com os dados de Shapiro (1980) e Gilliland (1981) (SVESHNIKOV, 2002).

2.1.2 Trânsito de Vênus

O trabalho de Emilio et. al. (2014) determina o raio solar através da técnica de trânsito planetário ocorrido durante o trânsito de Vênus de junho de 2012, onde foi usado os dados obtidos pelo HMI. Na técnica de encontrar o raio solar pelo obscurecimento do disco solar por Vênus realizou-se diversas manipulações com os dados do HMI, dentre elas, processamento do *flat field*¹ das imagens, correção da função de espalhamento pontual (PSF)², além do *limb finder* que era implementado no pipeline do HMI para encontrar a posição central do disco solar e para estimar o raio em pixels a cada tempo. Sendo assim, o método usado para encontrar o raio é sensível ao PSF do HMI e portanto o valor do raio encontrado foi corrigido o PSF. Na Figura 9 é mostrado no quadro a as LDFs encontradas para o caso corrido ao PSF e no quadro b para o caso não corrigido ao PSF (EMILIO et al., 2014).

Figura 9 – LDFs obtidas quando se tem PSF não corrigido (Painel a) e corrigido (Painel b).



Fonte: Emilio et al., (2014).

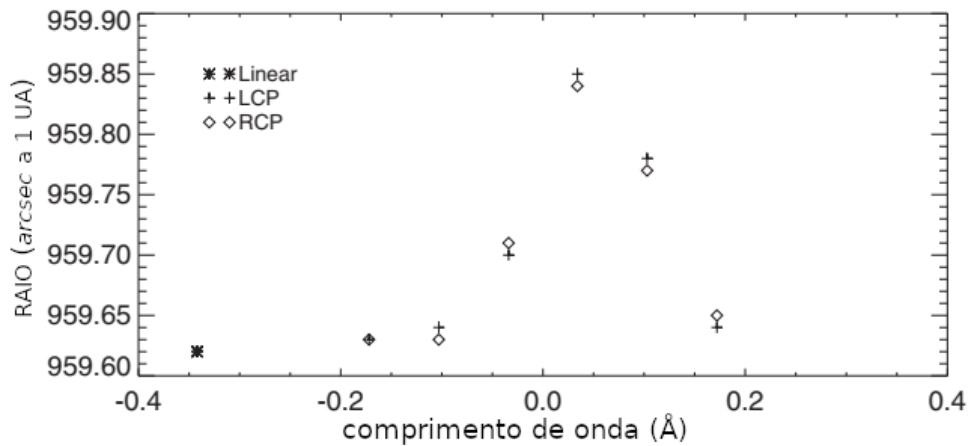
Usando-se o cálculo das efeméridas do SDO, a duração do trânsito pode ser obtido como função do raio solar. O valor de raio de $959'', 57 \pm 0'', 02$ ($695, 94 \pm 15 \text{ km}$) em 1 UA, relatado por Emilio et. al., (2014) também leva em consideração a correção da distância constante do satélite ao Sol, o que diminui o raio em $0'', 01$, além de que o erro estimado é uma combinação de incertezas sistemáticas e estatísticas (EMILIO et al., 2014).

- ¹ Através de estimativas feitas das calibrações no solo. Estas calibrações eram feitas usando um telescópio de estímulo e distorcendo os eixos ópticos deste e do instrumento, possibilitando distinguir o *flat field* do instrumento e da iluminação inhomogênea do telescópio de estímulo (WACHTER et al., 2010).
- ² Acontece quando a luz vinda de um objeto pontual não termina em um único ponto na imagem. Ocorre devido as imperfeições num sistema óptico real, assim, a luz se espalha de acordo com a função de espalhamento pontual (COUVIDAT et al., 2016).

Já na técnica de encontrar o raio solar pela trajetória de Vênus, também relatada no trabalho de Emilio et. al. (2014), fita a trajetória completa de Vênus em frente ao disco solar a fim de determinar exatamente quando o centro de Vênus cruzou o limbo solar. A trajetória era encontrada seguindo o processo descrito em Emilio et. al., (2012) e a partir dos dois tempos de contato a duração total do trânsito como visto do HMI era derivado para séries temporais de comprimento de onda e estados de polarização independentes.

Uma das conclusões importantes citadas em Emilio et. al., (2014) é uma clara dependência no raio solar inferido através do linha do Fe I 6173 Å como é mostrado na Figura 10. Nessa análise, mostra-se uma diferença de $0",23$ no raio inferido entre a linha central e a do contínuo, o que representa 167 km . Outra conclusão de Emilio e colaboradores é que não há diferença significativa no raio derivado para os quatro estados de polarização no comprimento de onda do contínuo ($-0,342 \text{ mÅ}$). Já para a polarização circular para direita (RCP) e esquerda (LCP) há uma variação de $\pm 0,01 \text{ mÅ}$ para cada ajuste, mas não foi reportada haver uma dependência significativa na polarização (EMILIO et al., 2014).

Figura 10 – Medidas do raio solar em função do comprimento de onda.



Fonte: Adaptada de Emilio et al., (2014).

O valor médio e desvio padrão das medidas do raio solar derivadas como função dos ajustes na trajetória de Vênus em Emilio et. al., (2014) é de $959",63 \pm 0",02$, novamente levando em conta os erros estatísticos e sistemáticos (EMILIO et al., 2014).

A conclusão do trabalho de Emilio et. al. (2014) é que a diferença no raio usando as duas técnicas diferentes é de $0",06$ o que é compatível com a correção de PSF aplicada nas imagens, pois deconvolvendo as imagens do HMI pelo PSF faz com que o valor do raio abaixe em $0",07$ (EMILIO et al., 2014).

No trabalho realizado por Hauchecorne et. al (2014) foi encontrado o valor de $959",90 \pm 0",06$ para o raio solar calculado pela técnica do trânsito de Vênus ocorrido em 5-6 de junho de 2012 utilizando também o HMI do SDO no comprimento de onda de 6173 Å. (HAUCHECORNE et al., 2014)

Outra medida importante do raio solar veio com o trabalho de Meftah (2014 e 2018) que também utilizou o trânsito de Vênus de 2012 nas suas medidas. Com o telescópio SODISM a bordo da espaçonave PICARD, ele obteve no trabalho de 2014 o valor de raio de $959,86 \pm 0,20 \text{ arcsec}$ e $959,37 \pm 0,36 \text{ arcsec}$ no trabalho de 2018 (MEFTAH et al., 2018; MEFTAH et al., 2014).

2.2 MEDIDAS DO RAO SOLAR COM ECLIPSE

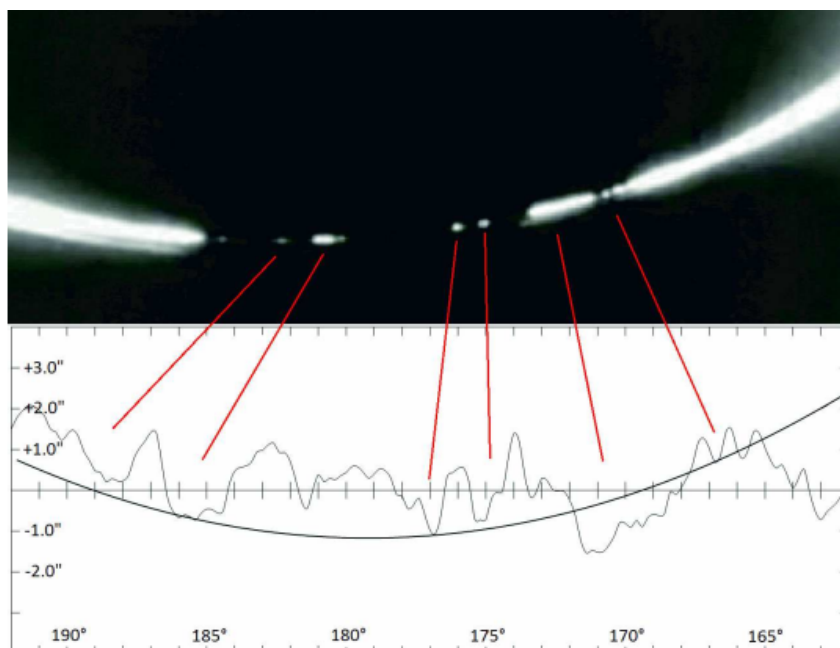
A Observação da duração do tempo de eclipses solares totais são um método alternativo de detecção de possíveis mudanças de longo tempo no raio solar. A medida da duração do eclipse com 1 segundo de precisão nos possibilitaria uma precisão na medida do semi diâmetro de aproximadamente $0,2 \text{ arcsec}$. Na prática as observações precisam ser restritas a contagem do intervalo entre o desaparecimento dos últimos feixes de luz e o reaparecimento dos primeiros feixes, estes são vistos nas bordas irregulares da Lua que aparecem no começo e fim dos eclipses. Enquanto os tempos absolutos de contato possam ser uma fonte de erros, apenas a duração da totalidade é importante para determinar o raio. Mesmo no século 18 já era possível determinar a duração do eclipse com um segundo ou dois de precisão usando as batidas de um pêndulo (PARKINSON; MORRISON; STEPHENSON, 1980).

Uma das formas mais usadas hoje em dia é a inspeção de filmagens e imagens de eclipses totais. Nos vídeos e imagens o que se usa são os dados dos chamados feixes de Baily, em homenagem ao astrônomo Francis Baily que primeiro as observou em um eclipse anular em 15 de maio de 1836. Elas são produzidas pela luz da fotosfera através dos vales do limbo lunar no início da totalidade ou da anularidade, como representadas na Figura 11 (SIGISMONDI, 2009).

A ideia de medir o raio solar usando eclipses totais pode ser atribuído a Edmund Halley em Londres (SIGISMONDI, 2009), mas a proposição de observar os feixes de Baily em conexão com os dados do perfil lunar veio com David Dunham (RAPONI et al., 2012). A importância da observação dos eclipses solares emergem de que os efeitos atmosféricos são menos importantes nestas medidas do que em qualquer outra técnica feitas em Terra. A principal limitação é a obtenção de dados, uma vez que ocorre poucos eclipses por ano. Entretanto, devido a curta duração dos eclipses e a trajetória de movimento rápido, o eclipse total e anular produzem pontos de calibração mais acurados para comparação com outras bases de dados (FIALA; DUNHAM; SOFIA, 1994).

A medida da duração da fase de totalidade nos eclipses totais pode ser feita com grande precisão, pois a queda na luminosidade é abrupta e independente das condições atmosféricas (*seeing*), importando apenas a geometria da Lua e Sol. A influência da atmosfera fica apenas na medida do tempo dos feixes de Baily, que podem mudar devido

Figura 11 – Esquema de como os feixes de Baily são formados. A curva de luz depende unicamente da geometria lunar no momento do eclipse.



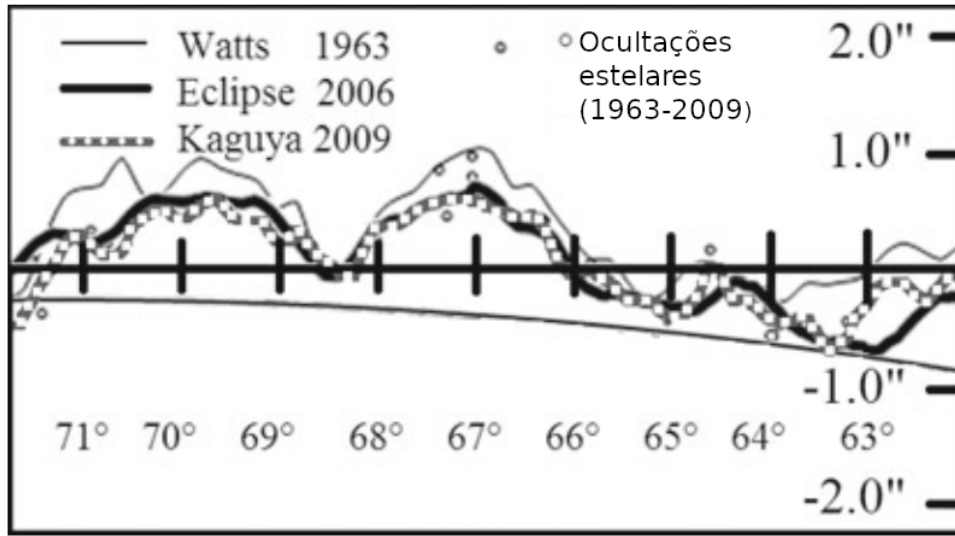
Fonte: Raponi et al., (2012).

a cintilação da atmosfera. Para a medida do raio solar usando os feixes de Baily é necessário conhecer a superfície lunar com precisão no momento do eclipse. Hoje em dia, esta informação é providenciada pela sonda lunar japonesa chamada *Kaguya*. Esta tem uma taxa de amostragem de cerca de 1,5 km próximo aos polos lunares e 10 km próximo ao equador, cada altitude é conhecido com cerca de ± 1 km. Antes do lançamento da *Kaguya*, o conhecimento sobre a superfície lunar era limitado, pois era provido por fotos feitas durante 18 anos de observações do limbo lunar, reunidas por Watts (SIGISMONDI; MORCOS, 2011). Na Figura 12 é mostrado alguns resultados de perfis lunares obtidos por técnicas diferentes.

Uma técnica descrita por Raponi (2012) usa o tempo de aparecimento dos feixes e compara com as posições calculadas pelas efeméridas usando o Software Occult 4. Fazendo a comparação entre o Sol simulado pela Occult 4 e as observações obtém-se a medida da correção do raio com respeito ao raio padrão (959,63 arcsec em 1 AU), ou seja, o ΔR (RAPONI et al., 2012). Também é importante ressaltar que os feixes de Baily nas regiões polares duram mais (SIGISMONDI, 2009) e é uma região que não são afetadas por regiões ativas no Sol, uma vez que não aparecem manchas solares em latitudes maiores que aproximadamente 40° (RAPONI et al., 2012).

A forma da curva de luz é determinada pela forma da LDF e pela forma do vale lunar que gera o feixe, como mostrada na Figura 13. Raponi (2012), descreve uma

Figura 12 – Diferença entre os dados para o perfil lunar *Kaguya*, Watts, um eclipse feito em 2006 e ocultações estelares.

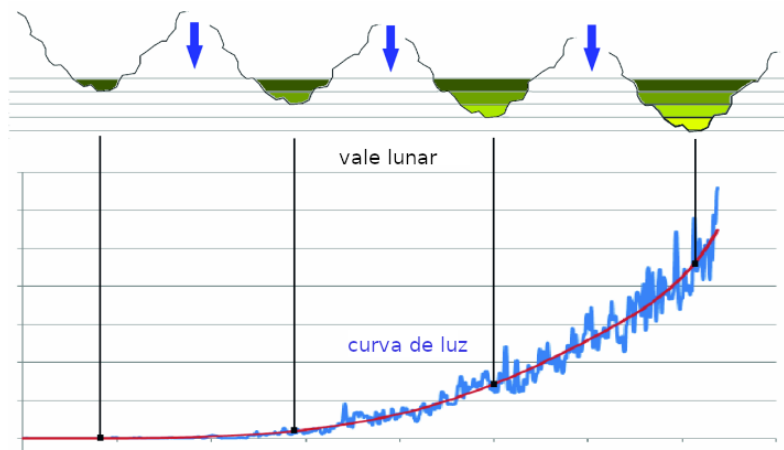


Adaptada de Sigismondi et al., (2011).

convolução que tem como objetivo obter as curvas de luz L :

$$L(y) = \int B(x)w(y - x)dx \quad (2.1)$$

Figura 13 – Cada passo na geometria das camadas Sol-Lua (parte superior) correspondem a um dado instante na curva de luz (parte inferior). A curva de luz mostra a contribuição de todas as camadas.



Adaptada de Raponi et al., (2012).

onde $w(x)$ é a largura do vale lunar, $B(x)$ é o perfil de brilho da superfície, ou seja, a LDF. Já a convolução para a curva de luz discreta é descrita por:

$$L(m) = \sum B(n)w(m - n)h \quad (2.2)$$

onde m e n são os índices das camadas discretas correspondentes as coordenadas (x, y) e h é a espessura das camadas.

Com isto, os perfis das LDFs obtidas são discretizadas em ordem de obter as camadas do Sol $B(n)$ de espessura iguais e concêntrica com o centro do Sol. Sendo $A_1, A_2, \dots, A_n$ a área das camadas lunares do topo do vale indo para cima, $B_1, B_2, \dots, B_n$ o brilho de superfície das camadas no Sol, indo de fora para dentro e $L_1, L_2, \dots, L_n$ o valor das curvas de luz observadas, temos:

$$L_m = B_1 A_m + B_2 A_{m-1} + \dots + B_m A_1 = \sum_{n=1}^m B_n A_{m-n+1} \quad (2.3)$$

E para obter os perfis das LDFs, é feito:

$$B_1 = L_1 / A_1$$

$$B_2 = [L_2 - (B_1 \times A_2)] / A_1$$

$$B_3 = [L_3 - (B_1 \times A_3 + B_2 \times A_2)] / A_1$$

$$B_4 = [L_4 - (B_1 \times A_4 + B_2 \times A_3 + B_3 \times A_2)] / A_1$$

E assim por diante.

O processo descrito acima, reportado em Raponi (2012), se aplica a um feixe emergente, mas o mesmo processo pode ser aplicado para os feixes que estão desaparecendo. Por fim, é feito o processo de deconvolução usando a curva de luz do feixe do evento, a área de cada superfície lunar envolvida e a correspondência entre $L(y)$ e $L(t)$ (o movimento do limbo solar no vale lunar). Os resultados apontados pelos autores concluíram que era impossível inferir uma localização exata para o ponto de inflexão, porém foi deduzido os limites superior e inferiores como: $-0",19 < \Delta R < +0",05$ (RAPONI et al., 2012).

Em uma análise feita por Parkinson et al., (1980) considerando os eclipses totais de 1715, 1842, 1851, 1878, 1900 e 1925 adotaram o valor de $959",63$ para o semi diâmetro solar e reportaram que aplicando a correção do perfil lunar para cada observação individual, os erros são improváveis de excederem $0",2$ em qualquer ponto (PARKINSON; MORRISON; STEPHENSON, 1980).

Em um estudo sobre a mudança no raio solar usando medidas dos eclipses de 1925 e 1975, Sofia et al., (1983), reportou uma diminuição no diâmetro de 470 mas , enquanto as atividades solares estavam aumentando (SOFIA et al., 1983). Já Kilcik et al., (2009) determinou o valor do raio durante o eclipse de 29 de março de 2006 em $959",22 \pm 0",04$ e $\Delta R = 0",43 \pm 0",04$ (KILCIK et al., 2009). E no trabalho de Thuillier (2017) reporta-se o valor do raio solar de $959,75 \pm 0,02 \text{ arcsec}$ (THUILLIER et al., 2017).

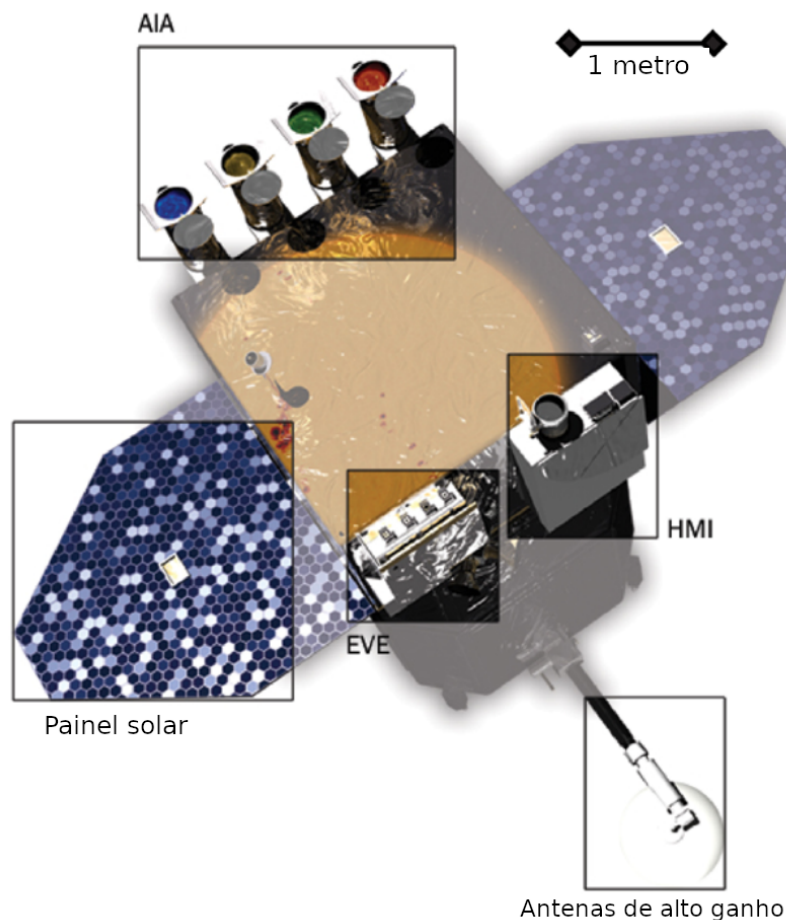
O resumo das medidas do raio solar podem serem vistos no gráfico da Figura 4 para várias técnicas de medida do raio. Como vimos nesse capítulo, técnicas em que usam imagens para achar as LDFs são um pouco diferentes de técnicas que utilizam curvas de luz, como no caso das técnicas de medida do raio solar através dos eclipses. Ambos

tem suas vantagens e desvantagens, nos experimentos feitos na Terra, deve-se corrigir os efeitos da atmosfera terrestre. Enquanto no espaço novas complicações surgem, como por exemplo, instabilidade térmica dos instrumentos, contaminação através de precipitação de partículas, etc (THUILLIER et al., 2017).

3 O SATÉLITE SDO E O INSTRUMENTO HMI

Ejeções de massa coronal podem ser um grande problema para a vida moderna, uma vez que se direcionadas para terra podem causar danos a instalações elétricas, satélites e sistemas de comunicação. Essas ejeções fazem parte do chamado clima espacial que é dominado pelo que acontece com o Sol. Pensando em entender, acompanhar e no futuro, poder prever tais aspectos do clima espacial que possam afetar a vida na terra, foi criado o programa da Nasa *Living With a Star* (LWS). Um dos satélites que fazem parte deste programa é o *Solar Dynamics Observatory* (SDO) (mostrado na Figura 14), este foi designado para acompanhar a evolução do Sol durante o ciclo solar 23, com uma missão inicial de 5 anos. Ele foi lançado em fevereiro de 2010 e em maio do mesmo ano já começou a mandar informações para Terra sobre o Sol através de imagens de alta resolução (PESNELL; THOMPSON; CHAMBERLIN, 2011).

Figura 14 – Esquema do SDO mostrando na parte superior o instrumento AIA e suas quatro câmeras, já na parte inferior tem-se destacados os instrumentos EVE e HMI, também a antena de comunicação, no lado temos os painéis solares.



Fonte: Adaptada de o Pesnell et al., (2011).

Algumas das perguntas que o SDO quer responder envolvem entender o mecanismo que leva ao ciclo solar de aproximadamente 11 anos e como as configurações magnéticas levam a ejeções de massa coronal, filamentos, etc. Os instrumentos presentes no SDO possibilitam prospectar a dinâmica das camadas próximas da superfície do Sol e observar o início e o progresso de processos dinâmicos na cromosfera e coroa para entender o campo magnético do Sol. Para isto, o SDO conta com três instrumentos diferentes.

O primeiro instrumento é o *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA). O AIA é um configuração de quatro telescópios que observam a superfície e atmosfera do Sol (Topo da Figura 14). Foi construído para obter imagens do disco total da atmosfera solar com diferentes filtros possibilitando 10 comprimentos de onda diferentes, que vão desde o extremo ultravioleta, dois no ultravioleta e um na luz visível. As bandas de comprimento de onda conseguem fazer imagens de regiões da atmosfera solar que podem variar entre 6000 K a 10^6 K (PESNELL; THOMPSON; CHAMBERLIN, 2011).

O segundo instrumento é o *ultraviolet Variability Experiment* (EVE), indicado na Figura 14, este mede as flutuações de saída do Sol na região do ultravioleta entre 0,1 a 105 nm e também em 121,6 nm. Contendo três componentes, ele basicamente combina espectrômetros com as duas câmeras CCDs para criar imagens do espectro de irradiância em vários comprimentos de onda e assim permitir que os cientistas acompanhem continuamente as emissões EUV com uma cadência de 10 segundos (PESNELL; THOMPSON; CHAMBERLIN, 2011).

O terceiro instrumentos é o *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) indicado na Figura 14, seu principal objetivo é mapear o campo magnético e de velocidade na superfície do Sol. A principal busca do HMI é decifrar os fenômenos físicos por trás do dínamo magnético solar. Para isto, ele mede o deslocamento Doppler da linha espectral do Fe I em 617,3 nm e cria dopplergramas que são medidas da velocidade fotosférica do disco total do Sol a cada 45 segundos. O HMI também possibilita a medida dos parâmetros de Stokes, que são usados para criar o magnetograma longitudinal do disco completo do Sol e também faz mapas do disco completo do campo magnético vetorial fotosférico (que seria um magnetograma vetorial) (PESNELL; THOMPSON; CHAMBERLIN, 2011).

3.1 O INSTRUMENTO *HELIOSEISMIC AND MAGNETIC IMAGER*

Grande parte do *design* de construção do HMI é baseada no instrumento MDI, com algumas melhoras. A Tabela 2 mostra a comparação entre algumas das características do instrumento HMI com os do MDI (SCHOU et al., 2012).

O instrumento HMI é composto por três partes principais: o pacote óptico, a caixa elétrica e os aparelhos que conectam os dois. No pacote óptico é onde os componentes ópticos ficam protegidos do ambiente externo. Na Figura 15 é mostrado os componentes

Tabela 2 – Características dos instrumentos MDI e HMI

Propriedade	MDI	HMI
Linha alvo	Ni I 6768 Å	Fe I 6173 Å
Abertura	12,5 cm	14,0 cm
Resolução óptica (λ/D)	1,17 arcsec	0,91 arcsec
Tamanho do pixel	1,98 arcsec (FD) 0,61 arcsec (HR)	0,504338 arcsec
CCD	Uma de 1024x1024 21 μm	Duas 4096x4096 12 μm
Janela Frontal (FWHM)	50 Å	50 Å
Filtro bloqueador (FWHM)	8 Å	8 Å
Designe Lyot	1:1:2:2:4:8	1:2:4:8:16
FWHM não ajustavel	465 mÅ	612mÅ
FWHMs ajustaveis	94 mÅ Michelson 189 mÅ Michelson	86 mÅ Michelson 172 mÅ Michelson 344 mÅ Lyot
FWHM filtro final	85 mÅ	76 mÅ
Resolução espectral ($\lambda/FWHM/1000$)	80	80
Polarização	$I \pm Q$ e $I \pm V$	todas
Cadência filtrograma	3 segundos	3,75 segundos por câmera 1,875 no geral
Posições filtrograma	5, espaçamento de 75 mÅ	6, espaçamento de 69 mÅ
Cadência nominal de observação	60 segundos	45 segundos
Razão de dados	160 kbits/s (FD e HR) 5 kbits/s (estrutura)	55 Mbits/s

Fonte: Adaptado de Schou et al., (2012)

do pacote óptico, este é formado de diversos repartimentos e paredes montadas de modo que elas tenham uma temperatura em torno de 20° Celcius, para isto, diversos aquecedores são anexados a caixa do pacote óptico. Na Figura 15 também é mostrado o caminho que a luz faz ao atravessar a janela principal e percorrer os componentes do pacote óptico (SCHOU et al., 2012).

Entre os componentes do pacote óptico se encontram os mecanismos de filtros em que se destacam os dois interferômetros de Michelson calibráveis e os filtros de Lyot. A combinação destes filtros permitem obter-se os chamados filtrogramas, que são imagens do Sol em diversos comprimentos de onda, um modelo dos perfis de transmissão dos filtros resultantes são mostrados na Figura 16, onde mostra as seis posições no comprimento de onda com respeito a linha de absorção do Fe I em 6173 Å no centro do disco que podem ser obtidas com o HMI (COUVIDAT et al., 2012).

O sequenciador que faz parte do Programa de vôo (FSW) da nave, é o que determina o que cada imagem deve conter, através das *framelists*. Nestas estão listados os tempos relativos para filtrogramas individuais, comprimento de onda, polarização, foco,

Figura 15 – Pacote óptico com seus componentes e o caminho que a luz faz ao entrar no instrumento HMI.

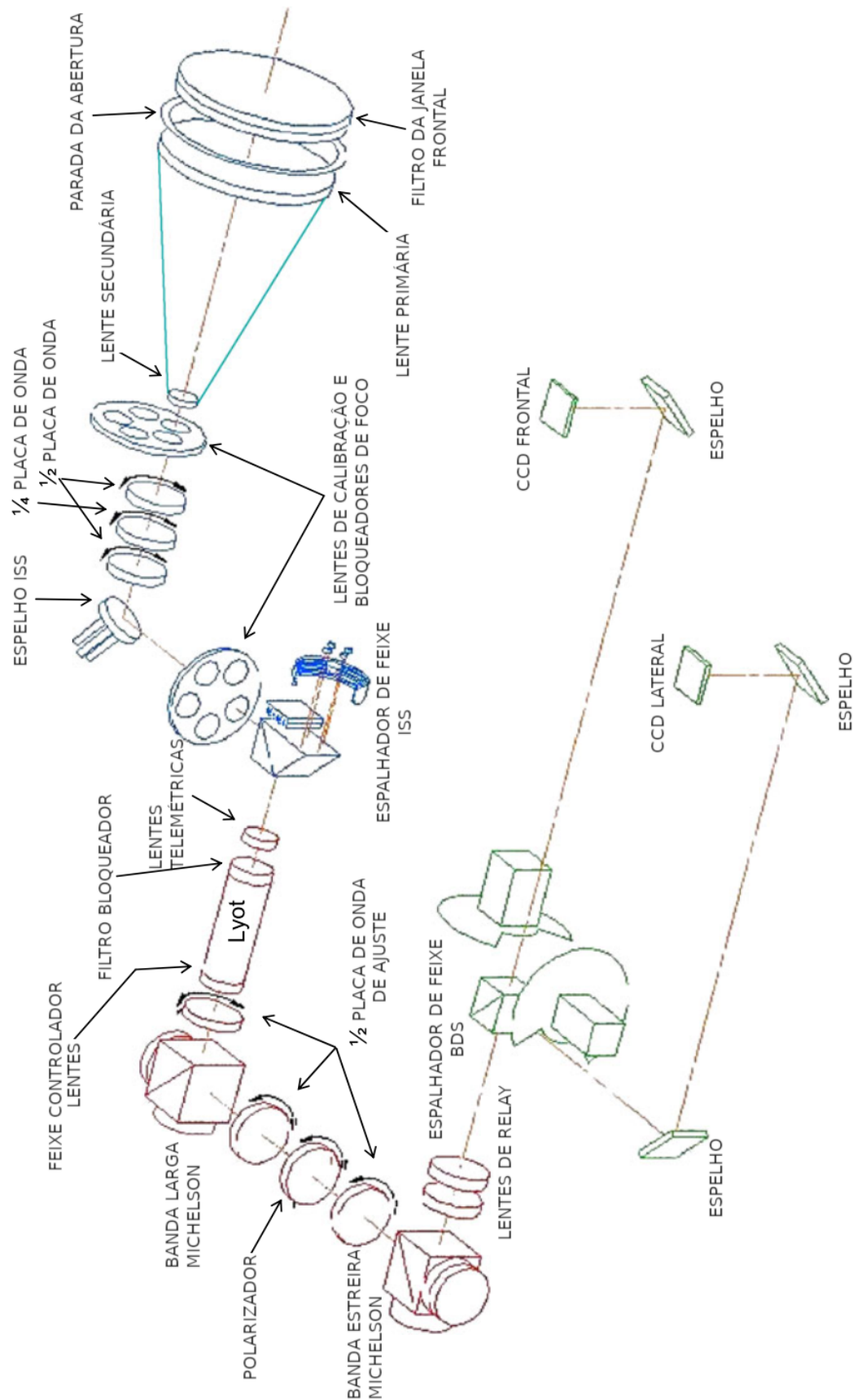
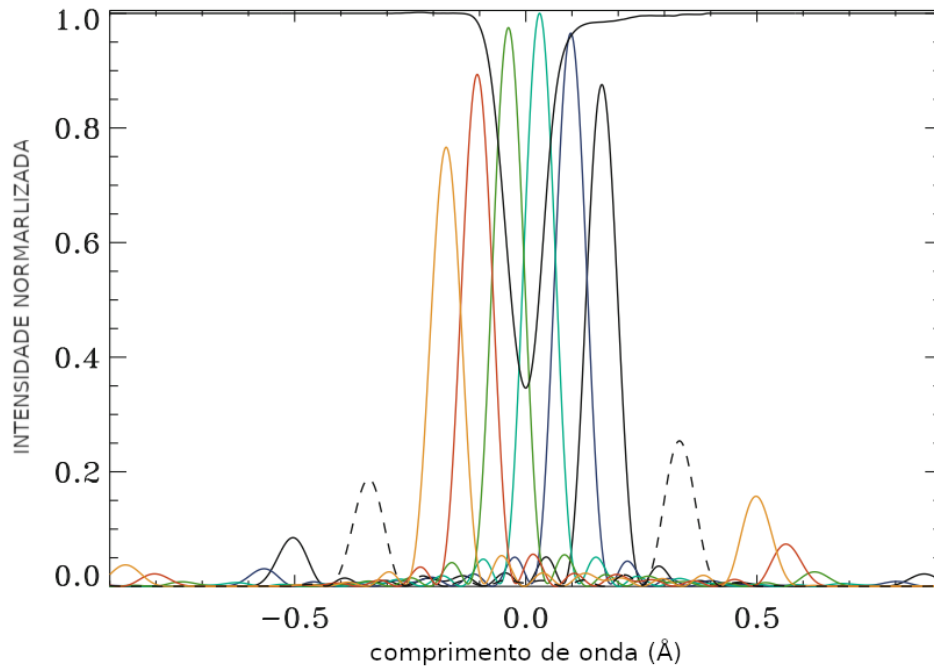


Figura 16 – Exemplo das posições dos perfis do HMI obtidos do procedimento de calibração de dependência do comprimento de onda. Seis posições ajustáveis são mostradas com respeito a linha solar Fe I (linha preta) no centro do disco e em repouso, no topo da posição ajustável do contínuo (linha tracejada). O perfil de linha Fe I foi provida por R.K. Ulrich e obtida no Observatório do Monte Wilson.



Fonte: Adaptada de Couvidat et al. (2011).

tempo de exposição, entre outros. Para cada estado de polarização e comprimento de onda é indexado um *Frame ID* (FID), resultando numa combinação total de 36 possíveis estados, sendo seis estados de polarização diferentes e seis comprimentos de onda (SCHOU et al., 2012). Alguns dos FIDs e suas respectivas polarizações e comprimento de onda estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplos de *Filtergram ID* (FID) obtidos pelo HMI, seus respectivos estados de polarização e o deslocamento do comprimento de onda respectivo à linha central de emissão do ferro de 6173,34 Å.

FID	Estado de polarização	Deslocamento de λ em torno da linha central 6173,34 Å
10004	I+Q (0 graus linear)	-342 mÅ
10005	I-Q (90 graus linear)	-342mÅ
10058	I+V; LCP (circular pela esquerda)	-172 mÅ
10059	I-V; RCP (circular pela direita)	-172 mÅ
10098	I+V; LCP (circular pela esquerda)	-34 mÅ
10099	I-V; RCP (circular pela direita)	-34 mÅ

Fonte: Adaptado de Emilio et. al., (2014)

Na Tabela 3 os termos I, Q, U e V são os chamados parâmetros de Stokes e são definidos como:

$$\mathbf{I} = \xi_x^2 + \xi_y^2, \mathbf{Q} = \xi_x^2 - \xi_y^2, \mathbf{U} = 2\xi_x\xi_y \cos \epsilon, \mathbf{V} = 2\xi_x\xi_y \sin \epsilon \quad (3.1)$$

onde ξ_x e ξ_y são constantes de amplitudes que junto com ϵ descrevem o estado de polarização da onda monocromática de radiação eletromagnética, se propagando na direção z, que é caracterizada pelo vetor do elétrico :

$$E_x = \xi_x \cos \phi, \quad E_y = \xi_y \cos(\phi + \epsilon) \quad (3.2)$$

onde $\phi = (wt - kz)$ e ϵ é a diferença de fase entre E_x e E_y (UNNO, 1956).

A caixa elétrica é composta de suprimentos de energia, eletrônica de controle e eletrônica de processamento de dados, que são montadas dentro da espaçonave e tem ao total 17 itens. Um item de destaque é a câmera CCD. O HMI contém duas câmeras com o tamanho de 4096^2 pixels, estas são montadas no pacote óptico usando tubos isolantes de fibra de vidro para minimizar a quantidade de calor transferida para elas. As CCDs são resfriadas passivamente usando radiadores, de forma que a temperatura das câmeras esperadas são a baixo de -50° Celcius (SCHOU et al., 2012).

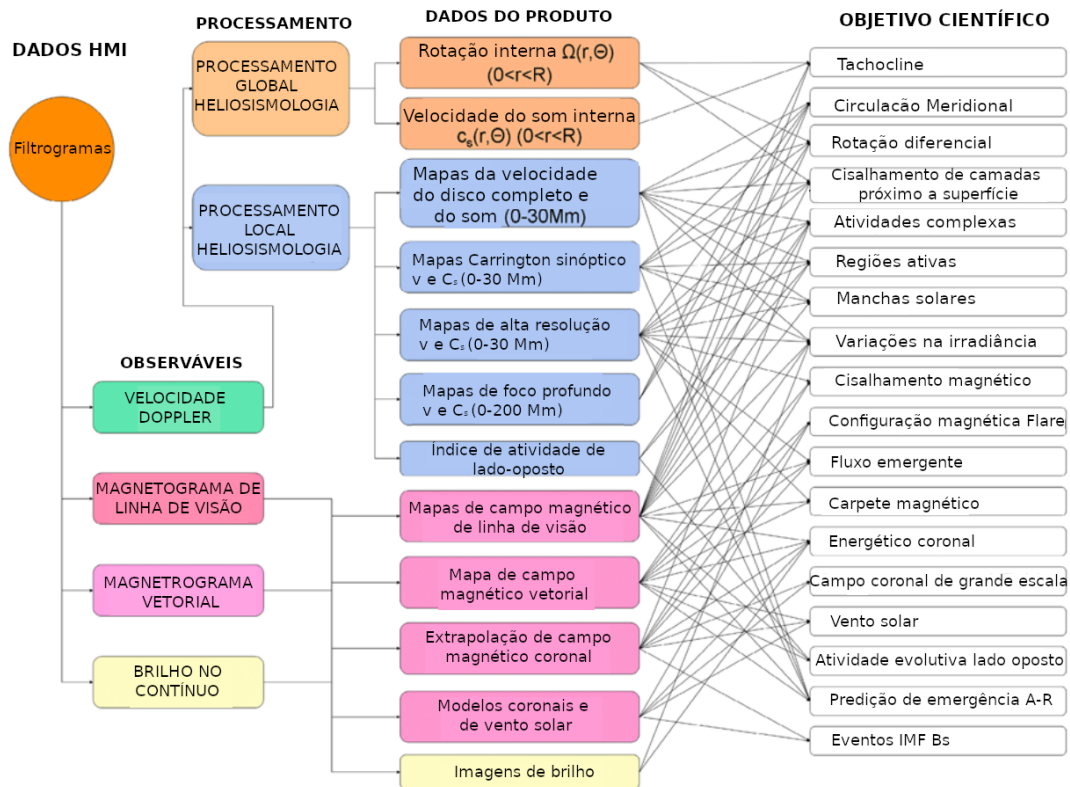
3.2 OS DADOS DO HMI

Os dados obtidos pelos instrumentos HMI do SDO que consistem em imagens do disco total com cadência de 45 segundos, para os dados no espectro do contínuo (FIDs da Tabela 6) os dados são coletados a cada 12 horas e para os parâmetros de Stokes 720 segundos (COUVIDAT et al., 2016), estas imagens são transmitidos para uma estação em terra no Novo México. Os dados científicos de resolução total do HMI e AIA são tratados no *Joint Science Operations Center* (JSOC) (JSOC, 2021a) na Universidade de Stanford. O *Science Data Processing facility* (SDP) que faz parte do JSOC é responsável pelo armazenar e providenciar os dados em arquivos no formato de FITS (*Flexible Image Transport System*) que estão disponíveis para acesso ao público na plataforma online do JSOC (JSOC, 2021b), sendo mais de 45,000 séries de dados diferentes separados em série de dados distintos (SCHERRER et al., 2012).

Para a obtenção dos produtos chamados "Observáveis" do HMI são realizados processamento dos dados na SDP em uma sequência de instruções automatizadas, processo chamado de pipeline, onde os dados dos filtrogramas passam através de algoritmos por diversos passos até se obter o produto ou sub produto específicos. Dependendo dos objetivos científicos, este necessitará de mais passos, como esquematizado na Figura 17. Por fim, cada produto e subproduto dos observáveis são separados em PALAVRA-CHAVES

e séries de dados diferentes que podem ser acessados no site do JSOC (JSOC, 2021b) (SCHERRER et al., 2012).

Figura 17 – Esquema do pipeline feito pela equipe do SPD para obtenção dos observáveis do HMI.



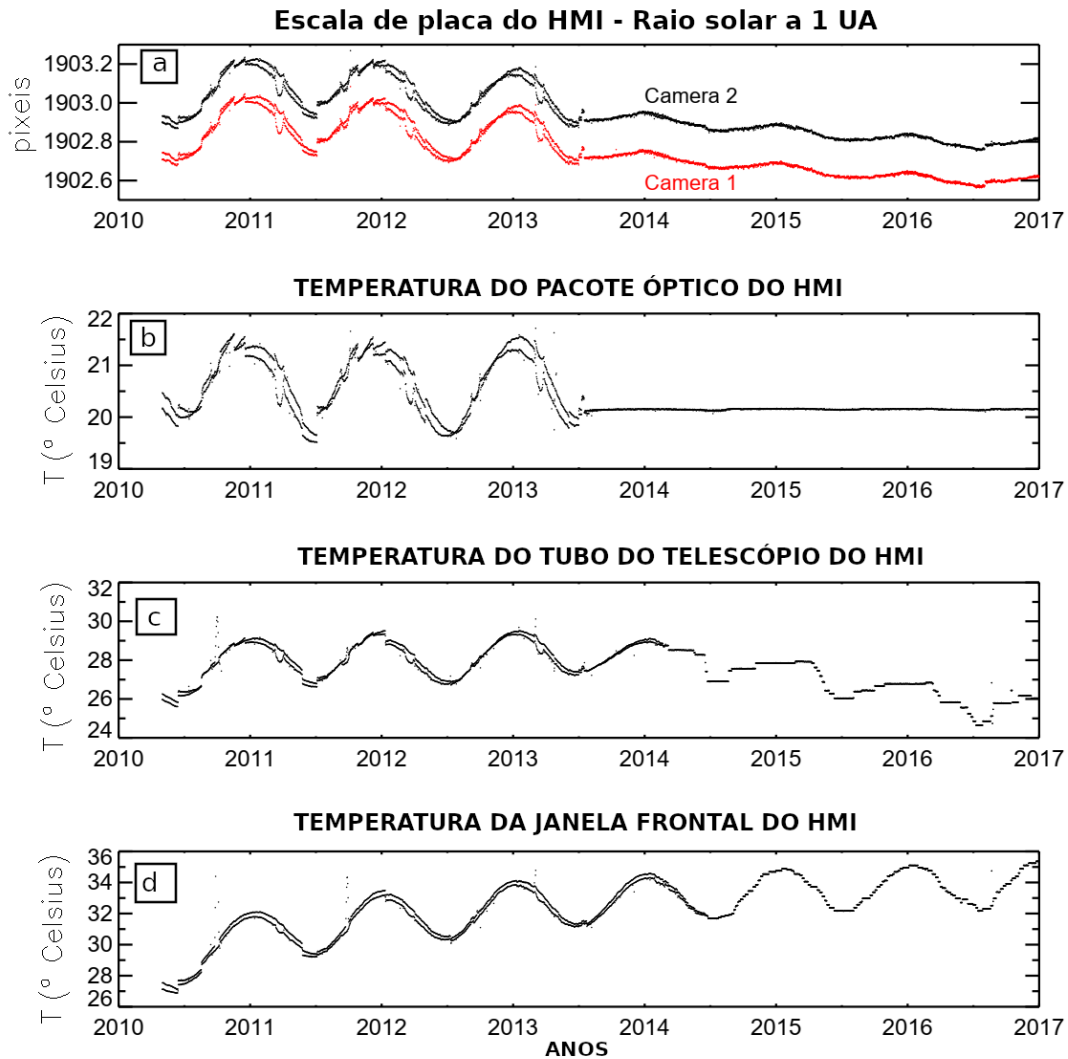
Fonte: Adaptada de Scherrer et al., (2012).

3.3 MEDIDAS DO RAIOS SOLAR UTILIZANDO O HMI

A escala de placa é feita por um conjunto de propriedades mecânicas e ópticas do telescópio e é medida a partir das observações do raio solar nas imagens de CCD e aplicando correções geométricas para normalizar o tamanho do raio solar para o Sol à distância de 1 UA da Terra (HOEKSEMA et al., 2018). A escala de placa do HMI depende fortemente da temperatura do pacote óptico e a um grau menor da temperatura do tubo do telescópio. A diminuição gradual de longo termo do raio solar observada pode estar relacionado a mudanças na temperatura da janela frontal devido a sua degradação ao longo do tempo (que afeta magnificação), a temperatura do tubo (que afeta a distância entre lentes e imagens) e a outros fatores (HOEKSEMA et al., 2018). Outros fatores e temperaturas dos instrumentos do HMI serão discutidas no capítulo 4. Na Figura 18 é mostrada a escala placa do HMI e gráficos de variação na temperatura de seus alguns

componentes. O gráfico no painel a mostra a diminuição da escala de imagem de 2010 até 2017 para a câmera 1 (em vermelho) e câmera 2 (em preto). O gráfico do painel b mostra a temperatura do pacote óptico no período de 2010 à 2017, já o gráfico do painel c mostra a temperatura do tubo do telescópio do HMI e por fim no painel d temos o aumento da temperatura desde o início da missão até 2017, devido a degradação/escurecimento da janela frontal. O HMI tem uma escala de placa de $0,504338 \text{ arcsec}$ por pixel (COUVIDAT et al., 2016)

Figura 18 – Escala de placa do HMI (Painel a) e variação de temperatura no pacote óptico (Painel b), no tubo do telescópio (Painel c) e na janela frontal (Panel d).

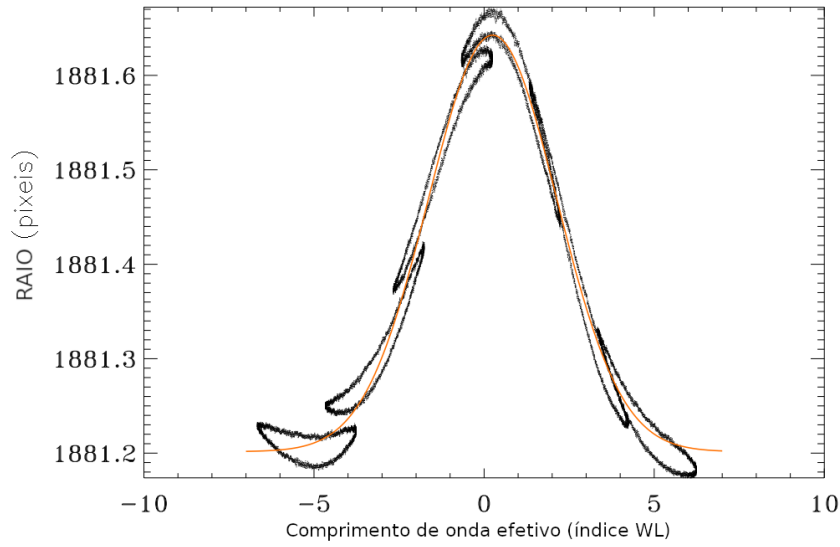


Fonte: Adaptada de Hoeksema et al., (2018).

O programa que mede o limbo solar, chamado *limb finder* determina as coordenadas nominais do centro do disco solar na CCD e o raio solar observado (COUVIDAT et al., 2016). Uma vez que a altura de formação da linha do Fe I de $6173 \text{ \AA}$ muda com o comprimento de onda, geralmente algumas centenas de quilômetros (EMILIO et al., 2014), o tamanho do Sol observado pelo HMI (que tem seis canais diferentes de observa-

ção separados por 68,8 mÅ) varia de acordo com o comprimento de onda observado em até meio pixel. Em cada ponto, o deslocamento no comprimento de onda depende da mudança da velocidade da espaçonave, de movimentos e características fixas e das variáveis do Sol e no deslocamento do limbo (COUVIDAT et al., 2016). Na Figura 19 é mostrado o raio medido como função do comprimento de onda, onde cada passo corresponde a uma rotação no motor do HMI de 34,4 mÅ relativo a linha central (HOEKSEMA et al., 2018).

Figura 19 – Raio solar retornado pelo *limb finder* como função do comprimento de onda efetivo em 17/05/2010. Cada um dos seis loops mostra um raio determinado por uma rotação do sistema de filtros do HMI. A linha sólida é o ajuste gaussiano.



Fonte: Adaptada de Hoeksema et al., (2018).

Algumas PALAVRA-CHAVES do raio solar encontrado pelo *limb finder* tem seu valor corrigido para a dependência do comprimento de onda. O raio do *limb finder* é reduzido por uma quantidade que depende do comprimento de onda, da seguinte forma (HOEKSEMA et al., 2018):

$$\Delta R = A \exp(-(wl_x - wl_0)^2 / wl_w) \quad (3.3)$$

onde:

$$wl_x = wl - OBS_VR / dvdw.$$

wl é um índice de comprimento de onda inteiro relativo ao índice do comprimento de onda central.

OBS_VR é a velocidade radial do Sol-SDO que é calculada usando as posições x, y e z encontradas pelo giroscópio do satélite e derivando-as.

$$dvdw = \delta\lambda = \lambda \times c = 0,0344 / 6173,3433 \times 299792458.$$

— Os valores A , wl_0 e wl_w são resultados do fit Gaussiano do raio solar retornado pelo *limb finder* como função da posição do comprimento de onda das imagens (para cada FID). (HOEKSEMA et al., 2018).

4 ANÁLISE DE DADOS

Neste trabalho foram feitas análises de alguns dos observáveis produzidos pela pipeline do HMI. Um resumo das manipulações realizadas nesses dados se encontram na Tabela 9, no apêndice. A primeira serie utilizada foi a *hmi.limbfit* que está disponível na plataforma online da JSOC ¹, em particular, a sub_serie utilizada foi *hmi.limbfit_tas*. As PALAVRA-CHAVES utilizadas para montar a base de dados utilizada nas análises do raio estão na Tabela 4. Já as PALAVRA-CHAVES utilizadas para montar a base de dados utilizada na análise da temperatura dos componentes do HMI foram obtidas através da serie *hmi.temperature*, em particular, a sub_serie *hmi.temperature_summary_300s*. No total foram utilizadas 45 PALAVRAS-CHAVES na análise de temperaturas, onde apenas as temperaturas médias foram incluídas. Na Tabela 5 são mostradas apenas as PALAVRA-CHAVES de interesse utilizadas no modelo que veremos na secção 5.1.1.

Tabela 4 – PALAVRA-CHAVES para análise do raio solar utilizadas neste trabalho, sua descrição e unidade.

PALAVRA-CHAVES	DESCRIÇÃO	VALOR/UNIDADE
T_OBS	tempo de observação	UTC
CÂMERA	câmera utilizada	1 ou 2
FID	Filtrograma ID	inteiro
CMEAN	Média da intensidade do centro do disco solar	arbitrária
RLFS	Raio solar	pixel
DSUN_OBS	Distância da SDO ao centro do Sol	metros

Fonte: a autora.

A posição do centro do Sol e do limbo são calculados como descritos em Emilio et. al. (2000) (EMILIO et al., 2014). A imagem média da LDF derivada, $\Gamma(r)$, é a referência e modelo para medir as variações da posição e brilho do limbo local. É determinada usando as técnicas dos métodos dos mínimos quadrados, que usam as imagens de 4 mil por 4 mil pixels do HMI com uma escala de prato de 0,5 arcsec por pixels. O brilho e forma do limbo são então obtidos em um conjunto de 180° Θ (2° abertura) (KUHN et al., 2012).

¹ <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html> (JSOC, 2021b)

Tabela 5 – PALAVRA-CHAVES para análise da temperatura do instrumento HMI utilizadas neste trabalho e suas descrições.

PALAVRA-CHAVES	DESCRIÇÃO
T_OBS	anoDecTemperaturas = ano decimal
T02_FWMR2_SD	T2 = Anel de montagem
T03_PRLNS_MEAN	T3 = Lentes primárias
T06_TLAFT_MEAN	T6 = Tubo telescópio
T07_FDMCH_MEAN	T7 = Mecanismo de porta
T08_PSASM_MEAN	T8 = Junções
T09_TLMIR_MEAN	T9 = Espelho
T14_OVNNM_MEAN	T14 = Forno de filtros NBM
T15_OVNPA_MEAN	T15 = Forno de filtros PA
T24_HRNS1_MEAN	T24 = Estrutura de montagem
T26_FRLEG_MEAN	T26 = Estrutura estabilidade frontal
T28_CEB2_MEAN	T28 = Caixa elétrica CAM 2
T29_CEB1_MEAN	T29 = Caixa elétrica CAM 1

Fonte: a autora.

4.1 DADOS BRUTOS E POR FID

Os dados brutos foram baixados da plataforma online da JSOC (JSOC, 2021b) em formato de tabelas em .txt e armazenados no *cluster* do computador do Observatório Astronômico da UEPG. Utilizando programas feitos em IDL (*Interactive Data Visualization*) foram feitas as análises das PALAVRA-CHAVES separando-as por FID. As FIDs e a suas polarizações correspondentes que compuseram a base de dados utilizada neste trabalho estão dispostas na Tabela 6. Os FIDs analisados (do FID 10000 ao FID 10009) pertencem ao espectro do contínuo, porém os FIDs 10000 e 10001 são os estados não polarizados.

O estágio inicial da manipulação dos dados consistia em extrair dos arquivos em .txt baixados da plataforma do JSOC (JSOC, 2021b) utilizando programas escritos em IDL. Estes arquivos estavam separados por meses indo de abril de 2013 a dezembro de 2020 para os dados do raio solar (Tabela 4) e de janeiro de 2013 a janeiro de 2021 para os dados da temperatura. Nesta manipulação cada PALAVRA-CHAVE tornava-se um vetor único, no caso do vetor do T_OBS uma outra manipulação em IDL transformou as linhas textuais de tempo em ano decimal (precisão dupla), este vetor foi chamado de anoDec. Os dados das PALAVRAS-CHAVES dispostas na Tabela 4 geraram 6 vetores específicos com 117214708 pontos cada e as PALAVRAS-CHAVES de temperatura geraram 45 vetores específicos com 841328 pontos cada.

Os vetores da análise do raio do primeiro e segundo estado de polarização linear (FIDs 10000 e 10001) eram medidos continuamente, diferente dos outros estados de polarização (FIDs 10004 à 10009) que eram medidos apenas manobras especiais do satélite.

Tabela 6 – FIDs que compuseram a base de dados utilizadas nas análises desta dissertação, suas polarizações e o deslocamento do comprimento de onda respectivo à linha central de emissão do ferro de 6173,34 Å.

FID (contínuo)	Estado de polarização	Deslocamento de λ em torno da linha central 6173,34 Å
10000	primeira pol mod A Linear	-342 mÅ
10001	segunda pol mod A Linear	-342mÅ
10004	I+Q (0 graus linear)	-342 mÅ
10005	I-Q (90 graus linear)	-342 mÅ
10006	I+U (45 graus linear)	-342 mÅ
10007	I-U (135 graus linear)	-342 mÅ
10008	I+V (polarização circular esquerda)	-342 mÅ
10009	I-V (polarização circular direita)	-342 mÅ

Fonte: Adaptado de Hoeksema et al., (2018) e Emilio et. al., (2014)

Assim, os dados para estes FIDs (10004 à 10009) eram coletados apenas a cada seis meses.

Cada observável presente na Tabela 4 foi-se indexado aos FIDs e renomeado para levar o número correspondente ao FID ao qual foi indexado de tal forma que:

$$index_i = onde(FID \text{ é igual a } 1000i) \quad (4.1)$$

com $i=0,9$.

A mesma notação foi seguida para as outras palavras-chaves, como a do raio (palavra chave RLFS), para mais detalhes das manipulações e nomenclatura, checar a Tabela 9:

$$RLFS_i = R_LFS[index_i] \quad (4.2)$$

novamente com $i=0,9$.

4.2 CORREÇÃO DO RAO E DA DISTÂNCIA

Foi-se aplicada uma correção na série de dados do raio e da distância devido as descontinuidades apresentadas no fluxo de dados recebidos pelo satélite SDO. A rotina em IDL *INTERPOL* com *spline* foi utilizada para esse fim. Por exemplo, foram corrigidos os tempos dos RLFS_0 com os tempos do RLFS_1, uma vez que os tempos também eram indexados aos FIDs. Os vetores do raio interpolados receberam um prefixo *int* antes do nome, para distinguir dos vetores não interpolados. Seguindo, também foi-se

feita a correção para a distância (vetor *dist*) onde todo o vetor *anoDec* do vetor *dist* foi interpolada no tempo_*i* criando-se assim um vetor contendo apenas as distâncias interpoladas no tempo indexado ao FID 1000i, ou seja, o vetor *dist_i*, seguindo o mesmo padrão de nomenclatura já mencionado.

Após as correções efetuadas tanto das PALAVRA-CHAVES do raio quanto da distância com o INTERPOL, se obteve o raio solar para cada estado de polarização seguindo a fórmula:

$$RAIO_i = RLFS_i * dist_i / média(dist_i) \quad (4.3)$$

com $i=0,9$.

A intensidade do campo magnético nos parâmetros de Stokes é representado pelo parâmetro *I*, este podia ser facilmente obtido somando dois FIDs, como por exemplo o FID 10006 e 10007 que representam os estados de polarização *I+Q* e *I-Q* respectivamente e dividindo por dois. Esta manipulação também gerou um vetor para cada intensidade *I* dependendo de qual parâmetro este era derivado. Assim, $I0=(RLFS_0+intRLFS_1)/2$ corresponde ao *RLFS_0* mais o *RLFS_1* interpolado no tempo_0, tudo isto dividido por dois. Dessa forma, a análise do raio para o parâmetro *I0* é feito da seguinte forma:

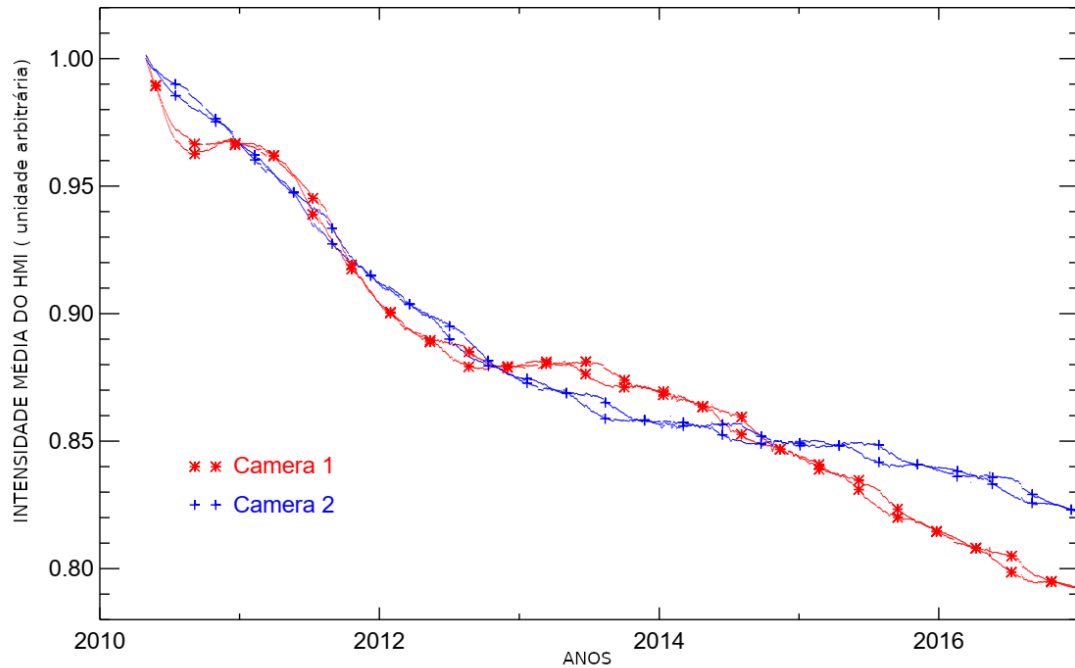
$$RAIO_Ij = Ij * dist_j / média(dist_j) \quad (4.4)$$

com $j=0,2,4,6,8$.

4.3 MUDANÇAS NA OPACIDADE DA LENTE

O descréscimo na intensidade de pixels observados pela câmeras CCDs do HMI tem sido monitoradas desde o lançamento do satélite e estão ligadas aos efeitos dos danos causados pela radiação na janela frontal (HOEKSEMA et al., 2018). Esta variação é mostrado no gráfico da Figura 20 para a câmera 1 (em vermelho) e câmera 2 (em azul). Existe também variações de curto prazo de uma única câmera ou entre câmeras que são possivelmente devido a variações térmicas no ambiente próximo a CCD. Entretanto, a origem das variações de longo termo que vemos na Figura 20 e mais tarde no gráfico da Figura 31 no capítulo 5 ainda não são completamente entendidos (HOEKSEMA et al., 2018).

Figura 20 – Intensidade média do HMI com o tempo observado pela câmera 1 (em vermelho) e para câmera 2 (em azul). Temos que a intensidade média do HMI diminuiu com o tempo para ambas as câmeras.



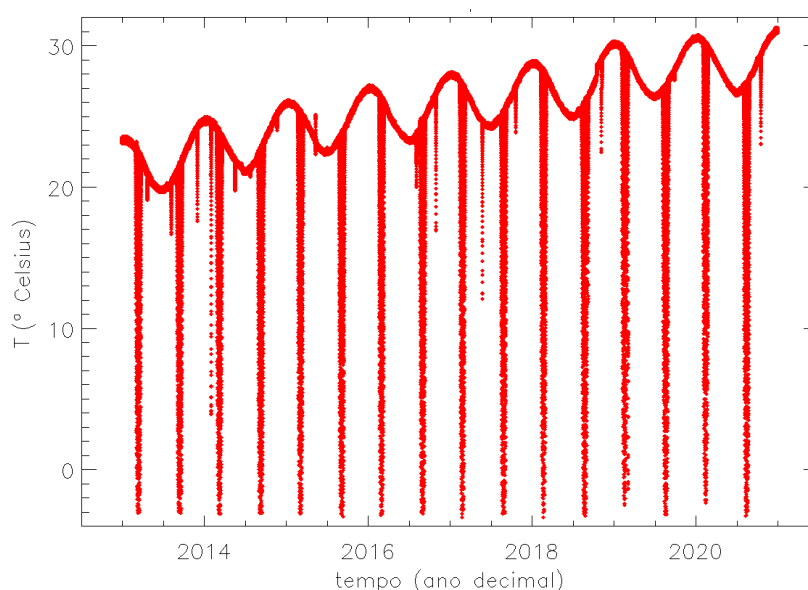
Fonte: Adaptado de Hoeksema et al., (2018).

4.4 MUDANÇAS DE TEMPERATURA NO INSTRUMENTO HMI

É de extrema importância manter um registro de como a evolução das condições ambientais do HMI impactam os observáveis do HMI. As variações na temperatura dos componentes podem causar diversos efeitos como dilatação no banco óptico, distorções em espelhos e portanto diferenças no plano focal do instrumento. Para verificar isto, utilizando algumas das PALAVRA-CHAVES presentes na Tabela 5 foi feito gráficos que acompanham a evolução em longo termo desses componentes do SDO. Estes são: a porta frontal, o anel de montagem da janela frontal, a caixa elétrica da câmera frontal, a CCD frontal, o banco óptico e o forno de filtros. A janela frontal e os últimos três componentes tem os maiores impactos nos observáveis (HOEKSEMA et al., 2018).

Na Figura 21 é mostrado a temperatura da porta frontal no período de 2013 ao começo de 2021. Como a porta frontal esta fora do pacote óptico, a sua temperatura não é essencialmente controlada, assim nota-se a variação anual na temperatura devido a mudança na distância do Sol-SDO e a diminuição transiente devido a época de eclipses que ocorrem duas vezes ao ano. O aumento na temperatura de equilíbrio deve-se as mudanças na refletância e absorção da superfície da porta frontal e mudanças deliberadas ocorridas próximas a janela frontal (HOEKSEMA et al., 2018).

Figura 21 – Variação na temperatura da porta frontal. Onde temos as quedas verticais provocadas pelos eclipses do HMI com a Terra e um aumento da temperatura da porta frontal com tempo, devido as mudanças ocorridas proximas a janela frontal.



Fonte: a autora.

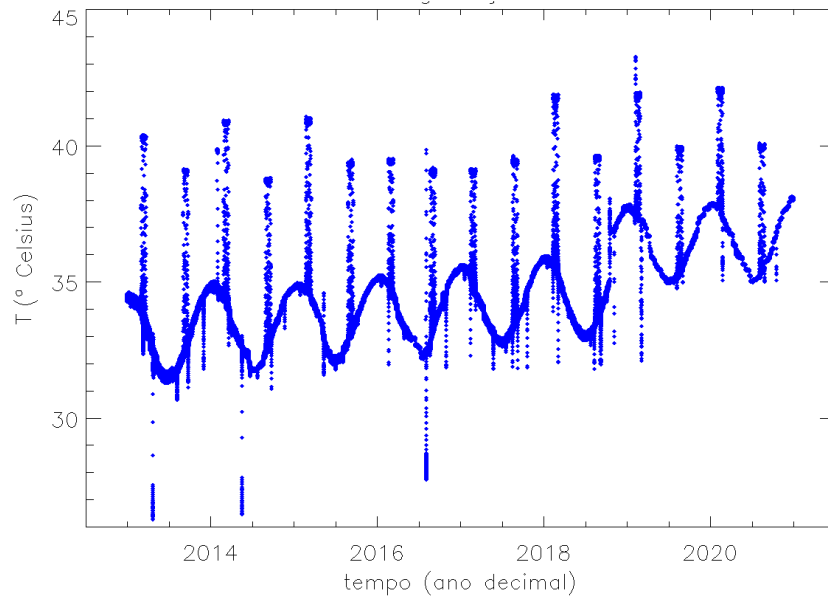
A temperatura no topo do anel de montagem da janela frontal, mostrado na Figura 22 não é diretamente controlada, entretanto, há um termistor anexado a janela frontal, opostamente ao sensor usado para controlar a temperatura da janela frontal. Dessa forma, a temperatura da janela frontal aumentou no período analisado (2013-2021) para manter o foco do instrumento constante. Ao contrário da temperatura de outros locais, durante os eclipses, a temperatura aumenta uma vez que os aquecedores são ativados para manter os gradientes térmicos na janela frontal pequenos o suficiente para que a recuperação pós eclipse seja mais rápida (HOEKSEMA et al., 2018).

A caixa elétrica da câmera frontal (CAM 2) é montada em frente ao pacote óptico do HMI. Esta também apresentou algumas variações na temperatura com a periodicidade anual e quedas fortes durante os eclipses, como é mostrado na Figura 23. A temperatura neste componente é um pouco maior uma vez que o calor gerado pela operação da câmera não é completamente dissipado pelo seu radiador (HOEKSEMA et al., 2018).

Cada câmera CCD tem seu próprio radiador. A temperatura nas CCDs é mantida bem baixa para minimizar correntes indesejadas. Como mostrado na Figura 24, a variação na sua temperatura é pequena e variações de pequeno prazo dominam, além da pequena queda em época de eclipses (HOEKSEMA et al., 2018).

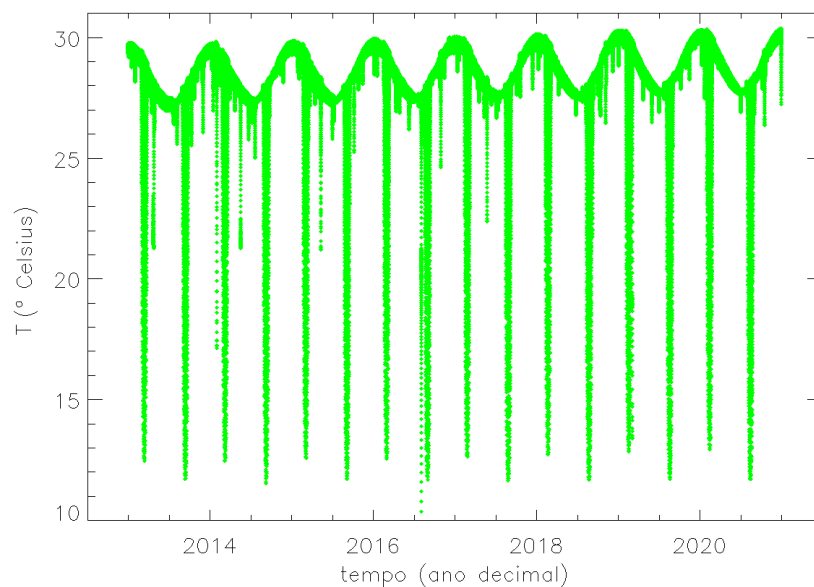
A temperatura medida no banco óptico dentro do pacote óptico é mostrado na Figura 25. Durante os três primeiros anos de operação, a temperatura era controlado especificando entradas de potência dos aquecedores internos. Em 13 de julho de 2013 o esquema

Figura 22 – Variação na temperatura do anel de montagem da janela frontal. Onde temos um aumento da temperatura durante os eclipses, pois nesse caso os aquecedores eram ligados para que a recuperação dos componentes próximos a eles fosse mais rápidos após o eclipse.



Fonte: a autora.

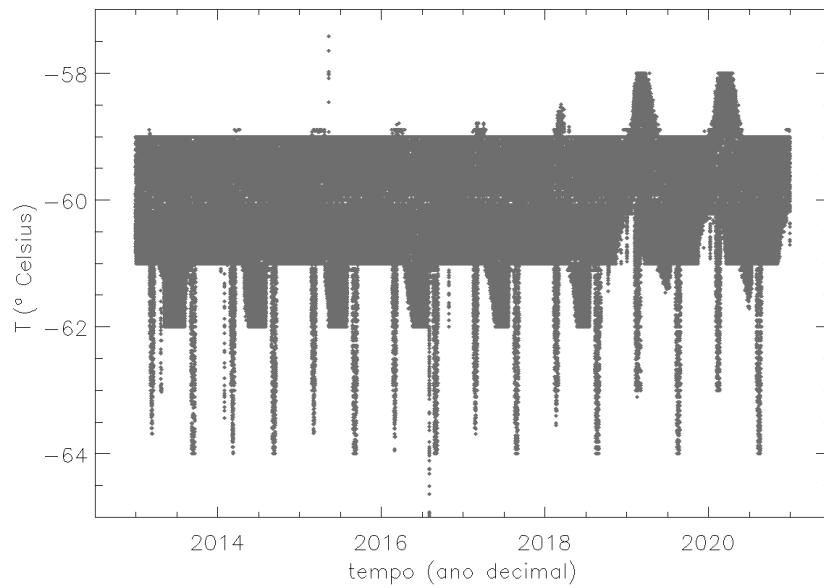
Figura 23 – Variação na temperatura da caixa elétrica frontal da câmera 2.



Fonte: a autora.

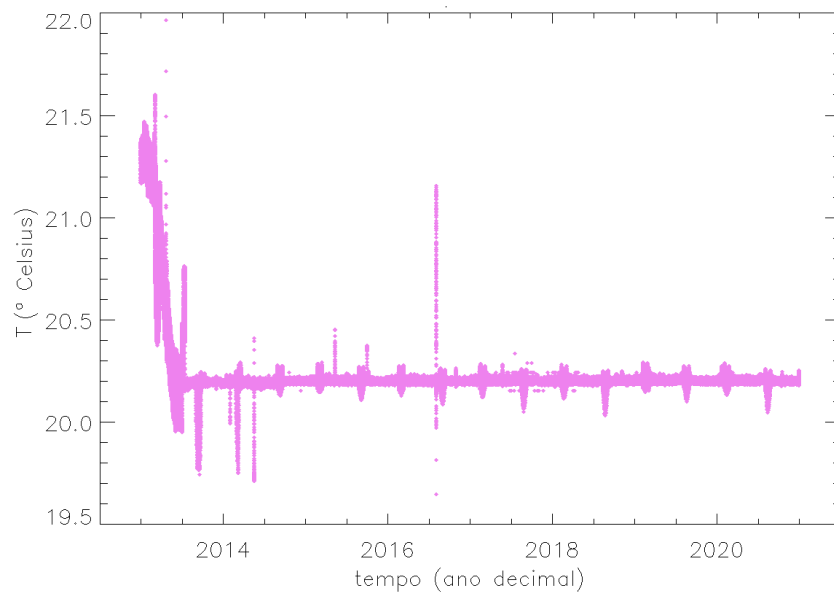
foi modificado para ligar os aquecedores a específicos ciclos apenas quando a temperatura caía abaixo de um certo mínimo, subsequentemente, a variação foi grandemente reduzida e mesmo a resposta durante eclipses diminuíram significativamente (HOEKSEMA et al., 2018).

Figura 24 – Variação na temperatura da CCD 2 (frontal). Nesse caso as temperaturas eram mantidas em torno de -50° Celcius.



Fonte: a autora.

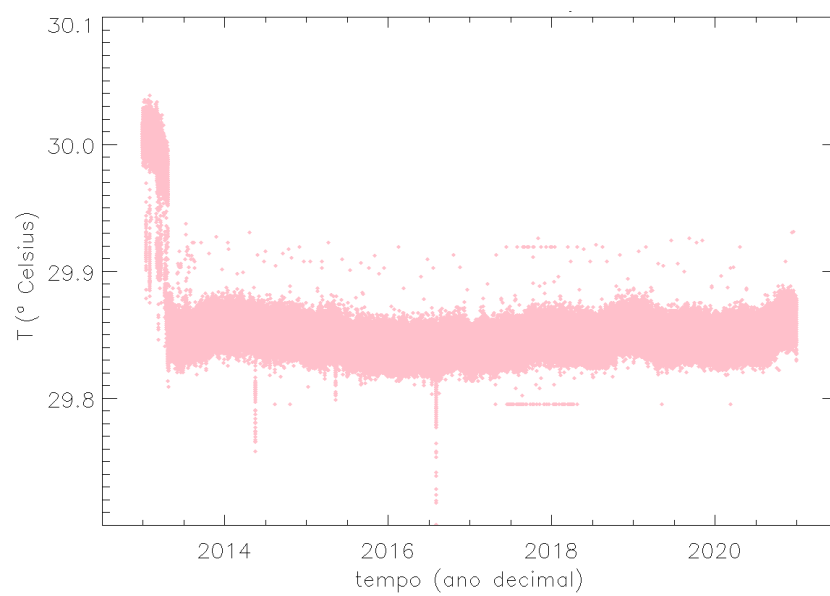
Figura 25 – Variação na temperatura do banco óptico frontal.



Fonte: a autora.

O último gráfico de temperatura a ser analisado contém a variação da temperatura do forno de filtros, o caso mostrado na Figura 26 é para o filtro de Lyot. Em abril de 2013 o HMI foi rebotado, embora a temperatura interna do forno não tenha mudado, a do sensor externo mudou uma vez que o gradiente entre o forno e o resto do instrumento foi alterada. Em julho de 2013 uma mudança no controle térmico do banco óptico eliminou quase completamente as variações anuais na temperatura (HOEKSEMA et al., 2018).

Figura 26 – Variação na temperatura do forno de filtros.

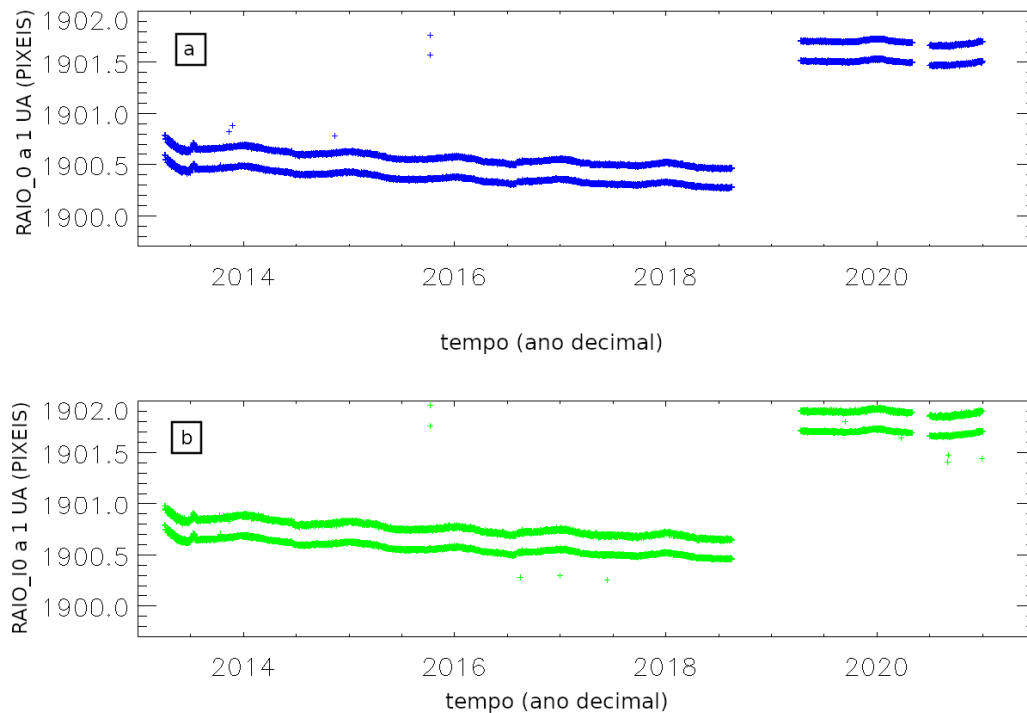


Fonte: a autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um exemplo dos gráficos obtidos através da equação 4.3 e 4.4 é mostrado na Figura 27 para os FIDs do contínuo (10000 e 10001). Nesta Figura temos o RAIO_0 e RAIO_I0 a 1 UA, e são mostradas duas curvas que correspondem às câmeras 1 e 2. Analisando esses gráficos, vemos que a altura do raio obtidos são um pouco diferentes quando se considera apenas o RAIO_0 em contraposto com o RaioI0. Já na Figura 28 é mostrado os gráficos para o Raio6 e RaioI6 e nesta análise não temos a diferença na altura do raio entre eles.

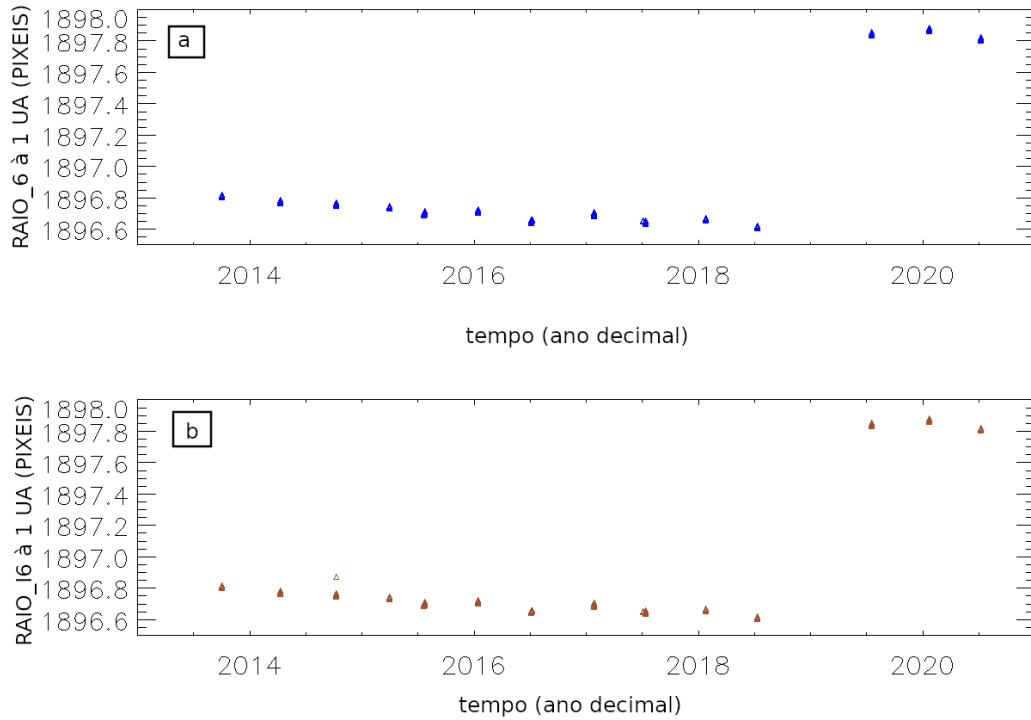
Figura 27 – Paineis a e b mostram o RAIO_0 obtido com a equação 4.3. E no Paineis b RaioI0, obtido com a equação 4.4. No painel a temos o RAIO_0 para as duas câmeras, onde temos uma diferença no raio para cada câmera. O mesmo ocorre para o RAIO_I0 (painel b). Notamos ainda o salto no sinal do raio a partir de meados de 2018 para ambas as câmeras e raios analisados.



Fonte: a autora.

Nos gráficos da Figura 27 mostra-se duas curvas, correspondente a cada uma das câmeras do HMI: câmera 1 e câmera 2, podemos ver melhor qual curva corresponde a qual câmera na Figura 30 para o RAIO_0 (gráfico do topo da Figura 27). Essa diferença no raio para cada uma das câmeras se dá devido ao processamento dos pixels em cada câmera. Os dispositivos CCD transferem as cargas recebidas nos pixels primeiramente adjacientemente e depois entre linhas da CDD (STANFORD..., 2021). Esses processos geram ruídos e

Figura 28 – Paineis a e b mostram o $RAIO_6$ obtido com a equação 4.3. E no Paineis b $RaioI6$, obtido com a equação 4.4. Neste caso, temos que os dados do raio eram coletados a cada seis meses para ambas os raios analisados. Notamos também o salto ocorrido em meados de 2018 no sinal do raio para ambos os raios analisados.



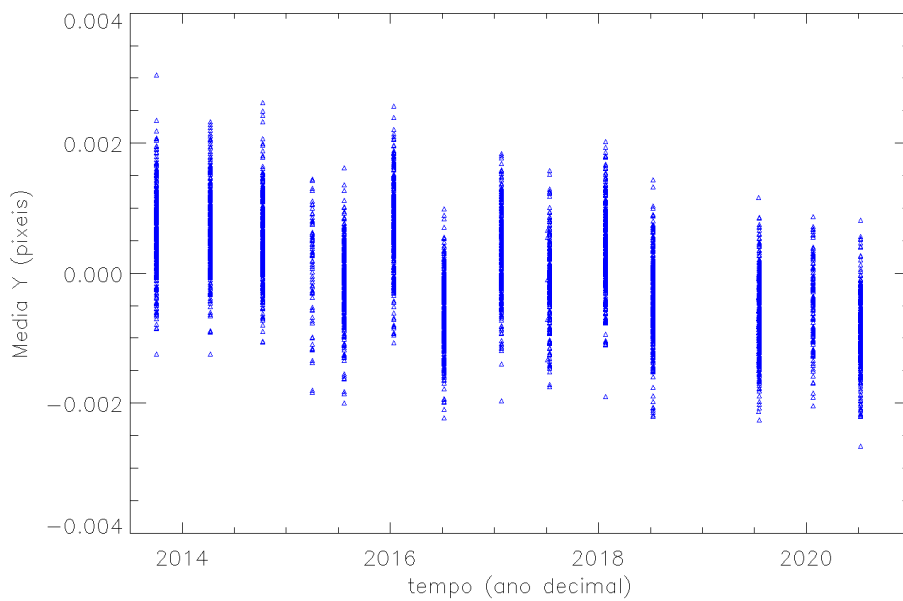
Fonte: a autora.

instabilidades que afetam a resolução e qualidade de cada câmera. As correntes negras são medidas e acompanhadas durante toda a missão do HMI. Estas foram registradas em 122 contagens para a câmera 1 e 131 para câmera 2. Estes são levados em conta no processamento das imagens de nível 1 do HMI. Há também o monitoramento de pixels ruins que são tratados, a câmera 1 tem 45 pixels ruins e a câmera 2 tem 34. A maioria desses pixels ruins são devidos a eventos transientes como raios cósmicos (HOEKSEMA et al., 2018).

Outras correções nas imagens que também são aplicadas está na posição do centro do Sol e no raio determinado pelo limb finder. O valor do centro do Sol na PALAVRA-CHAVE CRPIX2 é sistematicamente maior do que a posição mais exata determinada quando o limb finder é aplicado à imagens com uma correção de distorção entre 0,13 a 0,17 pixels dependendo do comprimento de onda do filtrograma. As variações randômicas reportadas nos estudos das medidas da posição do centro do Sol de uma imagem para a próxima devido a todas as fontes de ruídos são menores que 0,15 pixels para os observáveis de cadência de 45 segundos e menores que 0,05 pixels para os observáveis de 720 segundos de cadência (COUVIDAT et al., 2016).

Quando trabalha-se com a diferença entre os FIDs ao invés da soma, obtêm-se gráfico do tipo representado na Figura 29. Este permite-se ver as tendências no raio sem o salto observadas nos pontos a partir de 2019 dos gráficos das Figuras 27 e 28. Vemos nos gráficos do raio solar obtidos nessa análise (Figuras 27 e 28) que a partir de junho de 2018 houve um interrompimento na coleta dos dados do raio em todos os FIDs. Estes dados somente voltaram a ser coletados em meados de 2019.

Figura 29 – Média da diferença do RLFS_6 e a interpolação do RLFS_7 feito no tempo_7 dividido pela Média de dist_6. Temos que a variação média desses dados de 0,004 pixels é um norteador para o tamanho da variação no raio solar que devemos esperar nos dados obtidos pelo HMI.



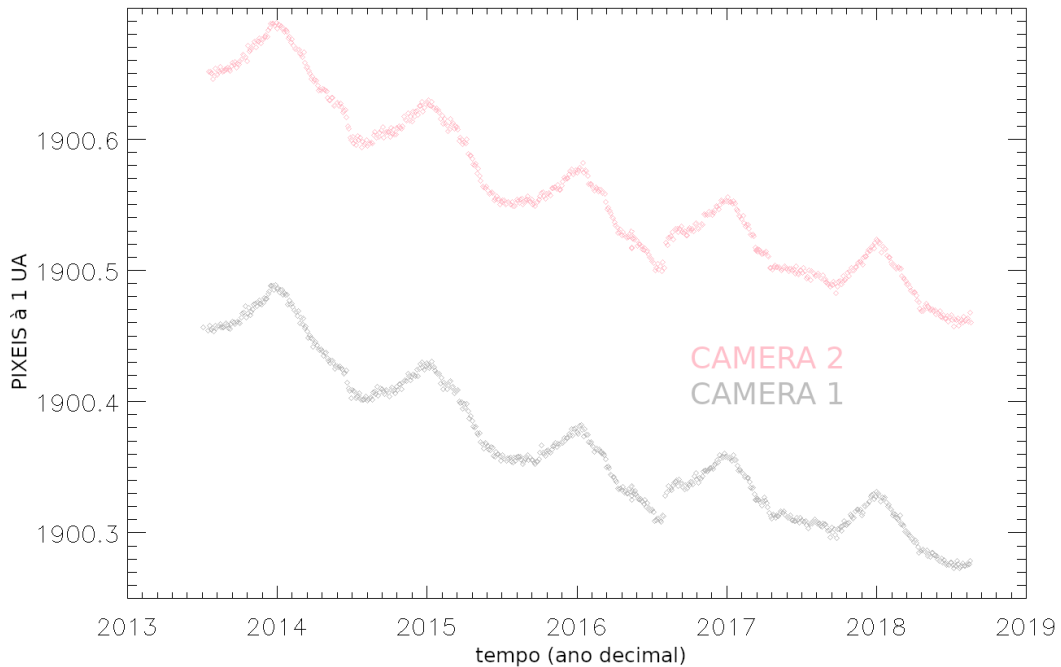
Fonte: a autora.

Analisando-se o gráfico mostrado na Figura 29 onde temos o valor medio de $Y = [(RLFS_6 - \text{intRLFS_7}) * \text{dist_6} / \text{média}(\text{dist_6})]$. Nesse, temos que os dados são obtidos pelo satélite a cada 6 meses para estas polarizações e que os dados tem a variação da média em torno 0,004 pixels.

No gráfico da Figura 30, é mostrado os cinco picos do gráfico do topo da Figura 27, nestes, a curva em cinza representa os pontos observados pela câmera 1 e a curva em rosa os pontos observados pela câmera 2. Neste gráfico, os pontos já foram tratados para serem usados no modelo (descrito na secção 5.1.1).

Como vimos na secção 4.3, a opacidade da lente que com o tempo de vida do satélite tende a desgastar. Analisando a PALAVRA-CHAVE CMEAN que trás a média da intensidade do HMI do disco solar e novamente a indexando aos FIDs, temos o gráfico mostrado na Figura 31 . Neste vê-se a análise com respeito a intensidade do contínuo, ou

Figura 30 – Curva do gráfico da Figura 27 sem os pontos a partir de 2019, onde os pontos (3689 pontos) em cinza foram observados pela câmera 1 e os em rosa (3679 pontos) pela câmera 2. Os pontos foram tratados de forma que foram removidos àqueles que estavam a mais de 2σ da curva principal.



Fonte: a autora.

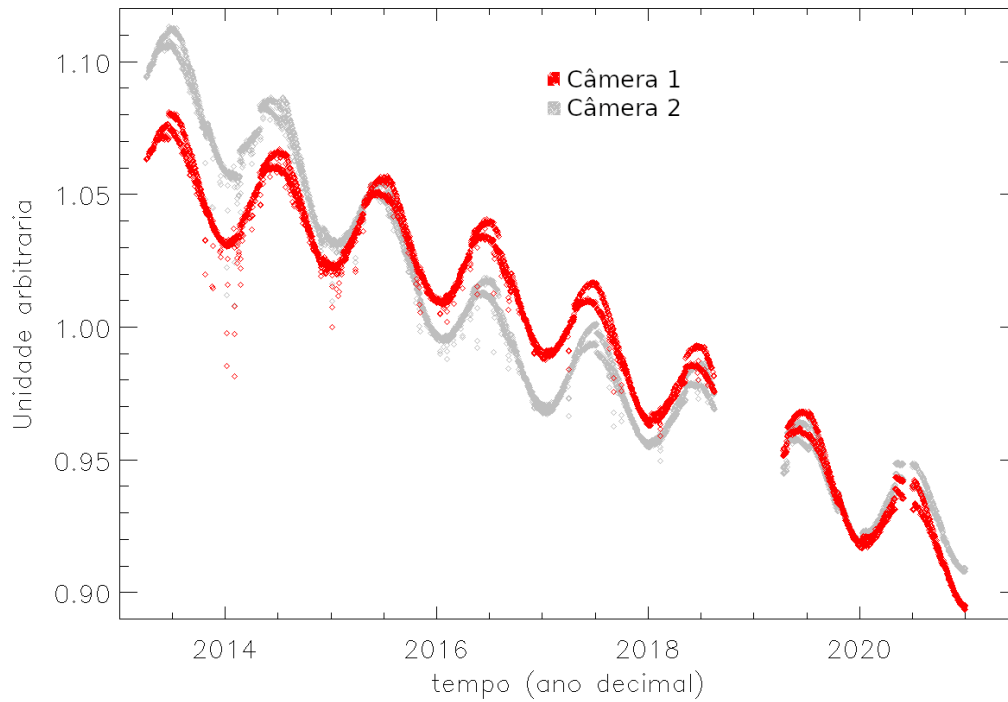
seja, ao FID 10000 (CMEAN_0). Como esperado, há uma declinação notável na intensidade com o tempo.

Com base nas variações nas temperaturas dos componentes observadas na secção 4.4 deve-se levar em consideração estas variações quando se analisa os valores absolutos obtidos nos observáveis. Ainda há outros erros e problemas apontados por diversos estudos que podem influenciar nos valores obtidos nos observáveis que não foram analisados nesta dissertação, como por exemplo, eventuais modificações e anomalias no instrumento, imagens corrompidas, entre outros.

As análises acima performadas levaram a reflexão sobre a extensão das influências térmicas e instrumentais dos componentes do HMI no raio solar observado pelo satélite. Uma vez percebido que a intensidade média do HMI, que reflete durante a vida útil do instrumento HMI o quanto os efeitos das radiações recebidas no instrumento influenciam a quantidade de luz recebida nas câmeras CCDs, está diminuindo com o tempo, nos levam a crer que este efeito também pudesse ser refletido no raio solar observado pelo instrumento HMI.

As temperaturas analisadas na secção 4.4 nos mostram que por melhores controladas, apresentaram períodos de instabilidade térmica no instrumento e de mudanças

Figura 31 – Intensidade do HMI observado pela câmera 1 (em vermelho) e câmera 2 (em cinza) obtidos com o parâmetro CMEAN_0. Temos uma queda significativa na intensidade média do pixels centrais observados pelo HMI com o tempo para ambas as câmeras.



Fonte: a autora.

abruptas e sazonais. Particularmente, os gráficos do raio solar mostrados acima mostram um decaimento do raio observado com o tempo e um salto no valor do raio observado a partir da metade de 2019. Esse salto veio após um período de ausência de dados das PALAVRA-CHAVES recebidas pelo HMI e disponíveis no site da JSOC (JSOC, 2021b). Nesses mesmos gráficos mostrados nas Figuras 27 e 28, vemos uma certa variação senoidal no raio solar observado pelo HMI que se mantém antes e após o período do salto .

A fim de entender e observar a qual grau de influência estes efeitos de temperatura e desgastes estariam influenciando no raio solar observado, fizemos um modelo empírico para possível correção desses efeitos instrumentais, almejando entender e explicar as oscilações apresentadas nesses gráficos do raio solar (Figura 30). O modelo levou em consideração os dados do raio solar obtidos pelo HMI de abril de 2013 à agosto de 2018 para câmera 1 e câmera 2, como pode ser visto na Figura 30. Ignorou-se as medidas após o salto (após agosto 2018) pois nosso modelo empírico não conseguiu explicá-lo e nem incluí-lo satisfatoriamente. Deixamos para um trabalho futuro entender essa variação (salto) nos dados recebidos pelo instrumento após 2019.

5.1 MODELO EMPÍRICO DE CORREÇÃO DOS EFEITOS INSTRUMENTAIS

Foi-se escolhido utilizar o método dos mínimos quadrados para análise, uma vez que este método permite ajustar parâmetros de um função modelo que melhor ajusta o conjunto de dados experimentais. A função modelo tem a forma de $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\beta}_i) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n$, onde os m parâmetros ajustáveis ou coeficientes estão no vetor $\boldsymbol{\beta}$. O objetivo é encontrar os coeficientes para o modelo que melhor ajustem os dados experimentais. O ajuste do modelo aos dados experimentais é medido pelo seu resíduo (que é a diferença entre o valor real da variável dependente e o seu valor predito pelo modelo.) O método dos mínimos quadrados encontra os coeficientes otimizados minimizando a soma dos resíduos ao quadrado, ou seja:

$$\mathbf{S} = \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i^2 \quad (5.1)$$

onde $\mathbf{r}_i = \mathbf{y}_i - \mathbf{f}(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\beta})$, em que $\mathbf{y}_i$ é o vetor do raio solar no nosso caso. O programa escrito em IDL utilizou-se da função *MOMENT* para obter a média, a variação absoluta da média, desvio padrão e a variância. Já o vetor dos coeficientes $\boldsymbol{\beta}$ foi encontrado através da multiplicação da inversa da matriz normal com a matriz momento, ou seja:

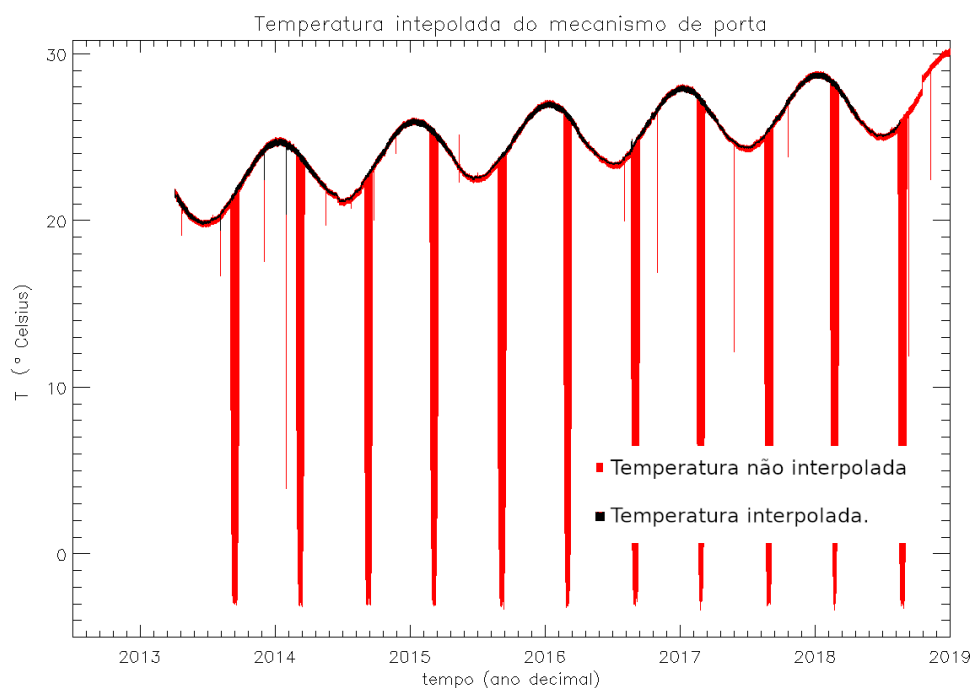
$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.2)$$

5.1.1 Interpolação

Fez-se o tratamento das temperaturas (as que estão presentes na Tabela 5) e intensidade média do HMI (Cmean) para poderem ser utilizadas no modelo. Inicialmente foi realizado uma indexação nos vetores do raio, distância e tempo para que englobassem os dados referentes ao período de 2013 à 2019. Uma segunda indexação ocorreu para separação de quais dados pertenciam a câmera 1 e quais pertenciam a câmera 2. Os vetores utilizados no modelos do raio solar para câmera 1 contaram com 3689 pontos e 3679 pontos para câmera 2. Com estes dados preparados, foi usado a rotina *INTERPOL* com */spline* para realizar a interpolação dos tempos das temperaturas (vetor anoDecTemperaturas) nos tempos do raio (vetor anoDec) e do parâmetro CMEAN. Dessa forma, os parâmetros foram renomeados para carregar as características que onde eram derivados, o esquema de nomenclatura pode ser visto na Tabela 9, no apêndice. Um exemplo de interpolação realidade apresenta-se no gráfico da Figura 32, para a temperatura do mecanismo de porta, onde em vermelho temos os valores da temperatura sem interpolação e em preto

com a interpolação.

Figura 32 – Temperatura do mecanismo de porta não interpolada (em vermelho) e interpolada (em preto). Os tempos da temperatura (mecanismo de porta) foram interpolados no tempos do RAIO_0.



Fonte: a autora.

Com as temperaturas selecionadas e preparadas para serem utilizadas no modelo, deu-se início ao teste de quais temperaturas poderiam com a sua contribuição sendo levada em consideração melhorar o modelo do raio solar. Foi testado através de combinações entre as temperaturas e então comparado os desvios padrões para se verificar quais eram os menores e a quais temperaturas estes desvios pertenciam. Foram feitos os testes com combinações de 8 temperaturas no total entre si. Até a quinta temperatura as combinações rodaram livremente no programa e a partir da sexta, utilizamos as temperaturas mais prováveis de melhorarem o modelo, ou seja, aquelas que já apareceram como combinações nos modelos com menos temperaturas e que apresentaram um menor desvio padrão. Os melhores coeficientes obtidos no modelo estão na Tabela 7 para câmera 1 e Tabela 8 para câmera 2, em ambos modelos foi encontrado 7 temperaturas. Na Figura 33 e Figura 34 é mostrado os coeficientes das temperaturas, obtido quando multiplicamos cada uma das sete temperaturas por seu coeficiente para câmera 1 e câmera 2, respectivamente.

Tabela 7 – Parâmetros usado no modelo da câmera 1, seus respectivos coeficientes e erros.

Parâmetro	Coeficiente	erro
I0C1T2	0,039	0,001
I0C1T3	-0,166	0,003
I0C1T6	0,165	0,003
I0C1T8	0,047	0,005
I0C1T14	-0,18	0,01
I0C1T26	0,0094	0,0004
CMCAM01	0,69	0,01

Fonte: a autora.

Tabela 8 – Parâmetros usado no modelo da câmera 2, seus respectivos coeficientes e erros.

Parâmetro	Coeficiente	erro
I0C2T7	-0,0432	0,0005
I0C2T9	0,101	0,002
I0C2T24	0,0287	0,006
I0C2T2	0,0283	0,0009
I0C2T15	-0,04	0,02
I0C2T28	0,063	0,001
I0C2T29	-0,0187	0,0006

Fonte: a autora.

5.1.2 Teste F

O modelo inicio-se com apenas uma temperatura. Os modelos com mais parâmetros apresentavam um menor desvio padrão conforme mais temperaturas eram acrescentadas. Assim, para sabermos a significância do modelo com mais temperaturas sobre o modelo com menos temperaturas foi performado o teste estatístico chamado teste F. Especificamente o teste Chow para haver uma correta análise de quando acrescentar mais parâmetros no modelo já não apresentavam uma vantagem significativa no modelo .

Para os n pontos dos vetores de temperatura e raio solar analisados, comparamos dois modelos usando a seguinte equação (SAWILOWSKY, 2002):

$$F = \frac{\left(\frac{RSS_1 - RSS_2}{p_2 - p_1} \right)}{\left(\frac{RSS_2}{n - p_2} \right)}, \quad (5.3)$$

Onde RSS_i é o resíduo da soma dos quadrados no modelo i ($RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2$). Sob a hipótese nula que o modelo 2 não provê uma melhora significativa do que o modelo 1, F terá uma distribuição F com $(p_2 - p_1, n - p_2)$ graus de liberdade. A hipótese nula é rejeitada se o F calculado é maior do que o valor crítico da distribuição F para a

probabilidade de rejeição-falsa escolhida. O teste foi performado para os modelos de 1 à 8 temperaturas e os resultados foram comparados aos valores críticos na Tabela encontrada no site Engineering Statistics Handbook¹. Da primeira à sétima temperatura o teste F mostrou com 99 % significância de que o modelo posterior era melhor que o anterior para descrever o raio solar. O teste F comparando o modelo com oito e sete temperaturas foi igual a -112,8 para câmera 1 e -304,29 para câmera 2. Com isso, aceitamos que a hipótese nula do modelo com oito temperaturas com 99 % de certeza de que este não melhora significativamente do que o modelo com sete temperaturas e portanto o modelo com oito temperaturas não foi utilizado nessa análise.

5.1.3 Modelos

Os modelos com as temperaturas e parâmetros que obtiveram o menor resíduo, são mostrados nos gráficos das Figura 35 para câmera 1 e Figura 36 para câmera 2. No primeiro painel temos o raio solar (RAIO_0) a 1 UA, no painel do meio temos o resíduo criado através do método dos mínimos quadrados com o parâmetros da Tabela 7 para câmera 1 e Tabela 8 para câmera 2 e no último painel temos apenas o modelo com as temperaturas utilizadas.

Na Figura 37 e Figura 38 vemos uma aproximação nos dados no painel do meio da Figura 35 para câmera 1 e Figura 36 para câmera 2. Nas Figuras dos resíduos mostra-se com mais clareza que muitos dos efeitos instrumentais não foram melhorados totalmente. Embora tenha melhorado significativamente se comparado ao raio sem o modelo empírico, como vemos na comparação das Figuras 35 e 36 quando observamos o painel do topo com o do meio.

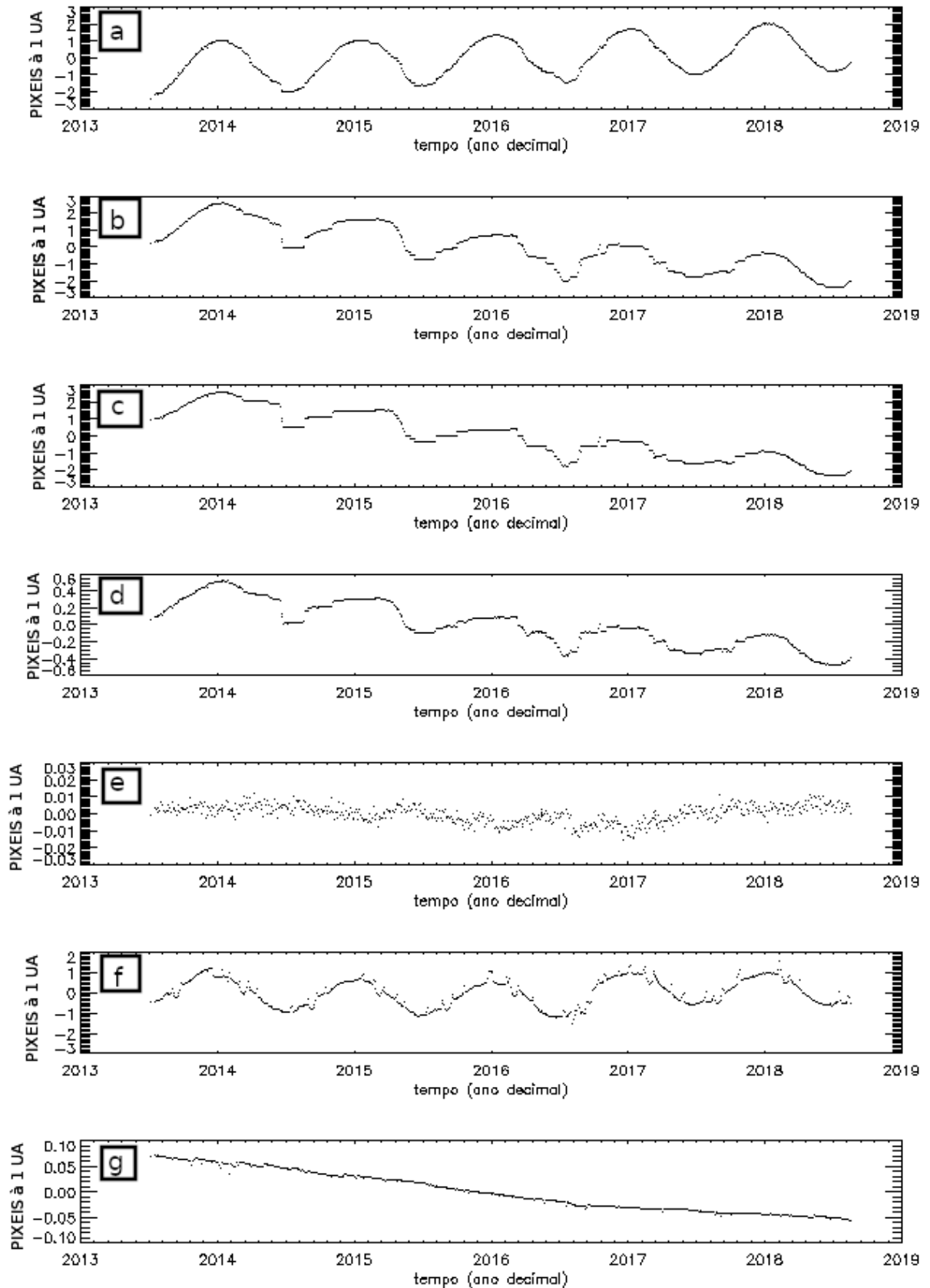
Também analisando o raio obtido com o modelo nas Figuras 37 e 38, podemos calcular a variação no raio máxima possível segundo o modelo empírico obtido. Para a câmera 1 temos que $\Delta R = 0,074$ pixels*UA e $\Delta R = 0,083$ pixels*UA para câmera 2. Podemos obter o valor de ΔR em arcsec se multiplicarmos este valores obtidos pela escala de placa do HMI = 0,504338. Dessa forma, temos: $\Delta R_{CAM1} = 0,038$ arcsec e $\Delta R_{CAM2} = 0,042$ arcsec.

Analisando o valor de ΔR em mas, temos $\Delta R_{CAM1} = 38$ mas e $\Delta R_{CAM2} = 42$ mas. Comparando estes valores com os valores da literatura, encontrados na Tabela 1. Temos que os valores estão razoavelmente compatíveis com os valores reportados, estando entre os valores reportados por Thuillier (2017) e Noel (2004), que são 26 e 52 mas, respectivamente. Uma vez que os valores reportados na Tabela 1 tratam-se de determinação

¹ <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3673.htm>, (ENGINEERING..., 2021)

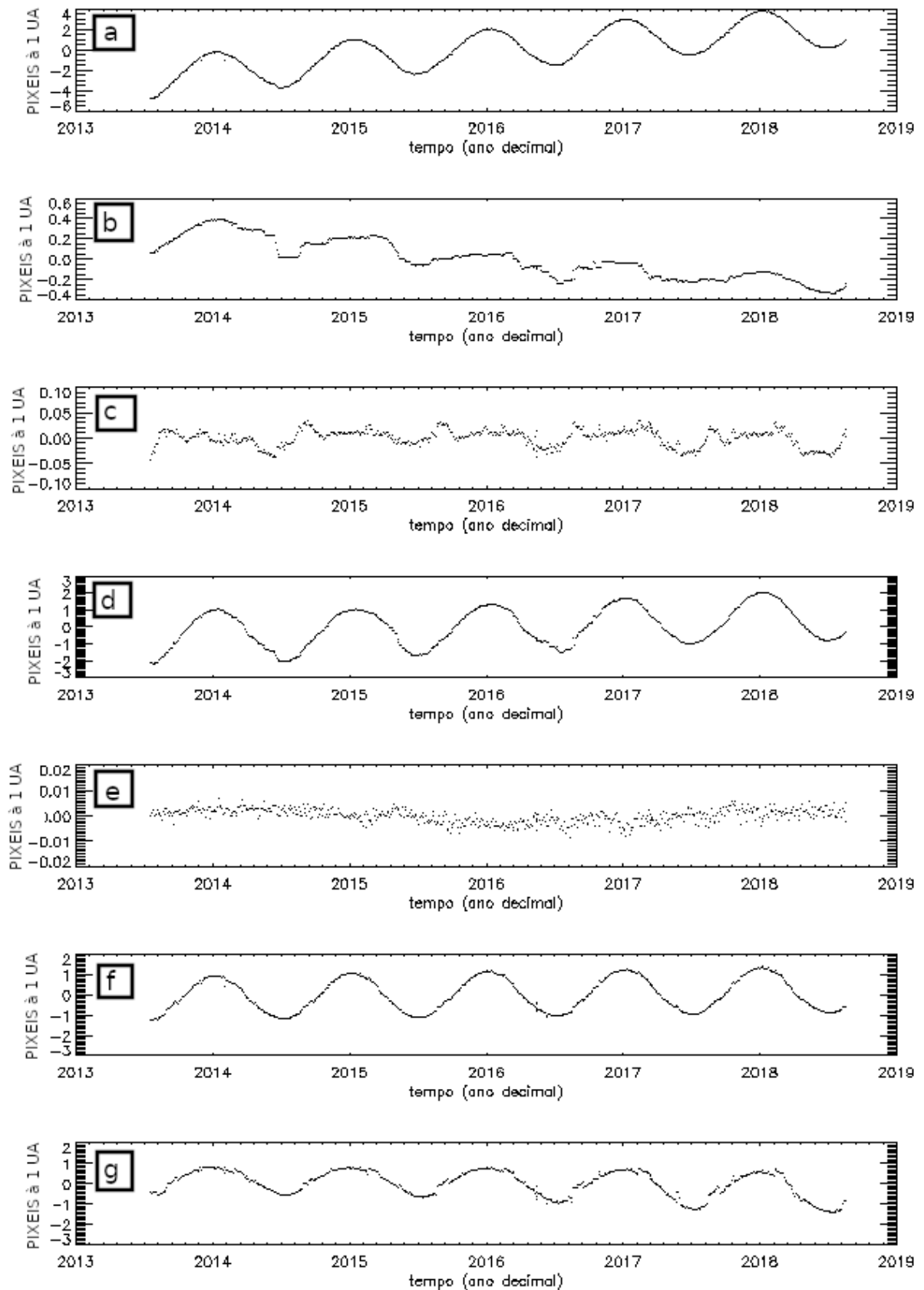
da variabilidade do raio por diversos métodos, temos que os valores encontrados nesta dissertação se assemelham aos valores reportados nas análises utilizando o instrumento MDI a bordo do satélite SOHO (Emilio, (2000) e Bush, (2010)). Embora a resolução da câmera do HMI é melhor do que a do MDI, o caminho óptico do HMI é mais elaborado do que o do MDI, o que contribui para que o modelo que explicaria melhor o ΔR encontrado no HMI deve ser mais complexo, incluindo provavelmente relações quadráticas com alguns instrumentos, enquanto nos modelos neste trabalho contém apenas relações lineares entre os parâmetros. Outra possível explicação da diferença entre os ΔR encontrados pelo HMI e MDI pode estar na relação das órbitas e posições dos satélites em relação a Terra. O HMI sofre eclipses periódicos, como vimos nos gráficos de temperaturas do HMI, enquanto o MDI estava em uma posição mais afastada da Terra e não sofria efeitos de eclipses. Não foram encontrados diretamente valores reportados da variabilidade solar para o HMI. Entretanto, como vimos pela teoria de evolução estelar no capítulo um, a variação no raio solar em um ciclo esperado é muito menor que os valores encontrados nesse trabalho.

Figura 33 – Modelo para cada uma das sete temperaturas em pixel à 1 UA para câmara 1. Paineis a = parâmetro I0C1T2, Paineis b = I0C1T3, Paineis c = I0C1T6, Paineis d = I0C1T8, Paineis e = I0C1T14, Paineis f = I0C1T26, Paineis g = CMCAM01. Para referências da nomenclatura ver Tabela 9, no apêndice.



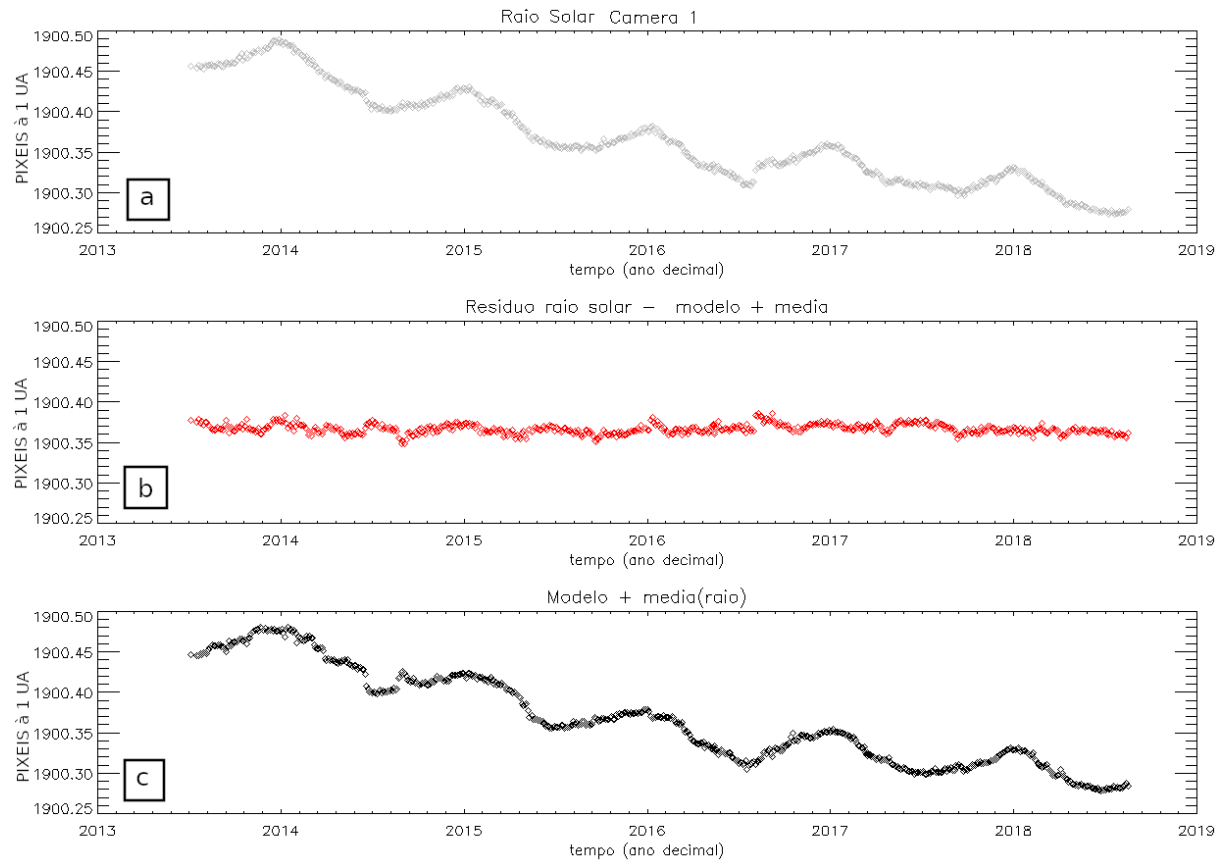
Fonte: a autora.

Figura 34 – Modelo para cada uma das sete temperaturas em pixel à 1 UA para câmara 2. Painel a = parâmetro I0C1T7, Painel b = I0C1T9, Painel c = I0C1T24, Painel d = I0C1T2, Painel e = I0C1T15, Painel f = I0C1T28, Painel g = I0C1T29. Para referências das nomenclatura ver Tabela 9, no apêndice.



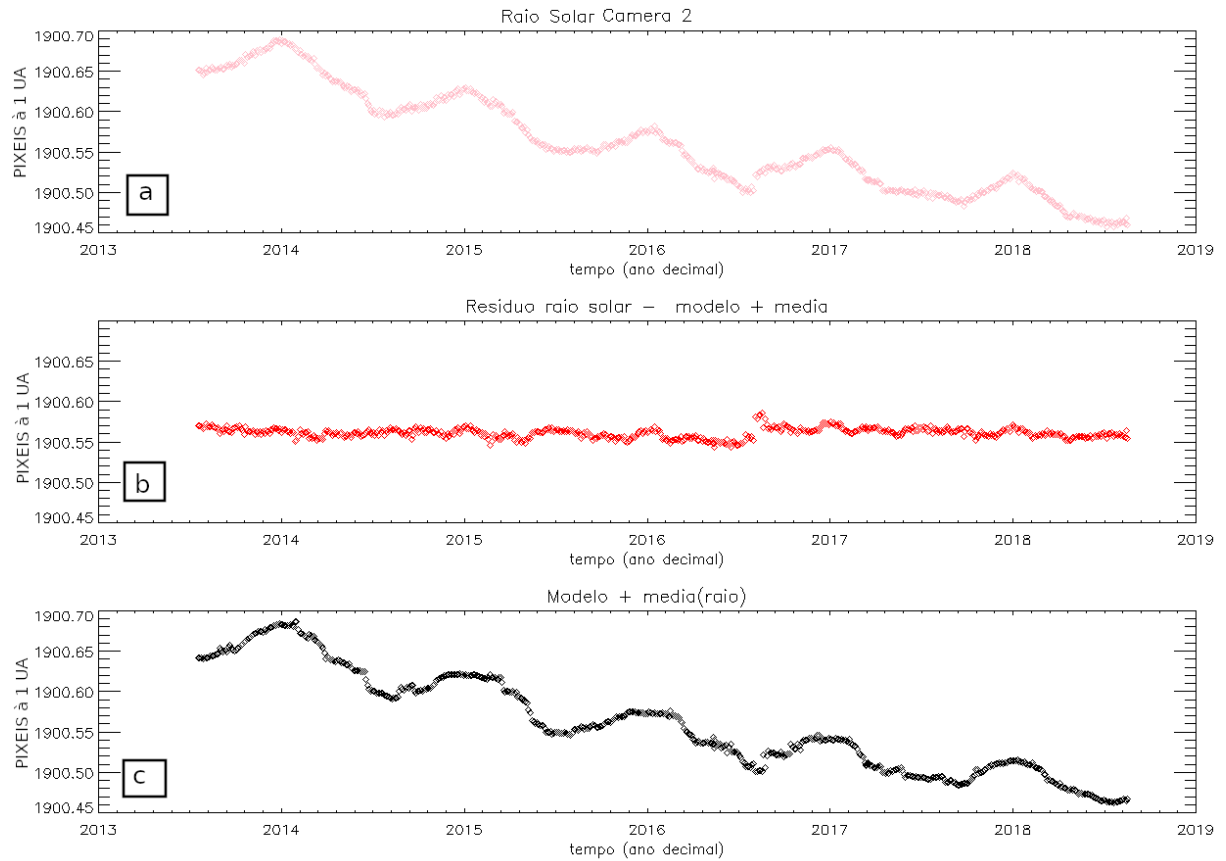
Fonte: a autora.

Figura 35 – Resultados para câmara 1. Paineis a: Raio solar RAIO_0 a 1UA, painel b: Raio do modelo empírico considerando as sete temperaturas do modelo (Tabela 7), painel c: Raio criado pelo modelo. Vemos que o modelo (Painel b) conseguiu corrigir algumas das interferências da temperatura dos instrumentos do HMI utilizando os coeficientes encontrados na Tabela 7.



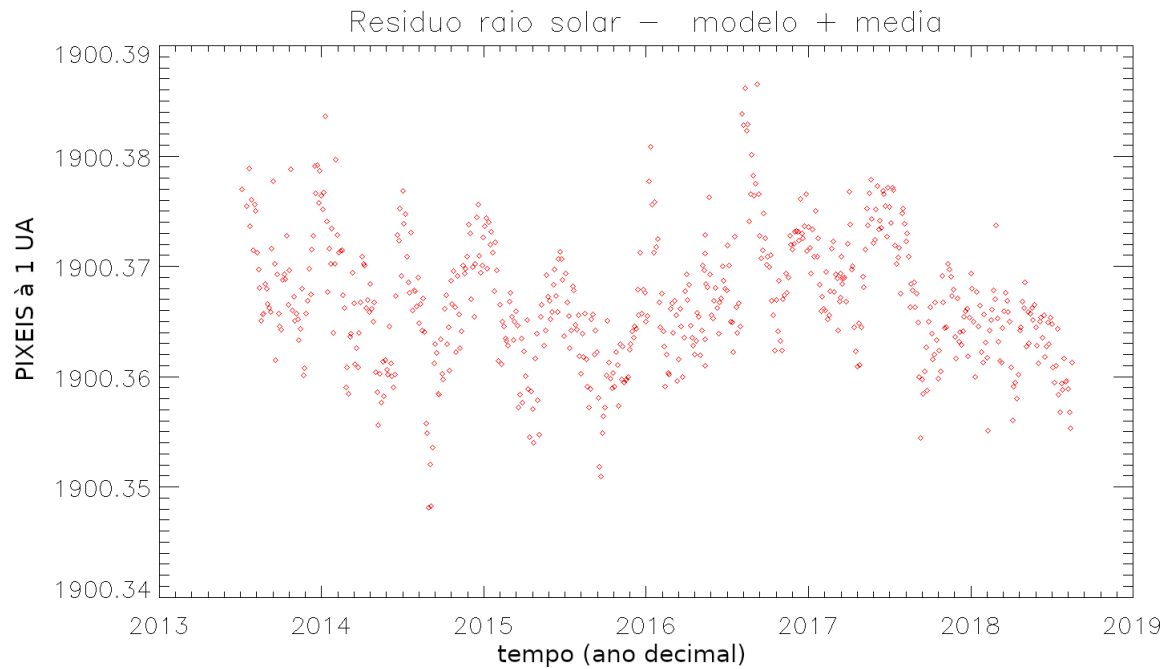
Fonte: a autora.

Figura 36 – Resultados para câmera 2. Painei a: Raio solar $RAIO_0$ a 1UA, painei b: Raio do modelo empírico considerando as sete temperaturas do modelo (Tabela 8), painei c: Raio criado pelo modelo. Vemos que o modelo (Painei b) conseguiu corrigir algumas das interferências da temperatura dos instrumentos do HMI utilizando os coeficientes encontrados na Tabela 8.



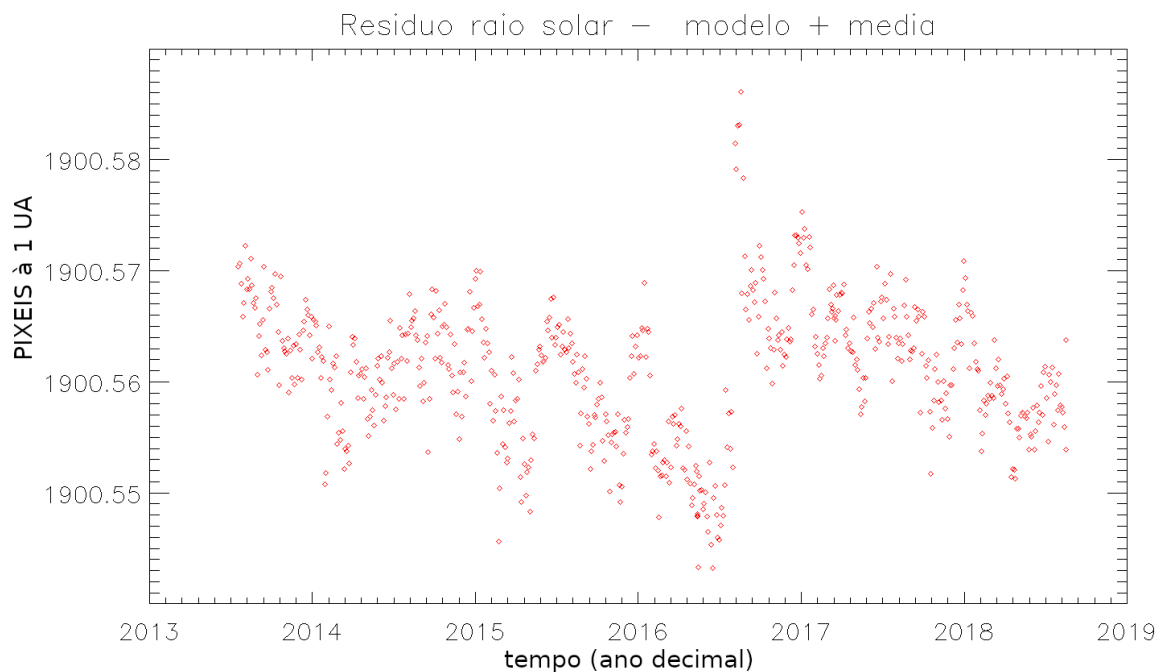
Fonte: a autora.

Figura 37 – Resíduo raio solar para câmera 1. Podemos ver que alguns efeitos instrumentais não foram corrigidos com o modelo proposto utilizando os coeficientes encontrados na Tabela 7.



Fonte: a autora.

Figura 38 – Resíduo raio solar para câmera 2. Podemos ver que alguns efeitos instrumentais não foram corrigidos com o modelo proposto utilizando os coeficientes encontrados na Tabela 8.



Fonte: a autora.

6 CONCLUSÃO

Nosso objetivo de utilizar os dados do HMI para estudar a variação no raio solar foi atingido. Foram analisados os dados do raio solar do período de abril de 2013 à agosto de 2018. O raio solar analisado em detalhes foi o raio correspondente ao primeiro estado de polarização do contínuo, referente ao FID 10000 (RAIO_0). Foi criado um modelo empírico utilizando dados de temperaturas dos componentes do HMI e da intensidade do pixel central. As temperaturas encontradas nas palavras-chave *hmi.temperature_summary_300s* incluíam cerca de 40 temperaturas. Estas temperaturas foram combinadas em no modelo utilizando o método dos mínimos quadrados para se obter os coeficientes das temperaturas que melhor atuavam nos dados brutos do raio solar. Dentre temperaturas que foram usadas nos modelos temos: Janela frontal, lentes primárias, tubo telescópio, espelho, filtro de fornos, estrutura de montagem e caixa elétrica das câmeras. Os modelos obtidos foram submetidos ao teste F de significância e o modelo com 7 temperaturas foi escolhido sobre o de 8 temperaturas com 99 % de significância. Nas análises feitas nesse trabalho sobre a variabilidade do raio do Sol, encontramos o valor máximo para a variação de $\Delta R_{\odot MEDIO} = 40 \text{ mas}$ ou $\Delta R_{\odot MEDIO} = 0,040 \text{ arcsec}$.

Os trabalhos futuros englobariam procurar outros efeitos instrumentais e relações mais complexas entre os parâmetros nos modelos. Podendo incluir modelos quadráticos e lineares com relação a certos parâmetros. Neste trabalho incluímos as PALAVRAS-CHAVES encontradas na série *hmi.temperature_summary_300s*, porém outras séries podem conter outros efeitos instrumentais de interesse e que poderiam melhorar os modelos do raio solar. A investigação sobre outras possíveis séries e parâmetros são temas para novos trabalhos que além de modelos empíricos poderiam incluir modelos teóricos, possibilitando até mesmo explicar o salto nos dados a partir de 2019 que foram notados no gráficos do raio solar.

REFERÊNCIAS

- ADASSURIYA, J.; GUNASEKERA, S.; SAMARASINHA, N. Determination of the solar radius based on the annular solar eclipse of 15 january 2010. *Sun and Geosphere*, v. 6, p. 17–22, 2011.
- AVRETT, E. H. Temporal variations of near uv, visible, and infrared spectral irradiance from a theoretical viewpoint. In: *Solar Electromagnetic Radiation Study for Solar Cycle 22*. [S.l.: s.n.], 1992. p. 20.
- CARROLL, B. W.; OSTLIE, D. A. *An introduction to modern astrophysics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017.
- COUVIDAT, S. et al. Observables processing for the helioseismic and magnetic imager instrument on the solar dynamics observatory. *Solar Physics*, Springer, v. 291, n. 7, p. 1887–1938, 2016.
- COUVIDAT, S. et al. Wavelength dependence of the helioseismic and magnetic imager (hmi) instrument onboard the solar dynamics observatory (sdo). *Solar Physics*, Springer, v. 275, n. 1-2, p. 285–325, 2012.
- EMILIO, M. et al. A changing solar shape. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 660, n. 2, p. L161, 2007.
- EMILIO, M. et al. Solar astrometry with planetary transits. *International Astronomical Union. Proceedings of the International Astronomical Union*, Cambridge University Press, v. 15, n. S354, p. 481–493, 2019.
- EMILIO, M. et al. Measuring the solar radius from space during the 2012 venus transit. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 798, n. 1, p. 48, 2014.
- EMILIO, M. et al. On the constancy of the solar diameter. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 543, n. 2, p. 1007, 2000.
- EMILIO, M.; KUHN, J. R.; BUSH, R. I. One solar cycle of solar astrometry with mdi/soho. *Proceedings of the International Astronomical Union*, Cambridge University Press, v. 5, n. S264, p. 21–32, 2009.
- EMILIO, M. et al. Measuring the solar radius from space during the 2003 and 2006 mercury transits. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 750, n. 2, p. 135, 2012.
- EMILIO, M.; LEISTER, N. Solar diameter measurements at são paulo observatory. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 361, n. 3, p. 1005–1011, 2005.
- ENGINEERING Statistics Handbook, Upper Critical Values. 2021. Disponível em: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3673.htm>. Acesso em: 23 Jul. 2021.
- FIALA, A. D.; DUNHAM, D. W.; SOFIA, S. Variation of the solar diameter from solar eclipse observations, 1715–1991. *Solar Physics*, Springer, v. 152, n. 1, p. 97–104, 1994.

FONTENLA, J. et al. Calculation of solar irradiances. i. synthesis of the solar spectrum. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 518, n. 1, p. 480, 1999.

GALILEO GALILEI. *Galileo's sunspot letters*, *British Library*. 1613. Disponível em: <https://www.bl.uk/collection-items/galileos-sunspot-letters>. Acesso em: 1 Feb. 2021.

GILLILAND, R. L. Solar radius variations over the past 265 years. *The Astrophysical Journal*, v. 248, p. 1144–1155, 1981.

GOLBASI, O. et al. Solar radius determinations obtained with the ccd astrolabe at tubitak national observatory. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 368, n. 3, p. 1077–1082, 2001.

HABERREITER, M.; SCHMUTZ, W. Modelling the solar uv radiation. In: *Solar Variability as an Input to the Earth's Environment*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 535, p. 289–292.

HABERREITER, M.; SCHMUTZ, W.; KOSOVICHEV, A. Solving the discrepancy between the seismic and photospheric solar radius. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 675, n. 1, p. L53, 2008.

HART, A. *Observing the sun in Calcium II K line (Part 1)*. 2021. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/alexandra4/5309964824/>. Acesso em: 12 Nov. 2021.

HAUCHECORNE, A. et al. Solar radius determination from sodism/picard and hmi/sdo observations of the decrease of the spectral solar radiance during the 2012 june venus transit. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 783, n. 2, p. 127, 2014.

HIEMATH, K. et al. Nearly century-scale variation of the sun's radius. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 891, n. 2, p. 151, 2020.

HOEKSEMA, J. T. et al. On-orbit performance of the helioseismic and magnetic imager instrument onboard the solar dynamics observatory. *Solar physics*, Springer, v. 293, n. 3, p. 45, 2018.

JAIN, K.; TRIPATHY, S.; HILL, F. The sun's seismic radius as measured from the fundamental modes of oscillations and its implications for the tsi variations. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 859, n. 1, p. L9, 2018.

JILINSKI, E. et al. Solar diameter observations at observatório nacional in 1997-1998. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, EDP Sciences, v. 135, n. 2, p. 227–229, 1999.

JSOC. *Joint Science Operations Center (JSOC)*. 2021. Disponível em: <http://jsoc.stanford.edu/>. Acesso em: 11 Jan. 2021.

JSOC. *JSOC Data Explore Info and Export*. 2021. Disponível em: <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>. Acesso em: 11 Jan. 2021.

KILCIK, A. et al. Solar radius determination from total solar eclipse observations on 29 march 2006. *Solar Physics*, Springer, v. 257, n. 2, p. 237–250, 2009.

KILIC, H.; GOLBASI, O.; CHOLLET, F. Measurements of the solar radius in antalya between 2001–2003. *Solar Physics*, Springer, v. 229, n. 1, p. 5–12, 2005.

- KIPPENHAHN, R.; WEIGERT, A.; WEISS, A. *Stellar structure and evolution*. [S.l.]: Springer, 1990.
- KUBO, Y. Position and radius of the sun determined by solar eclipses in combination with lunar occultations. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 45, p. 819–829, 1993.
- KUHN, J. et al. Precision solar astrometry from soho/mdi. In: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. *Symposium-International Astronomical Union*. [S.l.], 1997. v. 181, p. 103–110.
- KUHN, J. et al. The precise solar shape and its variability. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 337, n. 6102, p. 1638–1640, 2012.
- LACLARE, F. et al. Measurements and variations of the solar diameter. *Solar Physics*, Springer, v. 166, n. 2, p. 211–229, 1996.
- LAMY, P. et al. A novel technique for measuring the solar radius from eclipse light curves—results for 2010, 2012, 2013, and 2015. *Solar Physics*, Springer, v. 290, n. 10, p. 2617–2648, 2015.
- MEFTAH, M. et al. Solar radius determined from picard/sodism observations and extremely weak wavelength dependence in the visible and the near-infrared. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 616, p. A64, 2018.
- MEFTAH, M. et al. The plate scale of the sodism instrument and the determination of the solar radius at 607.1 nm. *Solar Physics*, Springer, v. 289, n. 1, p. 1–10, 2014.
- MEFTAH, M. et al. Picard sol mission, a ground-based facility for long-term solar radius measurement. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*. [S.l.], 2012. v. 8446, p. 844676.
- NOEL, F. Visual and ccd astrolabe observations of the solar radius. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 374, n. 2, p. 697–702, 2001.
- PAP, J. et al. On the relation between total irradiance and radius variations. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 372, n. 3, p. 1005–1018, 2001.
- PARKINSON, J. H.; MORRISON, L. V.; STEPHENSON, F. R. The constancy of the solar diameter over the past 250 years. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 288, n. 5791, p. 548–551, 1980.
- PESNELL, W. D.; THOMPSON, B. J.; CHAMBERLIN, P. The solar dynamics observatory (sdo). In: *The Solar Dynamics Observatory*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 3–15.
- PULIAEV, S. et al. Solar diameter observations at observatório nacional in 1998-1999. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, EDP Sciences, v. 143, n. 2, p. 265–267, 2000.
- RAPONI, A. et al. The measurement of solar diameter and limb darkening function with the eclipse observations. *Solar Physics*, Springer, v. 278, n. 2, p. 269–283, 2012.

- RIBES, E. et al. The variability of the solar diameter. In: *The sun in time*. [S.l.: s.n.], 1991. p. 59–97.
- SANCHEZ, M. et al. L’astrolabe du roa. observations du soleil en 1992. observations of the sun at the roa astrolabe in 1992. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 110, p. 351, 1995.
- SAWILOWSKY, S. S. Fermat, schubert, einstein, and behrens-fisher: The probable difference between two means when $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, v. 1, n. 2, p. 55, 2002.
- SCHERRER, P. H. et al. The solar oscillations investigation—michelson doppler imager. In: *The SOHO Mission*. [S.l.]: Springer, 1995. p. 129–188.
- SCHERRER, P. H. et al. The helioseismic and magnetic imager (hmi) investigation for the solar dynamics observatory (sdo). *Solar Physics*, Springer, v. 275, n. 1-2, p. 207–227, 2012.
- SCHOU, J. et al. Design and ground calibration of the helioseismic and magnetic imager (hmi) instrument on the solar dynamics observatory (sdo). *Solar Physics*, Springer, v. 275, n. 1-2, p. 229–259, 2012.
- SHAPIRO, I. I. Is the sun shrinking? *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 208, n. 4439, p. 51–53, 1980.
- SIGISMONDI, C. Guidelines for measuring solar radius with baily beads analysis. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, Springer, v. 52, n. 11, p. 1773, 2009.
- SIGISMONDI, C.; MORCOS, A. Long term variations of solar radius. *General Relativity and Gravitation*, Springer, v. 43, n. 4, p. 1197–1202, 2011.
- SOFIA, S. et al. Solar radius change between 1925 and 1979. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 304, n. 5926, p. 522–526, 1983.
- STANFORD Computer Optics, Different kinds of CCD sensors. 2021. Disponível em: <https://stanfordcomputeroptics.com/technology/video-unit/ccd-sensor.html>. Acesso em: 23 Jul. 2021.
- STIX, M. *The sun: an introduction*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- SVESHNIKOV, M. Solar-radius variations from transits of mercury across the solar disk. *Astronomy Letters*, Springer, v. 28, n. 2, p. 115–120, 2002.
- THUILLIER, G.; SOFIA, S.; HABERREITER, M. Past, present and future measurements of the solar diameter. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 35, n. 3, p. 329–340, 2005.
- THUILLIER, G. et al. Solar disc radius determined from observations made during eclipses with bolometric and photometric instruments on board the picard satellite. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 603, p. A28, 2017.
- UNNO, W. Line formation of a normal zeeman triplet. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 8, p. 108, 1956.

VAQUERO, J. et al. Monitoring the solar radius from the royal observatory of the spanish navy since 1773. *Solar Physics*, Springer, v. 291, n. 6, p. 1599–1612, 2016.

WACHTER, R. et al. Image quality of the helioseismic and magnetic imager. *Solar Phys*, 2010.

WILLSON, R.; HUDSON, H. A solar cycle of measured and modeled total irradiance. *Nature*, v. 351, p. 42–44, 1991.

APÊNDICE A – ESQUEMA DE NOMENCLATURA DAS MANIPULAÇÕES DOS DADOS UTILIZADOS

Tabela 9 – Vetores utilizadas nas análises neste trabalho, suas descrições e manipulações.

(Continua)

VETORES	DESCRIÇÃO/MANIPULAÇÃO
T_OBS	anoDec Temperaturas
T_OBS Raio	anoDec
INDEX_0	onde FID = 10000
INDEX_1	onde FID = 10001
INDEX_4	onde FID = 10004
INDEX_5	onde FID = 10005
INDEX_6	onde FID = 10006
INDEX_7	onde FID = 10007
INDEX_8	onde FID = 10008
INDEX_9	onde FID = 10009
RAIO_0	RAIOLFS[INDEX_0]
RAIO_1	RAIOLFS[INDEX_1]
RAIO_4	RAIOLFS[INDEX_4]
RAIO_5	RAIOLFS[INDEX_5]
RAIO_6	RAIOLFS[INDEX_6]
RAIO_7	RAIOLFS[INDEX_7]
RAIO_8	RAIOLFS[INDEX_8]
RAIO_9	RAIOLFS[INDEX_9]
TEMPO_0	anoDec[INDEX_0]
TEMPO_1	anoDec[INDEX_1]
TEMPO_4	anoDec[INDEX_4]
TEMPO_5	anoDec[INDEX_5]
TEMPO_6	anoDec[INDEX_6]
TEMPO_7	anoDec[INDEX_7]
TEMPO_8	anoDec[INDEX_8]
TEMPO_9	anoDec[INDEX_9]
intRAIO_1	INTERPOL(RAIO0_1,TEMPO_1,TEMPO_0)
intRAIO_5	INTERPOL(RAIO0_4,TEMPO_4,TEMPO_5)
intRAIO_7	INTERPOL(RAIO0_7,TEMPO_7,TEMPO_6)
intRAIO_9	INTERPOL(RAIO0_9,TEMPO_9,TEMPO_8)
RAIO_I0	$(RAIO_0 + intRAIO_1)/2$

Tabela 9 – Vetores utilizados nesse trabalho, suas descrições e manipulações.
(Continuação)

VETORES	DESCRIÇÃO/MANIPULAÇÃO
RAIO_I4	$(\text{RAIO_4} + \text{intRAIO_5})/2$
RAIO_I6	$(\text{RAIO_6} + \text{intRAIO_7})/2$
RAIO_I8	$(\text{RAIO_8} + \text{intRAIO_9})/2$
DIST_0	INTERPOL(DIST, anoDec, TEMPO_0)
DIST_1	INTERPOL(DIST, anoDec, TEMPO_1)
DIST_4	INTERPOL(DIST, anoDec, TEMPO_4)
DIST_5	INTERPOL(DIST, anoDec, TEMPO_5)
DIST_6	INTERPOL(DIST, anoDec, TEMPO_6)
DIST_7	INTERPOL(DIST, anoDec, TEMPO_7)
DIST_8	INTERPOL(DIST, anoDec, TEMPO_8)
DIST_9	INTERPOL(DIST, anoDec, TEMPO_9)
CMEAN_0	CMEAN[index_0]
T1	anoDecTemperaturas
T20	anoDec
indxT1	onde $T1 < 2019$ e $T1 > 2013.5$
indxT20	onde $T20 < 2019$ e $T20 > 2013.5$
T1indx	$T1[\text{indxT1}]$
T20indx	$\text{TEMPO_0}[\text{indxT20}]$
CAM_0	CAMERA[index_0]
CAM_01	onde $\text{CAM_0} = 1$
CAM_02	onde $\text{CAM_0} = 2$
CAM_0_T0	INTERPOL(CAM_0, TEMPO_0, T20indx)
CAM01T0	onde $\text{CAM_0_T0} = 1$
CAM02T0	onde $\text{CAM_0_T0} = 2$
t2CAM01	$T20\text{indx}[\text{CAM01T0}]$
t2CAM02	$T20\text{indx}[\text{CAM02T0}]$
tempoCAM01	$\text{TEMPO_0}[\text{CAM01}]$
tempoCAM02	$\text{TEMPO_0}[\text{CAM02}]$
CMEANInter_0	INTERPOL(CMEAN_0, TEMPO_0, T20indx)
dist_T0	INTERPOL(dist_0, TEMPO_0, T20indx)
t2CAM01	$T20\text{indx}[\text{CAM01T0}]$
t2CAM02	$T20\text{indx}[\text{CAM02T0}]$
tempoCAM01	$\text{TEMPO_0}[\text{CAM_01}]$
tempoCAM02	$\text{TEMPO_0}[\text{CAM_02}]$
CMEANCAM01	CMEANInter_0[CAM01T0]

Tabela 9 – Vetores utilizados nesse trabalho, suas descrições e manipulações.
(Continuação)

VETORES	DESCRIÇÃO/MANIPULAÇÃO
CMEANCAM02	CMEANInter_0[CAM02T0]
dist_0CAM01	dist_T0[CAM01T0]
dist_0CAM02	dist_T0[CAM02T0]
CmCAM01	CMEANCAM01/média(CMEANCAM01)
CmCAM02	CMEANCAM02/média(CMEANCAM02)
raioT0	INTERPOL(RAIO_0,TEMPO_0, T20indx)
RaioT0CAM01	raioT0[CAM01T0]
RaioT0CAM02	raioT0[CAM02T0]
raio2020	(raioT0/2)*distT0/média(dist0)
raio2020CAM01	(raioT0CAM01/2)*dist_0CAM01/media(dist_0)
raio2020CAM02	(raioT0CAM02/2)*dist_0CAM02/media(dist_0)
T01_FWMR1_MEAN	T1 = Anel de montagem 1
T02_FWMR2_MEAN	T2 = Anel de montagem 2
T03_PRLNS_MEAN	T3 = Lentes primárias
T04_SCLNS_MEAN	T4 = lentes secundárias
T05_TLFW1_MEAN	T5 = Tubo telescópio frontal
T06_TLAFT_MEAN	T6 = Tubo telescópio traseiro
T07_FDMCH_MEAN	T7 = Mecanismo de porta
T08_PSASM_MEAN	T8 = Junções
T09_TLMIR_MEAN	T9 = Espelho
T10_LTELC_MEAN	T10 = Caixa elétrica externa
T11_OVNCT_MEAN	T11 = Caixa elétrica forno filtros
T12_OVNLY_MEAN	T12 = Forno de filtros LYOT
T13_OVNWM_MEAN	T13 = Forno de filtros WBM
T14_OVNNM_MEAN	T14 = Forno de filtros NBM
T15_OVNPA_MEAN	T15 = Forno de filtros PA
T16_CM2FM_MEAN	T16 = Camera 2 FLDMRR
T17_CM1FM_MEAN	T17 = Camera 1 FLDMRR
T19_OPFRT_MEAN	T19 = Optica dentro frontal
T21_OPCEB_MEAN	T21 = Optica próximo à Caixa elétrica
T22_OPOVN_MEAN	T22 = Optica próximo ao fornos
T23_OPAFB_MEAN	T23 = Banco óptico traseiro
T24_HRNS1_MEAN	T24 = Estrutura de montagem
T26_FRLEG_MEAN	T26 = Estrutura estabilidade frontal
T28_CEB2_MEAN	T28 = Caixa elétrica CAM 2

Tabela 9 – Vetores utilizados nesse trabalho, suas descrições e manipulações.
(Continuação)

VETORES	DESCRIÇÃO/MANIPULAÇÃO
T29_CEB1_MEAN	T29 = Caixa elétrica CAM 1
T30_HEBBP_MEAN	T30 = HEB_PRATO B
T31_HEBPC_MEAN	T31 = HEB_PWR_CNVR_PRI
T32_HEBRC_MEAN	T32 = HEB_PWR_CNVR_RED
T33_HEBPA_MEAN	T33 = HEB_RAD6000_CPU_A
T34_HEBPB_MEAN	T34 = HEB_RAD6000_CPU_B
T35_TLFW2_MEAN	T35 = Tubo telescópio dianteiro
T36_BDSMT_MEAN	T36 = Feixe BDS
T37_OPFWB_MEAN	T37 = Banco óptico dianteiro
T39_OPFWC_MEAN	T39 = Optica dianteiro CVR
T40_OPAFC_MEAN	T40 = Optica traseiro CVR
T47_OSCB_MEAN	T47 = OBC_OSC_B
T48_OSCA_MEAN	T48 = OBC_OSC_A
T201_1CCD1_MEAN	T201 = CEB1_CCD_TEMP1
T203_1CCD2_MEAN	T203 = CEB1_CCD_TEMP2
T203_1CEB_MEAN	T2032 = CEB1_PWB_TEMP
T202_2CCD1_MEAN	T202 = CEB2_CCD_TEMP1
T204_2CCD2_MEAN	T204 = CEB2_CCD_TEMP2
T206_2CEB_MEAN	T206 = CEB2_PWB_TEMP
TempIndx1	T01_FWMR1_MEAN[indxT1]
TempIndx2	T02_FWMR2_MEAN[indxT1]
TempIndx3	T03_PRLNS_MEAN[indxT1]
TempIndx4	T04_SCLNS_MEAN[indxT1]
TempIndx5	T05_TLFW1_MEAN[indxT1]
TempIndx6	T06_TLAFT_MEAN[indxT1]
TempIndx7	T07_FDMCH_MEAN[indxT1]
TempIndx8	T08_PSASM_MEAN[indxT1]
TempIndx9	T09_TLMIR_MEAN[indxT1]
TempIndx10	T10_LTELC_MEAN[indxT1]
TempIndx11	T11_OVNCT_MEAN[indxT1]
TempIndx12	T12_OVNLY_MEAN[indxT1]
TempIndx13	T13_OVNWM_MEAN[indxT1]
TempIndx14	T14_OVNNM_MEAN[indxT1]
TempIndx15	T15_OVNPA_MEAN[indxT1]
TempIndx16	T16_CM2FM_MEAN[indxT1]

Tabela 9 – Vetores utilizados nesse trabalho, suas descrições e manipulações.
(Continuação)

VETORES	DESCRIÇÃO/MANIPULAÇÃO
TempIndx17	T17_CM1FM_MEAN[indxT1]
TempIndx19	T19_OPFRT_MEAN[indxT1]
TempIndx21	T21_OPCEB_MEAN[indxT1]
TempIndx22	T22_OPOVN_MEAN[indxT1]
TempIndx23	T23_OPAFB_MEAN[indxT1]
TempIndx24	T24_HRNS1_MEAN[indxT1]
TempIndx25	T25_HRNS2_MEAN[indxT1]
TempIndx26	T26_FRLEG_MEAN[indxT1]
TempIndx27	T27_RRLEG_MEAN[indxT1]
TempIndx28	T28_CEB2_MEAN[indxT1]
TempIndx29	T29_CEB1_MEAN[indxT1]
TempIndx30	T30_HEBBP_MEAN[indxT1]
TempIndx31	T31_HEBPC_MEAN[indxT1]
TempIndx32	T32_HEBRC_MEAN[indxT1]
TempIndx33	T33_HEBPA_MEAN[indxT1]
TempIndx34	T34_HEBPB_MEAN[indxT1]
TempIndx35	T35_TLFW2_MEAN[indxT1]
TempIndx36	T36_BDSMT_MEAN[indxT1]
TempIndx37	T37_OPFWB_MEAN[indxT1]
TempIndx39	T39_OPFWC_MEAN[indxT1]
TempIndx40	T40_OPAFC_MEAN[indxT1]
TempIndx47	T47_OSCB_MEAN[indxT1]
TempIndx48	T48_OSCA_MEAN[indxT1]
TempIndx201	T201_1CCD1_MEAN[indxT1]
TempIndx203	T203_1CCD2_MEAN[indxT1]
TempIndx2203	T203_1CEB_MEAN[indxT1]
TempIndx202	T202_2CCD1_MEAN[indxT1]
TempIndx204	T204_2CCD2_MEAN[indxT1]
TempIndx206	T206_2CEB_MEAN[indxT1]
I0C1T1	INTERPOL(TempIndx1,T1indx,t2cam01)
I0C1T2	INTERPOL(TempIndx2,T1indx,t2cam01)
I0C1T3	INTERPOL(TempIndx3,T1indx,t2cam01)
I0C1T4	INTERPOL(TempIndx4,T1indx,t2cam01)
I0C1T5	INTERPOL(TempIndx5,T1indx,t2cam01)
I0C1T6	INTERPOL(TempIndx6,T1indx,t2cam01)

Tabela 9 – Vetores utilizados nesse trabalho, suas descrições e manipulações.
(Continuação)

VETORES	DESCRIÇÃO/MANIPULAÇÃO
I0C1T7	INTERPOL(TempIndx7,T1indx,t2cam01)
I0C1T8	INTERPOL(TempIndx8,T1indx,t2cam01)
I0C1T9	INTERPOL(TempIndx9,T1indx,t2cam01)
I0C1T10	INTERPOL(TempIndx10,T1indx,t2cam01)
I0C1T11	INTERPOL(TempIndx11,T1indx,t2cam01)
I0C1T12	INTERPOL(TempIndx12,T1indx,t2cam01)
I0C1T13	INTERPOL(TempIndx13,T1indx,t2cam01)
I0C1T14	INTERPOL(TempIndx14,T1indx,t2cam01)
I0C1T15	INTERPOL(TempIndx15,T1indx,t2cam01)
I0C1T16	INTERPOL(TempIndx16,T1indx,t2cam01)
I0C1T17	INTERPOL(TempIndx17,T1indx,t2cam01)
I0C1T19	INTERPOL(TempIndx19,T1indx,t2cam01)
I0C1T21	INTERPOL(TempIndx21,T1indx,t2cam01)
I0C1T22	INTERPOL(TempIndx22,T1indx,t2cam01)
I0C1T23	INTERPOL(TempIndx23,T1indx,t2cam01)
I0C1T24	INTERPOL(TempIndx24,T1indx,t2cam01)
I0C1T25	INTERPOL(TempIndx25,T1indx,t2cam01)
I0C1T26	INTERPOL(TempIndx26,T1indx,t2cam01)
I0C1T27	INTERPOL(TempIndx27,T1indx,t2cam01)
I0C1T28	INTERPOL(TempIndx28,T1indx,t2cam01)
I0C1T29	INTERPOL(TempIndx29,T1indx,t2cam01)
I0C1T30	INTERPOL(TempIndx30,T1indx,t2cam01)
I0C1T31	INTERPOL(TempIndx31,T1indx,t2cam01)
I0C1T32	INTERPOL(TempIndx32,T1indx,t2cam01)
I0C1T33	INTERPOL(TempIndx33,T1indx,t2cam01)
I0C1T34	INTERPOL(TempIndx34,T1indx,t2cam01)
I0C1T35	INTERPOL(TempIndx35,T1indx,t2cam01)
I0C1T36	INTERPOL(TempIndx36,T1indx,t2cam01)
I0C1T37	INTERPOL(TempIndx37,T1indx,t2cam01)
I0C1T39	INTERPOL(TempIndx39,T1indx,t2cam01)
I0C1T40	INTERPOL(TempIndx40,T1indx,t2cam01)
I0C1T47	INTERPOL(TempIndx47,T1indx,t2cam01)
I0C1T48	INTERPOL(TempIndx48,T1indx,t2cam01)
I0C1T201	INTERPOL(TempIndx201,T1indx,t2cam01)
I0C1T202	INTERPOL(TempIndx202,T1indx,t2cam01)

Tabela 9 – Vetores utilizados nesse trabalho, suas descrições e manipulações.
(Continuação)

VETORES	DESCRIÇÃO/MANIPULAÇÃO
I0C1T203	INTERPOL(TempIndx203,T1indx,t2cam01)
I0C1T2203	INTERPOL(TempIndx2203,T1indx,t2cam01)
I0C1T204	INTERPOL(TempIndx204,T1indx,t2cam01)
I0C1T206	INTERPOL(TempIndx206,T1indx,t2cam01)
I0C2T1	INTERPOL(TempIndx1,T1indx,t2cam02)
I0C2T2	INTERPOL(TempIndx2,T1indx,t2cam02)
I0C2T3	INTERPOL(TempIndx3,T1indx,t2cam02)
I0C2T4	INTERPOL(TempIndx4,T1indx,t2cam02)
I0C2T5	INTERPOL(TempIndx5,T1indx,t2cam02)
I0C2T6	INTERPOL(TempIndx6,T1indx,t2cam02)
I0C2T7	INTERPOL(TempIndx7,T1indx,t2cam02)
I0C2T8	INTERPOL(TempIndx8,T1indx,t2cam02)
I0C2T9	INTERPOL(TempIndx9,T1indx,t2cam02)
I0C2T10	INTERPOL(TempIndx10,T1indx,t2cam02)
I0C2T11	INTERPOL(TempIndx11,T1indx,t2cam02)
I0C2T12	INTERPOL(TempIndx12,T1indx,t2cam02)
I0C2T13	INTERPOL(TempIndx13,T1indx,t2cam02)
I0C2T14	INTERPOL(TempIndx14,T1indx,t2cam02)
I0C2T15	INTERPOL(TempIndx15,T1indx,t2cam02)
I0C2T16	INTERPOL(TempIndx16,T1indx,t2cam02)
I0C2T17	INTERPOL(TempIndx17,T1indx,t2cam02)
I0C2T19	INTERPOL(TempIndx19,T1indx,t2cam02)
I0C2T21	INTERPOL(TempIndx21,T1indx,t2cam02)
I0C2T22	INTERPOL(TempIndx22,T1indx,t2cam02)
I0C2T23	INTERPOL(TempIndx23,T1indx,t2cam02)
I0C2T24	INTERPOL(TempIndx24,T1indx,t2cam02)
I0C2T25	INTERPOL(TempIndx25,T1indx,t2cam02)
I0C2T26	INTERPOL(TempIndx26,T1indx,t2cam02)
I0C2T27	INTERPOL(TempIndx27,T1indx,t2cam02)
I0C2T28	INTERPOL(TempIndx28,T1indx,t2cam02)
I0C2T29	INTERPOL(TempIndx29,T1indx,t2cam02)
I0C2T30	INTERPOL(TempIndx30,T1indx,t2cam02)
I0C2T31	INTERPOL(TempIndx31,T1indx,t2cam02)
I0C2T32	INTERPOL(TempIndx32,T1indx,t2cam02)
I0C2T33	INTERPOL(TempIndx33,T1indx,t2cam02)

Tabela 9 – Vetores utilizados nesse trabalho, suas descrições e manipulações.
(Continuação)

VETORES	DESCRIÇÃO/MANIPULAÇÃO
I0C2T34	INTERPOL(TempIndx34,T1indx,t2cam02)
I0C2T35	INTERPOL(TempIndx35,T1indx,t2cam02)
I0C2T36	INTERPOL(TempIndx36,T1indx,t2cam02)
I0C2T37	INTERPOL(TempIndx37,T1indx,t2cam02)
I0C2T39	INTERPOL(TempIndx39,T1indx,t2cam02)
I0C2T40	INTERPOL(TempIndx40,T1indx,t2cam02)
I0C2T47	INTERPOL(TempIndx47,T1indx,t2cam02)
I0C2T48	INTERPOL(TempIndx48,T1indx,t2cam02)
I0C2T201	INTERPOL(TempIndx201,T1indx,t2cam02)
I0C2T202	INTERPOL(TempIndx202,T1indx,t2cam02)
I0C2T203	INTERPOL(TempIndx203,T1indx,t2cam02)
I0C2T2203	INTERPOL(TempIndx2203,T1indx,t2cam02)
I0C2T204	INTERPOL(TempIndx204,T1indx,t2cam02)
I0C2T206	INTERPOL(TempIndx206,T1indx,t2cam02)

Fonte: a autora.