

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

ÁREA DE FÍSICA APLICADA

**Insolação em Planetas Terrestres Síncronos
e Assíncronos em Sistemas Multiplanetários**

Lariele Fernanda Spatti

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
RIO CLARO**

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Lariele Fernanda Spatti

**Insolação em planetas terrestres síncronos e assíncronos
em sistemas multiplanetários**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Fi-
lho", como parte dos requisitos para a ob-
tenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Callegari Jr

Rio Claro - SP
2026

S738i

Spatti, Larielle Fernanda

Insolação em planetas terrestres síncronos e assíncronos em sistemas multiplanetários / Larielle Fernanda Spatti. -- Rio Claro, 2026
76 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Nelson Callegari Jr

1. Insolação Planetária. 2. Sincronismo Spin-Orbita. 3.
Habitabilidade Planetária. 4. Exoplanetas. I. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Lariele Fernanda Spatti

**Insolação em planetas terrestres síncronos e assíncronos
em sistemas multiplanetários**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Fi-
lho", como parte dos requisitos para a ob-
tenção do título de Mestre em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Nelson Callegari Jr
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Othon Cabo Winter
FEG/UNESP/Guaratinguetá (SP)

Dr. Raphael Alves Silva
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Conceito: Aprovado

Rio Claro (SP), 15 de Dezembro de 2025.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram; se cheguei até aqui, foi devido ao apoio deles mais do que tudo. Ao meu orientador, gostaria de agradecer pela paciência e disponibilidade em me ajudar a desenvolver essa pesquisa. Aos técnicos do DEMAC, Orlando e Jorge, agradeço pela paciência sempre que tive algum problema com as máquinas do departamento, às minhas amigas Mayla e Maju por todo o apoio e ajuda, assim como pelos momentos de descontração. Agradeço às empresas de fomento, em especial à CAPES, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa. Por fim, agradeço a todas as pessoas que foram até o laboratório no DEMAC em algum momento nesses dois anos e conversaram comigo; vocês foram de muita ajuda.

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

Resumo

As forças decorrentes da atração gravitacional mútua entre os planetas têm uma grande influência no clima da Terra e, portanto, em sua habitabilidade. Um exemplo desse processo é a variação da excentricidade orbital, que contribui de forma significativa para a ocorrência de períodos de glaciação na Terra em escalas de tempo regulares. Usando o pacote de software Mercury e a teoria planetária secular, pretendemos encontrar ciclos de precessão e excentricidade semelhantes aos conhecidos na Terra para exoplanetas do tipo super-Terra presentes em sistemas multiplanetários. Estendemos a formulação para estimar a insolação proposta por Dobrovolskis et al. (2007) no caso de um planeta síncrono e assíncrono perturbado por um companheiro. Neste trabalho, determinamos a insolação recebida por um exoplaneta orbitando em torno de estrelas do tipo G, M e K pertencentes a sistemas multiplanetários. Os resultados mostram que, no caso síncrono, a insolação permanece aproximadamente constante, variando apenas devido às oscilações da excentricidade e às perturbações seculares. Já no caso assíncrono, observam-se variações periódicas significativas da insolação, caracterizadas pelos ciclos orbitais e pela evolução do ângulo horário. Planetas muito próximos de suas estrelas, como WASP-47e, HD 219134b e 55 Cancri-e, exibem insolação extrema, desfavorável à presença de água líquida. Em contraste, planetas como K2-18b, TRAPPIST-1d, e, f e LP 791-18d apresentam valores mais moderados. Em TRAPPIST-1f, identificamos variações da insolação correlacionadas a picos de excentricidade, sugerindo a presença de ciclos análogos aos ciclos de Milankovitch.

Palavras-chave: Insolação, Sistemas Multiplanetários, Sincronismo Spin-órbita, Dinâmica Rotacional

Abstract

The forces resulting from mutual gravitational attraction between planets have a major influence on Earth's climate and, therefore, on its habitability. An example of this process is the variation in orbital eccentricity, which contributes significantly to the occurrence of glaciation periods on Earth at regular time scales. Using the Mercury software package and secular planetary theory, we aim to find precession and eccentricity cycles similar to those known on Earth for Super-Earth-type exoplanets present in multiplanetary systems. We extend the formulation for estimating insolation proposed by Dobrovolskis et al. (2007) in the case of a synchronous and asynchronous planet perturbed by a companion. In this work, we determine the insolation received by an exoplanet orbiting around G, M, and K-type stars belonging to multiplanetary systems. The results show that, in the synchronous case, insolation remains approximately constant, varying only due to eccentricity oscillations and secular perturbations. In the asynchronous case, significant periodic variations in insolation are observed, characterized by orbital cycles and the evolution of the hour angle. Planets very close to their stars, such as WASP-47e, HD 219134b, and 55 Cancri-e, exhibit extreme insolation, which is unfavorable to the presence of liquid water. In contrast, planets such as K2-18b, TRAPPIST-1d, e, f, and LP 791-18d have more moderate values. On TRAPPIST-1f, we identified variations in insolation correlated with peaks in eccentricity, suggesting the presence of cycles analogous to Milankovitch cycles.

Keywords: Insolation, Multiplanetary Systems, Spin-Orbit Synchronism, Rotational Dynamics

Lista de Tabelas

4.1	Valores de insolação para o caso síncrono ($S = S^*$)	28
4.2	Dados do sistema K2-18	31
4.3	Massa e elementos orbitais para o sistema K2-18	32
4.4	Dados do sistema WASP-47	36
4.5	Massa e elementos orbitais para o sistema WASP-47e	37
4.6	Dados do sistema 55 Cancri	41
4.7	Massa e elementos orbitais para o sistema 55 Cancri-e	42
4.8	Dados do sistema HD 219134	46
4.9	Massa e elementos orbitais para o sistema HD 219134 b	47
4.10	Dados do sistema TRAPPIST-1	51
4.11	Massa e elementos orbitais para o sistema TRAPPIST-1d	53
4.12	Massa e elementos orbitais para o sistema TRAPPIST-1e	56
4.13	Massa e elementos orbitais para o sistema TRAPPIST-1f	60
4.14	Dados do sistema LP 791-18	64
4.15	Massa e elementos orbitais para o sistema LP 791-18	65

Lista de Figuras

- 3.1 A figura mostra o arquivo do integrador Mercury que precisa ser preenchido com os dados orbitais dos exoplanetas pertencentes ao sistema. Os dados a serem preenchidos são a semieixo maior, e excentricidade, i inclinação, w argumento do pericentro, Ω nodo ascendente e M anomalia média. Os dados foram obtidos do site Nasa Exoplanet Archive [<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]. 20
- 3.2 (a) Ilustração mostrando a posição da estrela em relação a um observador no equador. Z é o zênite, h é o ângulo horário, ζ o ângulo medido entre a posição da estrela no céu e o zênite e λ é a latitude da estrela em relação ao equador. (b) Triângulo esférico formado pelo zênite, a estrela e um ponto de interseção entre o equador e o meridiano da estrela. (c) Ilustração mostrando o ângulo horário da estrela em relação ao meridiano local. $f(t)$ representa a anomalia verdadeira e ϖ é a longitude do pericentro. Utilizamos a condição $\omega t - f(t) - \varpi = 0$, onde ω é a velocidade angular de rotação do planeta, para descrever o sincronismo spin-órbita, dessa forma, o ângulo de rotação do corpo, $\theta(t) = \omega t$, está sempre alinhado com a longitude verdadeira, $f(t) + \varpi$, medida a partir de um referencial inercial γ . A linha laranja tracejada representa o meridiano da estrela, enquanto a linha tracejada azul representa o meridiano de referência no qual está definida a longitude do pericentro, ϖ 22
- 4.1 Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta K2-18b no regime de rotação síncrona 1:1. (a), (b) e (c) Variação da insolação em K2-18b para os casos em que a obliquidade é de 0° , 20° e 45° respectivamente, (d) ângulo horário $h = \omega t - f(t) - \varpi - \phi = 0$. (e) $\cos(h)$. (f) Evolução da excentricidade orbital do K2-18b. As curvas preta e azul representam os resultados obtidos pelo software Mercury e pela teoria secular, respectivamente. 29
- 4.2 Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta K2-18b no regime de rotação síncrona 1:1. (a) e (b) Variação da insolação em K2-18b para os casos em que ϕ é igual a 0° e 45° respectivamente. 30

4.3	Representação do sistema planetário K2-18 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas dos planetas estão apresentadas em ordem crescente de distância à estrela, sendo K2-18c representado em roxo e K2-18b em preto. Os círculos em verde claro e verde escuro indicam, respectivamente, os limites interno e externo da zona habitável, definidos segundo os critérios de Recent Venus e Early Mars.	32
4.4	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta K2-18b no regime de rotação não síncrona 2:1. (a), (b) e (c) Variação da insolação em K2-18b para os casos em que a obliquidade é de 0°, 20° e 45° respectivamente, (d) evolução do ângulo horário $h = \omega t - f(t) - \varpi - \phi$, com $\phi = 0$. (e) Variação temporal de $\cos(h)$. (f) Evolução da excentricidade orbital do K2-18b. As curvas preta e azul representam os resultados obtidos pelo software Mercury e pela teoria secular, respectivamente. (g) Diferença entre as longitudes do pericentro entre os exoplanetas K2-18c e K2-18b ($\Delta\varpi$).	34
4.5	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta K2-18b no regime de rotação não síncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]	35
4.6	Representação do sistema planetário WASP-47 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas de WASP-47e (rosa), WASP-47b (vermelho), WASP-47d (azul) e WASP-47c (preto) são mostradas, juntamente com os limites interno (verde claro) e externo (verde escuro) da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars.	37
4.7	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta WASP-47e no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]	39
4.8	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta WASP-47e no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]	40
4.9	Representação do sistema planetário 55 Cancri em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas de 55 Cancri e (preto), 55 Cancri b (amarelo), 55 Cancri c (vermelho), 55 Cancri f (roxo) e 55 Cancri d (azul) são mostradas, juntamente com os limites interno (verde claro) e externo (verde escuro) da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars.	42
4.10	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta 55 Cancri-e no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]	44
4.11	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta 55 Cancri-e no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]	45

4.12	Representação do sistema planetário HD 219134 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas de HD 219134b (preto), HD 219134c (rosa), HD 219134f (azul), HD 219134d (vermelho), HD 219134g (amarelo) e HD 219134h (marrom) são mostradas, juntamente com os limites interno (verde claro) e externo (verde escuro) da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars.	47
4.13	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta HD 219134b no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]	49
4.14	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta HD 219134b no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]	50
4.15	Representação do sistema planetário TRAPPIST-1 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas de TRAPPIST-1 b (preto), TRAPPIST-1 c (vermelho), TRAPPIST-1 d (azul), TRAPPIST-1 e (amarelo), TRAPPIST-1 f (marrom), TRAPPIST-1 g (roxo) e TRAPPIST-1 h (laranja) são mostradas, juntamente com os limites interno (verde claro) e externo (verde escuro) da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars.	52
4.16	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1d no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]	54
4.17	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1d no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]	55
4.18	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1e no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]	58
4.19	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1e no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]	59
4.20	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1f no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]	62
4.21	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1f no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]	63
4.22	Representação do sistema planetário LP 971-18, assim como de sua zona habitável	64
4.24	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta LP791-18d no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]	66

4.23	Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta LP 791-18d no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]	67
------	---	----

Sumário

1	Introdução	14
2	Objetivo	19
3	Metodologia	20
3.1	Simulações numéricas (Mercury)	20
3.2	Equações da Insolação	21
3.3	Teoria secular planetária	24
4	Resultados	27
4.1	Caso Síncrono	27
4.1.1	$\phi \neq 0$	30
4.2	Caso Assíncrono	31
4.2.1	K2-18b	31
4.2.2	WASP-47e	36
4.2.3	55 Cancri-e	41
4.2.4	HD 219134b	46
4.2.5	TRAPPIST-1d	51
4.2.6	TRAPPIST-1e	56
4.2.7	TRAPPIST-1f	60
4.2.8	LP 791-18d	64
5	Conclusão	68
	Referências	71

Capítulo 1

Introdução

A influência das interações gravitacionais entre os corpos celestes do Sistema Solar tem se mostrado fundamental para compreender não apenas a dinâmica orbital dos planetas, mas também os processos que moldam o clima terrestre ao longo de escalas de tempo geológicas. Em particular, a atração gravitacional entre os planetas gera perturbações que afetam diretamente os parâmetros orbitais da Terra, resultando em variações climáticas significativas que, por sua vez, impactam a habitabilidade do planeta. Um dos exemplos mais notórios dessa interação é a variação da excentricidade orbital da Terra, um dos fatores determinantes na ocorrência de períodos glaciais regulares, conforme descrito por Milutin Milankovitch em 1941 em sua teoria astronômica das Eras do Gelo [1].

A teoria de Milankovitch mostrou que os ciclos climáticos de longa duração são controlados por variações nos parâmetros orbitais e rotacionais da Terra, especificamente a excentricidade, a obliquidade e a precessão dos equinócios. Esses parâmetros determinam o padrão de insolação sazonal recebido pelo planeta, isto é, a quantidade de energia solar que incide sobre diferentes regiões do planeta ao longo do ano [2]. As oscilações nesses parâmetros não ocorrem de forma isolada, uma vez que são influenciadas pelas interações gravitacionais entre a Terra e outros corpos do Sistema Solar, especialmente os planetas mais massivos, como Júpiter e Saturno [3]. Dessa forma, a estrutura do Sistema Solar desempenha um papel central na determinação das condições climáticas que tornam possível a vida na Terra.

Ao se pensar em busca por vida fora do Sistema Solar, o conceito de Zona Habitável (ZH) tem se consolidado como um critério preliminar importante. A ZH é definida como a região ao redor de uma estrela na qual um planeta pode, em princípio, manter água líquida em sua superfície. [4]. No entanto, estar nesta zona não garante que o planeta seja habitável, visto que existem várias restrições climáticas que devem ser atendidas para que um planeta seja considerado habitável. Por exemplo, [5] estabelece que um planeta potencialmente habitável deve ter pelo menos 10% de sua superfície com uma temperatura que varie de 0°C a 30°C , e que os extremos de temperatura não podem ser menores que -10°C ou maiores

que 40°C . Por outro lado, [6], [7] e [8] afirmam que a presença de água em estado líquido é essencial, já que todos os organismos conhecidos necessitam de água para se desenvolver.

A delimitação da zona habitável adotada neste trabalho segue o modelo climático unidimensional proposto por Kopparapu et al. [9], no qual os limites da ZH são definidos a partir do fluxo estelar efetivo incidente sobre o planeta, S_{eff} , levando em consideração as propriedades atmosféricas do planeta e as características espectrais da estrela hospedeira. Nesse formalismo, a distância orbital correspondente a cada limite da zona habitável é calculada pela relação:

$$d = \sqrt{\frac{L^*/L_{\odot}}{S_{eff}}}, \quad (1.1)$$

em que L^* representa a luminosidade da estrela e $L_{\odot}$ a luminosidade do Sol. Os valores de fluxo estelar efetivo S_{eff} utilizados neste trabalho correspondem aos critérios empíricos de Recent Venus e Early Mars, que definem, respectivamente, a borda interna e a borda externa da zona habitável. O critério de Recent Venus está associado à menor distância na qual Vênus poderia ter mantido água líquida antes de sofrer um efeito estufa descontrolado, enquanto o critério de Early Mars representa a maior distância em que Marte pode ter sustentado água líquida em sua superfície no início de sua história geológica.

Entretanto, a presença de um planeta dentro da zona habitável não implica necessariamente a existência de água líquida em sua superfície. A zona habitável deve ser entendida como uma condição necessária, mas não suficiente, para a habitabilidade. Fatores como a composição da atmosfera, o albedo, e a atividade geológica influenciam diretamente a estabilidade térmica do planeta. Um exemplo clássico é Marte, que se encontra dentro da zona habitável do Sol, a mesma região que inclui a Terra. Apesar disso, Marte não apresenta água líquida em sua superfície atualmente, por causa da perda significativa da atmosfera ao longo de sua evolução. Esse exemplo mostra que a posição orbital por si só não garante condições favoráveis à vida.

A presença de água líquida em um planeta está intimamente ligada à sua pressão e temperatura. Para que essas variáveis se mantenham dentro de uma faixa adequada, mecanismos de regulação térmica são imprescindíveis, evitando que o planeta se torne muito quente ou muito frio. O efeito estufa e o albedo são os principais responsáveis por essa regulação de temperatura, e ambos variam de acordo com as características específicas do planeta. O albedo representa a fração da radiação solar refletida de volta ao espaço e é altamente sensível à cobertura de gelo, neve e nuvens [10][9], aumentando com a cobertura de gelo. Tal fenômeno resulta em uma diminuição da temperatura. Por outro lado, o efeito estufa atua na

direção oposta, elevando a temperatura à medida que gases na atmosfera retêm o calor proveniente da radiação solar. O balanço entre esses dois processos determina se um planeta mantém condições térmicas estáveis ou se caminha para estados extremos de congelamento ou superaquecimento.

Proposta por Dobrovolskis [11], a equação da insolação é fundamental para entender como a luz de uma estrela aquece a superfície de um exoplaneta, considerando fatores orbitais e rotacionais, e, conseqüentemente, influenciando seu clima e possível habitabilidade. Os exoplanetas pertencentes a sistemas multiplanetários podem ter uma dinâmica orbital complexa, pois as interações gravitacionais entre os planetas podem gerar variações significativas na quantidade de luz que recebem. A insolação em um ponto específico da superfície pode ser descrita pela equação $S = S^* \left[\frac{a}{r} \right]^2 \cos(h)$, em que h é o ângulo horário da estrela.

Variações na órbita do planeta, causadas pelas interações gravitacionais, influenciam o comportamento do ângulo horário h , e conseqüentemente a distribuição da insolação na superfície do planeta.

Para contornar as variações no ângulo horário identificadas na formulação de Dobrovolskis [11], o modelo foi expandido com a inclusão explícita do termo ϖ . Essa modificação garante que o deslocamento angular resultante do desalinhamento entre o periastro e o meridiano principal seja corretamente incorporado à equação da insolação, tornando o cálculo adequado a casos mais gerais.

A habitabilidade de um planeta depende não apenas da quantidade total de luz que recebe, mas também de como essa energia é distribuída espacial e temporalmente. Um planeta que se encontra na zona habitável de sua estrela, onde a água pode existir em estado líquido, pode ter seu potencial de suportar vida ampliado ou diminuído pela insolação recebida. Caso haja luz estelar excessiva, o planeta pode apresentar um efeito estufa descontrolado, enquanto luz estelar insuficiente pode condenar um mundo a um estado perpétuo de congelamento. Esse equilíbrio delicado mostra que mesmo pequenas variações orbitais, ao longo de milhões de anos, podem ter efeitos cumulativos profundos na evolução climática de um planeta.

Além disso, a configuração de um sistema multiplanetário tem grande influência na dinâmica de rotação dos planetas, isso porque planetas sincronizados, ou seja, que tem período de rotação igual ao período de translação, tem apenas um lado do planeta recebendo luz solar diretamente, essa configuração é particularmente comum entre os exoplanetas de período ultracurto, devido a intensa interação de maré com sua estrela hospedeira[12] . Dessa forma, caso não haja a redistribuição do calor dentro do planeta, o lado noturno, que não recebe luz diretamente, pode apresentar zonas frias, causando uma instabilidade na atmosfera do planeta [13].

Diante de tantas complicações, é evidente que uma variedade de fatores orbitais,

climáticos e físicos interagem para determinar a habitabilidade de um planeta, em vez de serem determinados por um único fator isolado. Compreender a interação entre esses fatores é essencial não apenas para entender a história climática da Terra, mas também para melhor caracterizar exoplanetas potencialmente habitáveis.

Os sistemas analisados neste trabalho contêm uma ampla variedade de tipos estelares e configurações orbitais, permitindo investigar como diferentes condições físicas e dinâmicas influenciam a insolação planetária. K2-18b, por exemplo, é uma super-Terra que orbita uma anã vermelha do tipo espectral M2.5V. Este exoplaneta é o mais conhecido do sistema por estar próximo a zona habitável de sua estrela, sendo um forte candidato na busca por vida fora da Terra. Seu tamanho e massa sugerem que este seja um planeta com a presença de uma atmosfera espessa e possivelmente de um manto rico em água [14].

WASP-47e faz parte de um sistema planetário complexo composto por quatro planetas que orbitam uma estrela do tipo G9V, semelhante ao Sol. Trata-se de um exoplaneta de período ultra curto, localizado extremamente próximo de sua estrela hospedeira. Essa proximidade faz com que o planeta receba uma insolação extrema, o que resulta em temperaturas superficiais extremamente elevadas.

55 Cancri-e é uma super-Terra rochosa localizada a apenas 12 pc da Terra, orbitando uma estrela do tipo G8V. É o planeta mais interno de um sistema que conta com outros cinco planetas. Observações indicam que 55 Cancri-e pode ter sua superfície coberta por lava [15], tornando-se um dos exemplos mais claros de planetas de superfície fundida. Seu estudo é relevante para compreender como a insolação intensa influencia o estado físico de planetas rochosos, além de permitir comparar a dinâmica orbital de sistemas que contêm gigantes gasosos com a de sistemas compostos apenas por planetas terrestres.

HD 219134b é um exoplaneta pertencente a um sistema planetário orbitando uma estrela do tipo espectral K3V, localizada a aproximadamente 6.4 pc de distância. O sistema HD 219134 é composto por múltiplos planetas, incluindo super-Terras e gigantes gasosos, o que o torna um exemplo notável de sistema multiplanetário compacto, já que dos seis planetas que orbitam a estrela hospedeira, apenas um deles, HD 219134h, tem órbita maior que a de Mercúrio. Apesar da alta intensidade de radiação, sua distância e excentricidade moderadas o diferenciam dos planetas de período ultra-curto, permitindo investigar como a insolação e as interações gravitacionais seculares entre os planetas do sistema influenciam a variação térmica e a estabilidade orbital em escalas de tempo prolongadas [16].

TRAPPIST-1d orbita uma anã vermelha do tipo M8V a aproximadamente 12 pc da Terra e está localizado na borda interna da zona habitável de seu sistema. O estudo de TRAPPIST-1d permite compreender como a combinação de sincronismo de rotação e perturbações seculares pode afetar a distribuição de energia sobre a

superfície, influenciando a possível presença de regiões estáveis para água líquida[17].

TRAPPIST-1e é considerado um dos candidatos mais promissores à habitabilidade no sistema TRAPPIST-1, situando-se no centro da zona habitável [18]. A análise de sua insolação, tanto em regimes síncronos quanto assíncronos, contribui para entender o papel da obliquidade e da rotação na manutenção do equilíbrio térmico em planetas de sistemas compactos orbitando anãs vermelhas.

TRAPPIST-1f também está localizado dentro da zona habitável do sistema. Embora receba menos energia estelar que TRAPPIST-1e, sua posição e parâmetros orbitais permitem avaliar os limites externos da habitabilidade em sistemas de anãs vermelhas [18]. TRAPPIST-1f apresenta interações gravitacionais notáveis com seus vizinhos, especialmente TRAPPIST-1c, o que causa pequenas variações na excentricidade e, conseqüentemente, na insolação ao longo do tempo. Essas flutuações podem gerar efeitos cíclicos de aquecimento e resfriamento, fornecendo um cenário ideal para investigar como a dinâmica orbital influencia a evolução climática e a estabilidade atmosférica em exoplanetas frios.

LP 791-18d orbita uma estrela do tipo M6V, localizada em um sistema multiplanetário relativamente próximo, cerca de 26 pc. As forças de maré atuantes podem gerar aquecimento interno significativo, semelhante ao observado na lua Io, possivelmente resultando em atividade vulcânica [19].

A comparação entre esses exoplanetas ajuda a entender como a dinâmica orbital e as características da estrela influenciam a quantidade de energia recebida e a estabilidade do clima em planetas fora do Sistema Solar.

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do estudo, assim como a contextualização do tema, especificando o problema da pesquisa. No Capítulo 2, apresentamos os objetivos de nosso estudo, tal como a justificativa da escolha do tema. No Capítulo 3, focamos na metodologia, exibindo as equações de Dobrovolskis, a teoria planetária secular e o software utilizado. No Capítulo 4, são apresentados os resultados para o caso síncrono e não síncrono, com a evolução dos parâmetros orbitais e climáticos dos exoplanetas analisados. Por fim, no Capítulo 5, apresentamos as conclusões.

Todas as simulações numéricas realizadas para a construção dos gráficos apresentados ao longo do texto foram computadas utilizando a linguagem de programação FORTRAN, em um ambiente Linux. As figuras foram geradas com o auxílio do software Grace.

Capítulo 2

Objetivo

Este trabalho tem como objetivo investigar a variação da insolação recebida por exoplanetas terrestres que orbitam estrelas do tipo G, M e K em sistemas multiplanetários. A escolha dessas classes de estrelas se justifica por sua relevância para os estudos de habitabilidade. Enquanto estrelas do tipo G, como o Sol, já são amplamente associadas a zonas habitáveis, as estrelas do tipo M e K vêm despertando interesse na astrobiologia por sua abundância na galáxia e pela maior probabilidade de hospedarem planetas terrestres em regiões propícias para o desenvolvimento e manutenção da vida como conhecemos[10].

Para isso, utilizamos a formulação proposta por Dobrovolskis et al. (2007) [11], que permite descrever quantitativamente a evolução da insolação planetária. A metodologia se baseia na combinação entre simulações numéricas realizadas com o software Mercury (Chambers, 2012)[20] e a aplicação da teoria secular planetária, o que possibilita investigar de forma detalhada as variações orbitais de longo período na insolação. A partir dessa abordagem, buscamos compreender como o movimento orbital pode influenciar a habitabilidade de exoplanetas terrestres, contribuindo não apenas com o campo da dinâmica orbital, mas também para discussões mais amplas sobre a potencial existência de ambientes favoráveis à vida em sistemas planetários além do sistema solar.

Capítulo 3

Metodologia

Utilizaremos o software Mercury [20] em conjunto com a teoria planetária secular [21] para determinar a dinâmica de exoplanetas em sistemas multiplanetários. Após o estudo da dinâmica desses sistemas, utilizaremos a equação para insolação proposta por Dobrovolskis em seu artigo "*Spin states and climates of eccentric exoplanets*" para determinar a insolação recebida pelo exoplaneta em diferentes pontos.

3.1 Simulações numéricas (Mercury)

Para investigar a evolução orbital dos exoplanetas estudados, foram realizadas simulações numéricas utilizando o software Mercury [20], muito utilizado em estudos de dinâmica planetária e estabilidade de sistemas multiplanetários. O Mercury se trata de um integrador de N corpos, permitindo analisar com precisão a variação dos elementos orbitais ao longo do tempo.

```
1) 0+ 06 Big-body initial data (WARNING: Do not delete this line!!)
2) Lines beginning with `)' are ignored.
3) -----
4 style (Cartesian, Asteroidal, Cometary) = Asteroidal
5 epoch (in days) = 0.000
6) -----d or D is not matter--0d0 is possible too
7)
8 k218b m=0.00002807d0 r=1.000 d=4.1100
9 0.1429d0 0.2d0 0.0d0 354.3d0 0.0d0 0.d0 0.D0 0.D0 0.D0
10)
11 k218c m=0.0000236d0 r=1.000 d=1.D0
12 0.06d0 0.47d0 0.0d0 0.0d0 0.d0 0.d0 0.D0 0.D0 0.D0
```

Figura 3.1: A figura mostra o arquivo do integrador Mercury que precisa ser preenchido com os dados orbitais dos exoplanetas pertencentes ao sistema. Os dados a serem preenchidos são a semieixo maior, e excentricidade, i inclinação, w argumento do pericentro, Ω nodo ascendente e M anomalia média. Os dados foram obtidos do site Nasa Exoplanet Archive [<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>].

Para cada sistema multiplanetário estudado (K2-18, Wasp-47, 55 Cancri, HD 219134 e Trappist-1), foram utilizados como entrada os elementos orbitais obtidos de observações astronômicas disponíveis no site NASA Exoplanet Archive [22]. O integrador numérico tem um arquivo que precisa ser preenchido com os dados orbitais dos exoplanetas pertencentes ao sistema para poder ser executado, mas por se tratarem de exoplanetas é muito difícil obter todos os dados necessários, dessa forma, esses arquivos foram preenchidos com os dados obtidos através do NASA Exoplanet Archive e os dados que não puderam ser encontrados foram preenchidos com zeros, como ilustrado na figura (3.1).

As massas dos planetas $m_{1,2}$ e da estrela central m_c foram expressas em unidades solares. Em cada caso, apenas os corpos que causavam as maiores variações na excentricidade do exoplaneta estudado foram considerados nas simulações, sendo definidos como perturbadores. Os dados obtidos através das simulações numéricas foram utilizados para o cálculo da insolação e, posteriormente, da teoria secular.

3.2 Equações da Insolação

A primeira etapa para determinar a insolação é calcular a constante extrassolar do planeta. Essa constante indica a quantidade de energia que o exoplaneta recebe de sua estrela hospedeira. Dobrovolskis [11] define a constante extrassolar como:

$$S^* = \frac{L^*}{4\pi a^2}, \quad (3.1)$$

onde L^* é a luminosidade da estrela e a é o semieixo maior. Uma vez que as órbitas planetárias são excêntricas, introduzimos a distância planeta-estrela $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ de modo que o fluxo estelar incidente S de uma estrela localizada no zênite é dado por:

$$S = S^* \left[\frac{a}{r} \right]^2. \quad (3.2)$$

Conforme nos afastamos do ponto subestelar, S varia segundo o argumento $\cos \zeta$, onde ζ é o ângulo da estrela em relação ao zênite local, ver figura [3.2a].

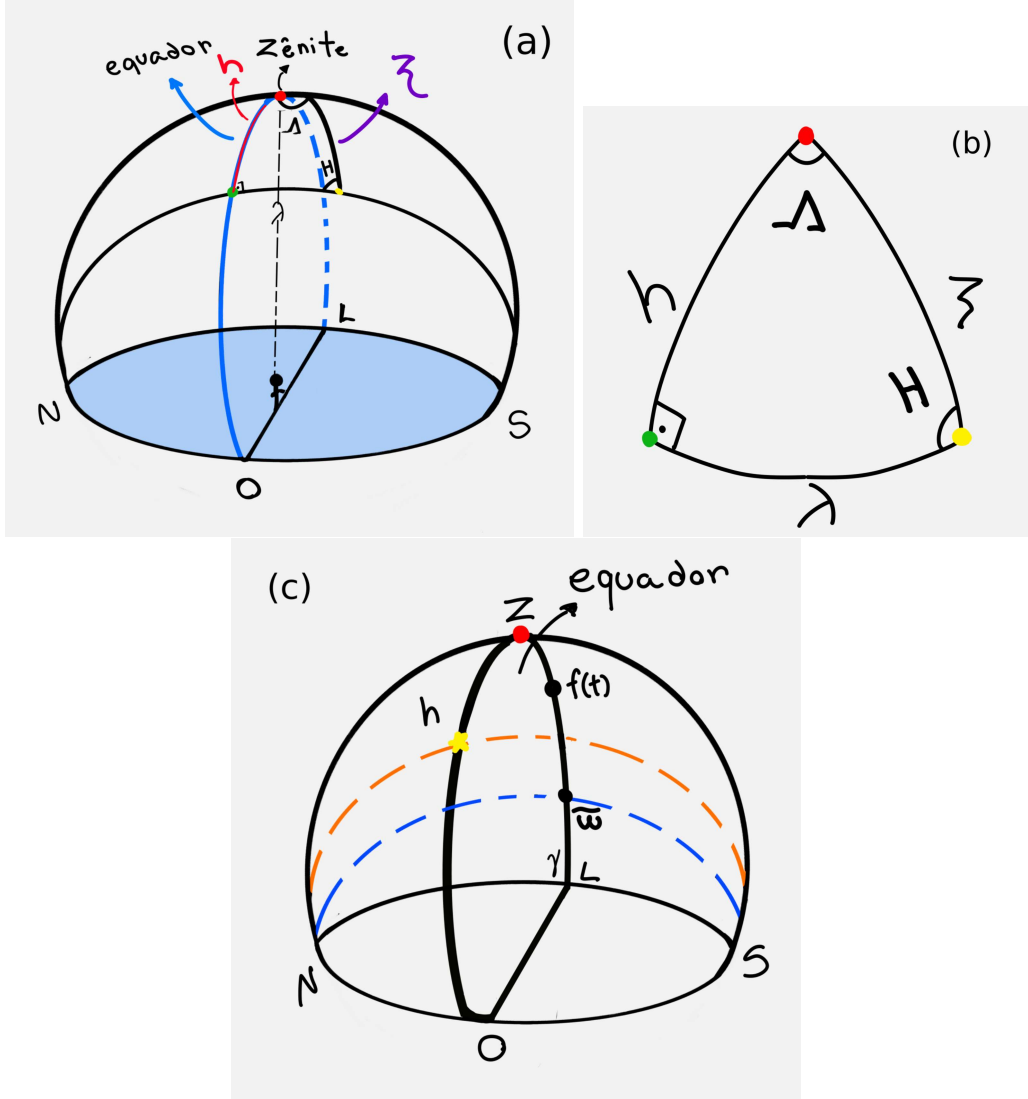


Figura 3.2: (a) Ilustração mostrando a posição da estrela em relação a um observador no equador. Z é o zênite, h é o ângulo horário, ζ o ângulo medido entre a posição da estrela no céu e o zênite e λ é a latitude da estrela em relação ao equador. (b) Triângulo esférico formado pelo zênite, a estrela e um ponto de interseção entre o equador e o meridiano da estrela. (c) Ilustração mostrando o ângulo horário da estrela em relação ao meridiano local. $f(t)$ representa a anomalia verdadeira e ϖ é a longitude do pericentro. Utilizamos a condição $\omega t - f(t) - \varpi = 0$, onde ω é a velocidade angular de rotação do planeta, para descrever o sincronismo spin-órbita, dessa forma, o ângulo de rotação do corpo, $\theta(t) = \omega t$, está sempre alinhado com a longitude verdadeira, $f(t) + \varpi$, medida a partir de um referencial inercial γ . A linha laranja tracejada representa o meridiano da estrela, enquanto a linha tracejada azul representa o meridiano de referência no qual está definida a longitude do pericentro, ϖ .

$$S = S^* \left[\frac{a}{r} \right]^2 \cos(\zeta). \quad (3.3)$$

Pela lei dos cossenos esféricos para o lado ζ , temos que:

$$\cos(\zeta) = \cos(\lambda) \cos(h) + \sin(\lambda) \sin(h) \cos(90^\circ), \quad (3.4)$$

sabemos que o $\cos(90^\circ) = 0$, anulando o segundo termo da equação, ficamos então com $\cos(\zeta) = \cos(\lambda) \cos(h)$

Para simplificar, podemos definir $\lambda = 0$, já que λ representa a declinação da estrela, ou seja, sua latitude em relação ao equador do planeta. Se a declinação da estrela for zero, isso significa que a estrela está alinhada com o equador celeste do planeta. Nesse caso, a inclinação do eixo de rotação do planeta em relação ao plano orbital da estrela é zero, ou seja, o eixo de rotação do planeta não está inclinado em relação à posição da estrela e, portanto, o planeta não tem obliquidade.

E a equação (3.3) pode ser reescrita como:

$$S = S^* \left[\frac{a}{r} \right]^2 \cos(h). \quad (3.5)$$

Dobrovolskis [11] define o ângulo horário como $h = \omega t - f(t) - \phi$, em que ω é a velocidade angular de rotação do planeta, t é o tempo, $f(t)$ é a anomalia verdadeira e ϕ é a longitude de um ponto na superfície do planeta, medida a partir do meridiano principal. O ângulo horário h representa, portanto, a posição angular de uma estrela no céu para um observador na longitude ϕ . No entanto, essa equação só é válida se o meridiano principal ($\phi = 0$) for definido de forma que o ponto subestelar no periastro coincida com esse meridiano, ou seja, o periastro deve estar alinhado com a longitude.

Mas, na realidade, o periastro pode ocorrer em qualquer direção no espaço. Para contornar esse problema, precisamos saber em que posição do céu do planeta o periastro se encontra, e para isso precisamos adicionar a longitude do pericentro ϖ à equação acima. De fato, quando a órbita não está alinhada com o meridiano principal, é necessário modificar a equação para refletir esse deslocamento. Portanto, a equação utilizada para calcular o ângulo horário nesse trabalho é dada por:

$$h = \omega t - f(t) - \varpi - \phi. \quad (3.6)$$

Neste trabalho, adotamos a condição $\omega t - f(t) - \varpi = 0$ para descrever o estado de

sincronismo spin-órbita. Essa expressão assume que o ângulo de rotação do corpo, $\theta(t) = \omega t$, está sempre alinhado com a anomalia verdadeira, representada por $f(t)$, medida a partir de um referencial inercial, ou seja, considerando a longitude do pericentro ϖ , ver figura [3.2b].

Do ponto de vista dinâmico, o sincronismo spin-órbita surge devido a torques atuando sobre um corpo em rotação. Esses torques, causados devido à assimetria do corpo ou a deformações de maré, atuam ao longo do tempo para levar o corpo a configurações estáveis. Para representar esse processo, seria necessário resolver um conjunto de equações diferenciais acopladas que incluem o cálculo dos torques rotacionais e dos momentos de inércia [23]. Este estudo não tem como objetivo simular a dinâmica rotacional do corpo, portanto, trabalhamos em um regime puramente cinemático. Dessa forma, a estrutura interna, o formato do corpo e o torque são desconsiderados. Por essa razão, definimos o sincronismo diretamente ao impor a condição $\omega t - f(t) - \varpi = 0$ como uma restrição. Essa simplificação nos permite focar nas implicações do sincronismo sem modelar a complexa dinâmica que leva ao seu estabelecimento.

3.3 Teoria secular planetária

Utilizamos a teoria secular para isolar os efeitos seculares dos resultados obtidos pelo programa empregado para calcular a insolação de exoplanetas. Assim, podemos comparar os resultados de excentricidade obtidos pelo programa com os fornecidos pela teoria secular apresentada nas equações 7.6 - 7.14 do capítulo 7 do livro "Solar System Dynamics"[21] [24]. A teoria secular descreve a evolução orbital de corpos celestes ao longo de escalas de tempo longas, desconsiderando variações de curto período, como as associadas ao movimento médio dos planetas. As equações da teoria secular são derivadas a partir da perturbação gravitacional mútua entre os corpos, considerando apenas os termos de longo período.

Considerando dois planetas de massa m_1 e m_2 orbitando uma estrela central de massa m_c , onde $m_1, m_2 \ll m_c$ e que os corpos 1 e 2 sejam o interno e o externo, respectivamente. A partir disso, podemos definir os parâmetros orbitais e físicos dos corpos celestes utilizados.

Em seguida, a excentricidade e a inclinação são decompostas em componentes horizontais e verticais. As componentes horizontais estão relacionadas à excentricidade da órbita. A excentricidade (e) é uma medida de quanto uma órbita se desvia de um círculo perfeito. Para facilitar os cálculos, a excentricidade é decomposta em duas componentes:

$$c = e \sin(\varpi), \quad (3.7)$$

$$k = e \cos(\varpi), \quad (3.8)$$

onde:

- c = componente horizontal da excentricidade.
- k = componente vertical da excentricidade.
- ϖ = longitude do pericentro.

Já as componentes verticais estão relacionadas à inclinação da órbita. A inclinação (I) é o ângulo entre o plano da órbita e um plano de referência. De forma semelhante à excentricidade, a inclinação pode ser decomposta em duas componentes:

$$p = I \sin(\Omega), \quad (3.9)$$

$$q = I \cos(\Omega), \quad (3.10)$$

onde:

- p = componente horizontal da inclinação.
- q = componente vertical da inclinação.
- Ω = Longitude do nodo ascendente.

As equações da teoria secular descrevem a evolução desses componentes ao longo do tempo. As matrizes A e B são calculadas para descrever as perturbações gravitacionais entre os corpos. As matrizes são dependentes das massas, distâncias e parâmetros orbitais dos corpos (1, 2).

$$A_{jj} = +n_j \frac{1}{4} \frac{m_k}{m_c + m_j} \alpha_{jk} \tilde{\alpha}_{jk} b_{3/2}^{(1)}(\alpha_{jk}), \quad (3.11)$$

$$A_{jk} = -n_j \frac{1}{4} \frac{m_k}{m_c + m_j} \alpha_{jk} \tilde{\alpha}_{jk} b_{3/2}^{(2)}(\alpha_{jk}), \quad (3.12)$$

$$B_{jj} = -n_j \frac{1}{4} \frac{m_k}{m_c + m_j} \alpha_{jk} \tilde{\alpha}_{jk} b_{3/2}^{(1)}(\alpha_{jk}), \quad (3.13)$$

$$B_{jk} = +n_j \frac{1}{4} \frac{m_k}{m_c + m_j} \alpha_{jk} \tilde{\alpha}_{jk} b_{3/2}^{(1)}(\alpha_{jk}), \quad (3.14)$$

onde $\alpha_{12} = a_1/a_2$ com $a_1 < a_2$, sendo que, $\tilde{\alpha}_{jk} = \alpha_{jk}$ se $j = 1$, referente a perturbação interna, e $\tilde{\alpha}_{jk} = 1$ se $j = 2$, referente a perturbação externa. $b_{3/2}^{(1,2)}$ são os coeficientes de Laplace calculados a partir das equações:

$$b_{3/2}^{(1)}(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\psi)}{(1 - 2\alpha \cos(\psi) + \alpha^2)^{\frac{3}{2}}} d\psi, \quad (3.15)$$

$$b_{3/2}^{(2)}(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(2\psi)}{(1 - 2a \cos(\psi) + a^2)^{\frac{3}{2}}} d\psi. \quad (3.16)$$

Os parâmetros orbitais e físicos utilizados neste trabalho foram extraídos dos artigos de referência e utilizados nas simulações realizadas com o software package Mercury. Os mesmos valores foram utilizados no cálculo da teoria secular, assegurando consistência entre os resultados numéricos e analíticos. As massas dos corpos utilizados nas simulações foram extraídas do NASA Exoplanet Archive [22], garantindo a consistência com os valores observacionais disponíveis.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações numéricas e dos cálculos de insolação realizados para os diferentes sistemas multiplanetários analisados. Primeiramente, abordamos o caso síncrono, no qual o planeta mantém a mesma face voltada para a estrela, seguido pelo caso não síncrono, onde calculamos a variação da insolação para as ressonâncias spin-órbita 2:1 e 3:2, respectivamente.

Para cada sistema, são exibidos os parâmetros orbitais, as variações de insolação e os efeitos das interações seculares entre os planetas. A análise dos resultados permite compreender de que forma a dinâmica orbital, a excentricidade e a obliquidade influenciam a distribuição da energia recebida e, consequentemente, a possível habitabilidade desses exoplanetas.

Em sistemas planetários compostos por mais de dois planetas, foi adotada uma abordagem simplificada para o cálculo da insolação, dessa forma, é selecionado um único planeta perturbador para cada corpo de interesse. A insolação é então calculada a partir de um sistema reduzido, formado pelo planeta cuja insolação se deseja determinar e pelo seu respectivo perturbador. O planeta perturbador é definido como aquele que provoca a maior variação na excentricidade orbital do planeta analisado, uma vez que a excentricidade exerce influência direta sobre a distância orbital e, consequentemente, sobre a insolação recebida.

4.1 Caso Síncrono

No caso síncrono, a rotação e a translação do exoplaneta apresentam o mesmo período, de modo que a mesma região da superfície permanece permanentemente voltada para a estrela. Essa configuração é análoga à situação da Lua em relação à Terra, em que uma mesma “face” está sempre iluminada. Como estabelecido na metodologia, o sincronismo é imposto ao adotarmos a condição $\omega t - f(t) - \varpi = 0$. Dessa forma, o ângulo horário h proposto ao caso síncrono é puramente $h = 0$, uma

vez que determinamos $\phi = 0$.

Entretanto, ao observar o gráfico, é possível perceber que a insolação não permanece rigorosamente constante ao longo do tempo. Essa variação ocorre devido à excentricidade orbital. Mesmo no caso síncrono, a insolação não permanece constante quando a excentricidade orbital é diferente de zero. Isso ocorre porque, embora o planeta mantenha sempre a mesma face voltada para a estrela, a distância planeta-estrela varia ao longo da órbita excêntrica. Como a insolação depende diretamente de $[\frac{a}{r}]^2$, qualquer oscilação em $r(t)$ gera variações significativas na insolação. Assim, o sincronismo elimina apenas a variação diurna, ou seja, impede que o hemisfério escuro seja iluminado, mas não impede variações resultantes da excentricidade orbital. Portanto, apenas no caso estritamente circular, $e = 0$, a insolação permaneceria totalmente constante. Pela eq. [3.2], temos que a insolação é determinada pela constante extrasolar S^* multiplicada pelo quadrado do quociente entre o semieixo maior, a , e o raio médio orbital, r . Dessa forma, caso $a \neq r$, então o valor da insolação deve variar.

É possível observar isso no gráfico [4.1], quando $a \neq r$, a insolação apresenta pequenas variações positivas ao longo do tempo, mas seu valor máximo é equivalente à constante extrasolar S^* . Na tabela [4.1] estão os valores da constante extrasolar S^* para os exoplanetas estudados neste trabalho.

Tabela 4.1: Valores de insolação para o caso síncrono ($S = S^*$)

Planeta $S^* (W/m^2)$	Terra 1361.16			
Planeta $S^* (W/m^2)$	K2-18b 1559.78	WASP-47e 5275662.73	55 Cancri-e 3254554.17	HD 219134b 82996.2
Planeta $S^* (W/m^2)$	TRAPPIST-1 d 31.91	TRAPPIST-1 e 24.29	TRAPPIST-1 f 18.46	LP 791-18c 136.66

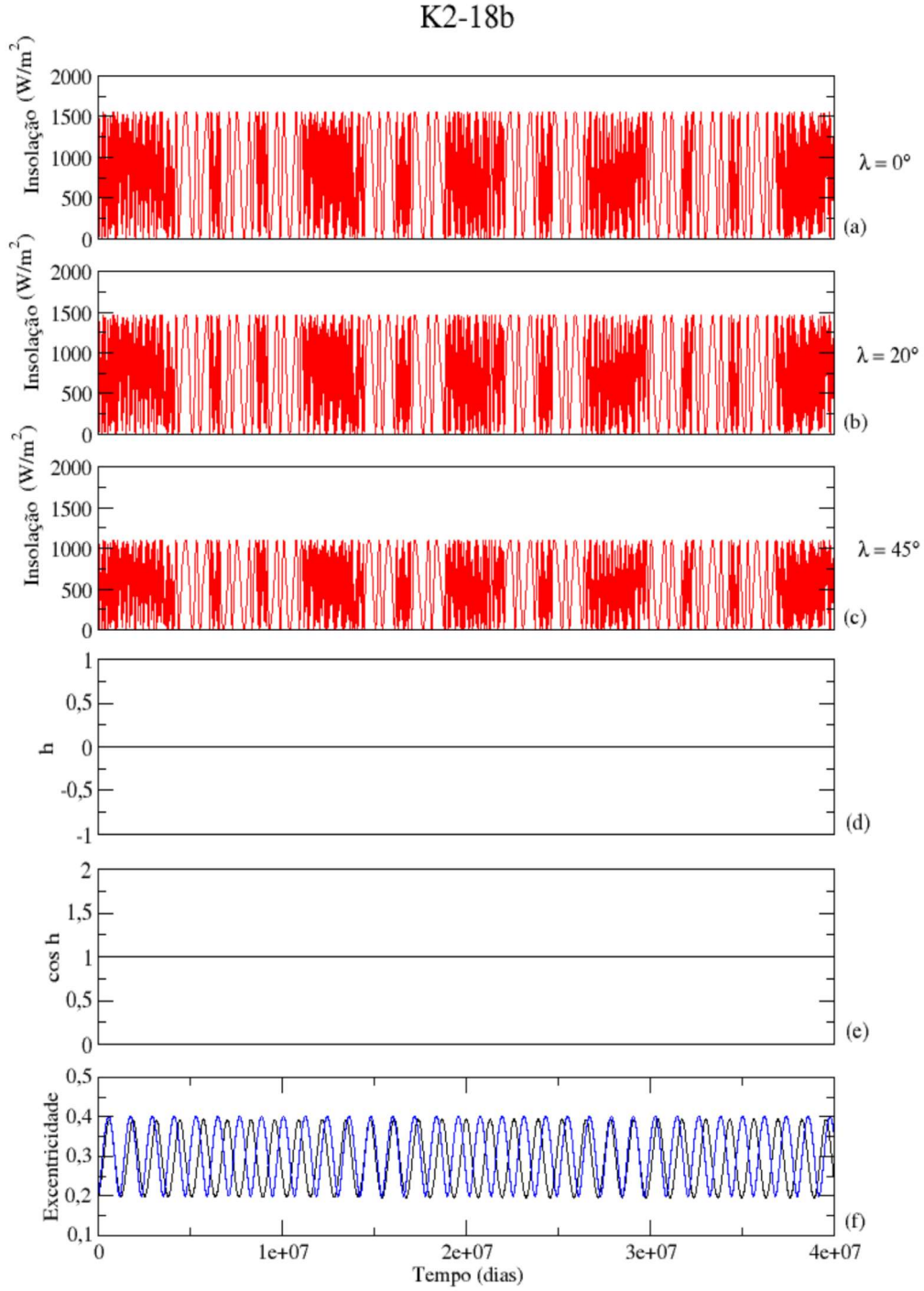


Figura 4.1: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta K2-18b no regime de rotação síncrona 1:1. (a), (b) e (c) Variação da insolação em K2-18b para os casos em que a obliquidade é de 0° , 20° e 45° respectivamente, (d) ângulo horário $h = \omega t - f(t) - \varpi - \phi = 0$. (e) $\cos(h)$. (f) Evolução da excentricidade orbital do K2-18b. As curvas preta e azul representam os resultados obtidos pelo software Mercury e pela teoria secular, respectivamente.

4.1.1 $\phi \neq 0$

Nesta subseção, analisamos o caso em que $\phi \neq 0$, ou seja, quando o observador não se encontra sob o meridiano principal. Nas seções seguintes trataremos dos casos assíncronos 2:1 e 3:2, nos quais consideramos $\phi = 0$, ou seja, o observador localizado exatamente no meridiano principal. Antes, porém, é importante compreender o comportamento do sistema quando $\phi \neq 0$, pois esse efeito não será abordado posteriormente, uma vez que sua contribuição seria mascarada pelos outros termos associados ao ângulo horário h .

Adotamos a condição de sincronismo $\omega t - f(t) - \varpi = 0$ descrita anteriormente. A diferença, neste caso, está no fato de que $\phi \neq 0$, o que implica que o ângulo horário é dado por $h = -\phi$. Fazendo com que o observador se desloque do meridiano principal.

Na Figura [4.2] é apresentada a variação da insolação recebida por K2-18b para diferentes longitudes do observador em relação ao meridiano principal. Na Fig. [4.2a], com $\phi = 0^\circ$, a insolação é máxima, uma vez que $\cos(0) = 1$. Na Fig. [4.2b], para $\phi = 45^\circ$, observa-se uma redução significativa na insolação, apresentando aproximadamente metade do valor máximo.

A comparação entre as Figuras [4.1] e [4.2] mostra que a longitude do observador, ϕ , exerce uma influência mais direta sobre a insolação do que a declinação da estrela, λ .

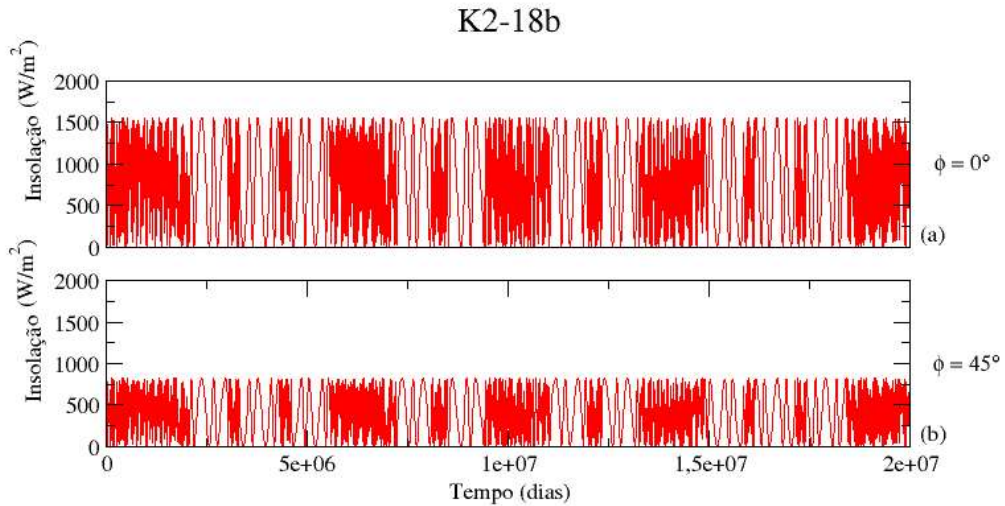


Figura 4.2: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta K2-18b no regime de rotação síncrona 1:1. (a) e (b) Variação da insolação em K2-18b para os casos em que ϕ é igual a 0° e 45° respectivamente.

4.2 Caso Assíncrono

4.2.1 K2-18b

K2-18 é uma estrela de classe espectral M2.5V, uma anã vermelha muito menos massiva e mais fria que o sol. Ela está a 34 pc de distância da Terra e seu sistema tem dois exoplanetas, uma super-Terra (K2-18b)[25] e um exoplaneta do tipo Netuno (K2-18c)[26], ver tabela [4.2.1]. Os dados foram obtidos do catálogo de exoplanetas[27] e do arquivo de exoplanetas fornecido pela NASA[28].

Tabela 4.2: Dados do sistema K2-18

Estrela	Massa	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsecs)
K2-18	$0.36 M_{\odot}$ [26]	$0.41 R_{\odot}$ [26]	$0.0234 L_{\odot}$ [26]	3457.0 [26]	34
					0
Planeta		e	p (dias)	w ($^{\circ}$)	a (UA)
K2-18b	$8.92 M_{\oplus}$ [29]	0.2[29]	32.9[29]	354.3 [29]	0.1429 [29]
K2-18c	$7.51 M_{\oplus}$ [26]	0.47[26]	8.962 [26]	-	0.060[26]

A Figura [4.3] ilustra a configuração orbital do sistema K2-18 e a localização de seus planetas em relação à zona habitável da estrela hospedeira. As órbitas de K2-18b (preto) e K2-18c (roxo) são representadas em coordenadas cartesianas no plano orbital, assumindo coplanaridade. Os círculos em verde claro e verde escuro delimitam, respectivamente, as bordas interna e externa da zona habitável, definidas pelos critérios empíricos de Recent Venus e Early Mars. A partir dessa representação, observa-se que a órbita de K2-18b se encontra dentro da região habitável, enquanto K2-18c permanece significativamente mais distante, fora dos limites estabelecidos.

Substituindo os valores encontrados para o K2-18b na equação (3.1), o resultado obtido é de $1559 W/m^2$, que é muito próximo do valor calculado para a Terra usando a mesma equação, que é de $1361.78 W/m^2$ [30].

As Figuras [4.4] e [4.5] apresentam a variação da insolação em K2-18b para o caso do sincronismo spin-órbita 2:1, 3:2, respectivamente. As figuras ilustram como a distribuição da energia recebida pelo planeta se altera em diferentes regimes rotacionais e para obliquidades distintas.

As condições iniciais foram as mesmas utilizadas nas simulações realizadas com o software Mercury [20]. As massas de K2-18b e K2-18c foram obtidas de Sarkis et al. 2018 [29] e Cloutier et al. 2017[26], respectivamente.

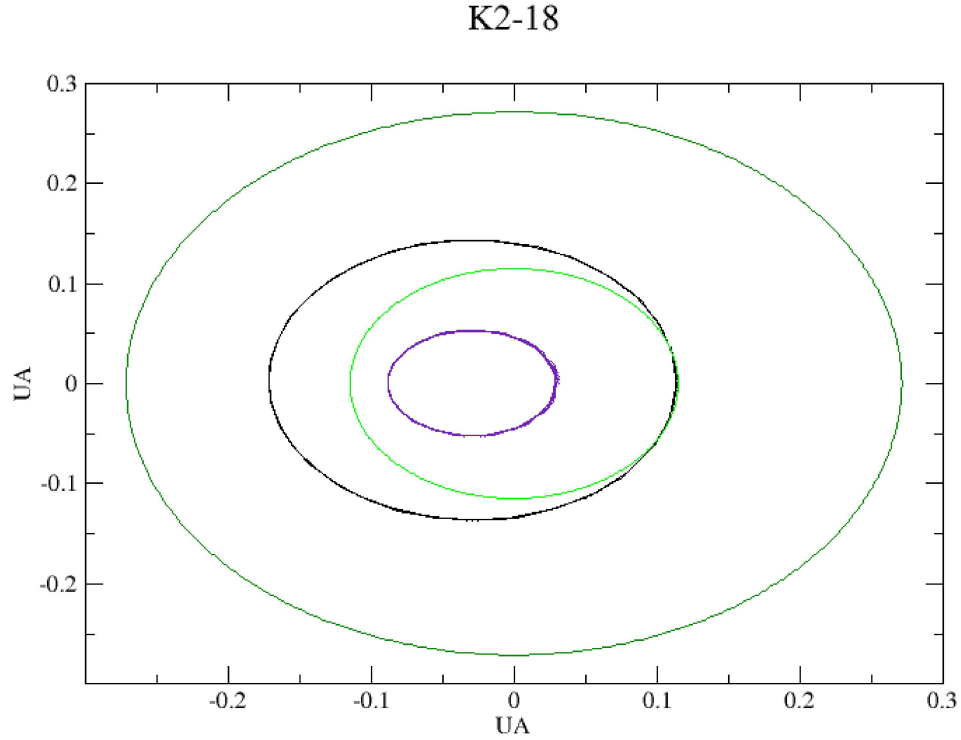


Figura 4.3: Representação do sistema planetário K2-18 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas dos planetas estão apresentadas em ordem crescente de distância à estrela, sendo K2-18c representado em roxo e K2-18b em preto. Os círculos em verde claro e verde escuro indicam, respectivamente, os limites interno e externo da zona habitável, definidos segundo os critérios de Recent Venus e Early Mars.

Tabela 4.3: Massa e elementos orbitais para o sistema K2-18

	K2-18b	K2-18c
Massa (kg)	$5.32735404 \times 10^{25}$	$4.48524987 \times 10^{25}$
a (UA)	0.1429	0.06
e	0.20	0.47
$I(^{\circ})$	0.0	0.0
$\varpi(^{\circ})$	354.3	0.0

Os primeiros três quadros da Figura [4.4] analisam a variação da insolação no caso de ressonância 2:1. Foram consideradas diferentes obliquidades planetárias, variando entre 0° , 20° e 45° , com o objetivo de compreender como a inclinação do eixo de rotação influencia a distribuição da radiação solar recebida ao longo do tempo. Observa-se que o aumento da obliquidade está diretamente relacionado à diminuição do valor máximo da insolação. Isso ocorre porque, no primeiro

caso ($\lambda = 0$), a estrela está posicionada diretamente sobre o equador do planeta, resultando em declinação zero. Com o aumento da obliquidade, a declinação da estrela também cresce, fazendo com que a estrela se afaste do equador, o que reduz a quantidade de energia incidente na superfície, onde a insolação inicialmente era máxima, ver Figura [3.2 capítulo 3].

Fig. [4.4 d] apresenta a evolução temporal do ângulo horário $h = \omega t - f(t) - \varpi - \phi$, que é fundamental para descrever a posição relativa entre a estrela e um ponto fixo na superfície do planeta, e na Fig. [4.4e] temos a variação de $\cos(h)$. A influência das interações gravitacionais seculares pode ser observada na Fig. [4.4f], que mostra a evolução da excentricidade de K2-18b. A curva preta representa os dados obtidos por meio de integração numérica com o software Mercury, enquanto a curva azul corresponde às previsões da teoria secular.

Por fim, Fig. [4.4g] apresenta a evolução da diferença entre as longitudes do pericentro de K2-18b e K2-18c, representada por $\Delta\varpi$. Nota-se que essa diferença oscila com o mesmo período observado nas variações de excentricidade, indicando que ambas estão fortemente correlacionadas por meio das interações seculares mútuas entre os dois planetas.

De maneira análoga, a Figura [4.5] apresenta a variação da insolação para o caso de ressonância 3:2. Observa-se um comportamento semelhante ao obtido para a ressonância 2:1, na relação entre a obliquidade e o valor máximo da insolação, assim como na evolução temporal dos parâmetros orbitais. As curvas de $\cos h$ mantêm o mesmo padrão de variação, indicando que as interações seculares entre K2-18b e K2-18c produzem efeitos semelhantes nos dois regimes de rotação.

Observa-se que a insolação assume valores negativos em determinados momentos. Isso indica que a posição da estrela, em relação ao ponto onde a insolação está sendo calculada, se deslocou para o hemisfério oposto. Em outras palavras, insolação negativa significa que a região que antes estava iluminada não recebe mais luz, enquanto o hemisfério anteriormente escuro agora recebe luz. Esse comportamento é análogo ao que ocorre na Terra: devido ao movimento de rotação do planeta e a posição do Sol no céu, diferentes hemisférios são alternadamente iluminados ao longo do tempo.

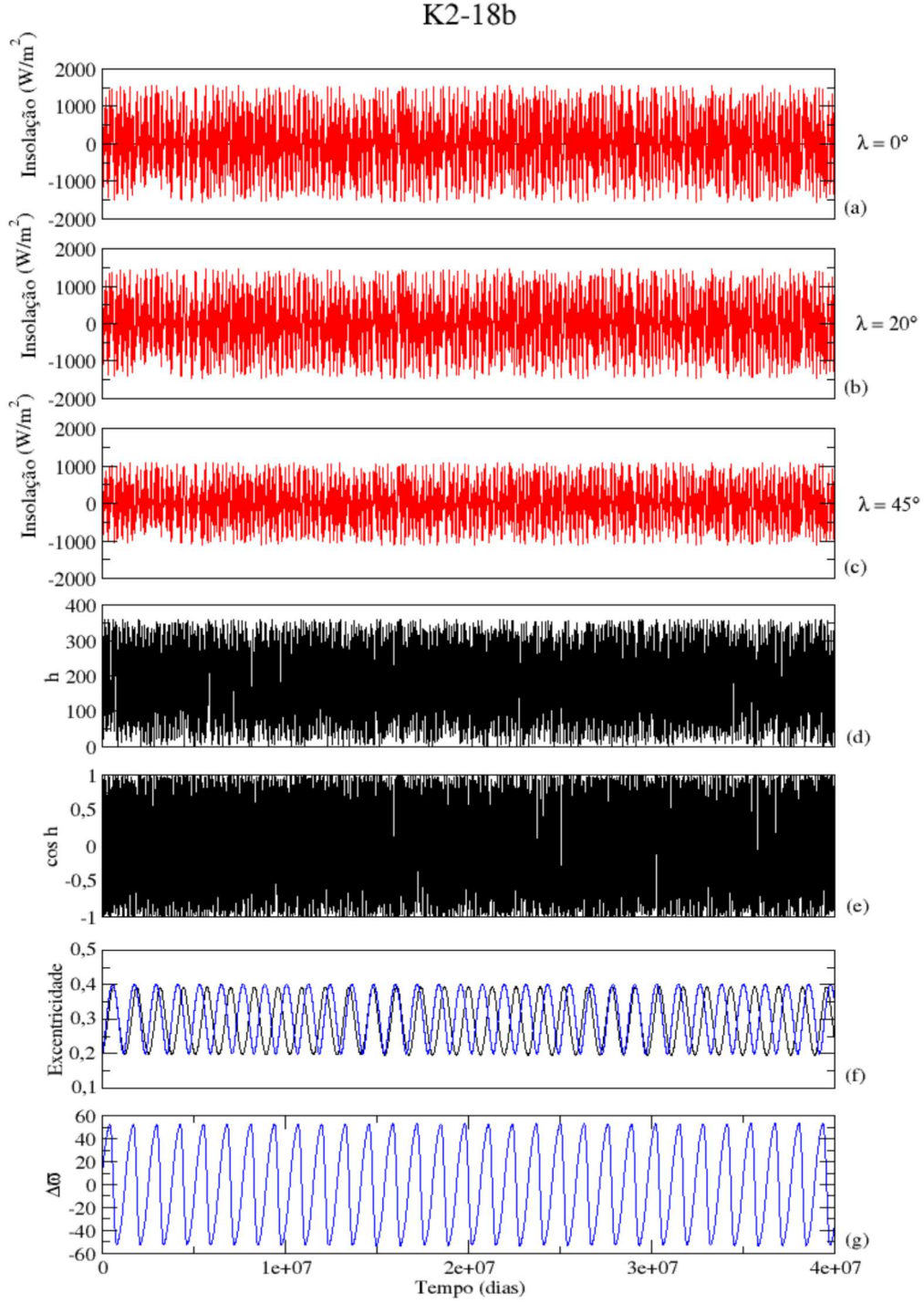


Figura 4.4: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta K2-18b no regime de rotação não síncrona 2:1. (a), (b) e (c) Variação da insolação em K2-18b para os casos em que a obliquidade é de 0° , 20° e 45° respectivamente, (d) evolução do ângulo horário $h = \omega t - f(t) - \varpi - \phi$, com $\phi = 0$. (e) Variação temporal de $\cos(h)$. (f) Evolução da excentricidade orbital do K2-18b. As curvas preta e azul representam os resultados obtidos pelo software Mercury e pela teoria secular, respectivamente. (g) Diferença entre as longitudes do pericentro entre os exoplanetas K2-18c e K2-18b ($\Delta\varpi$).

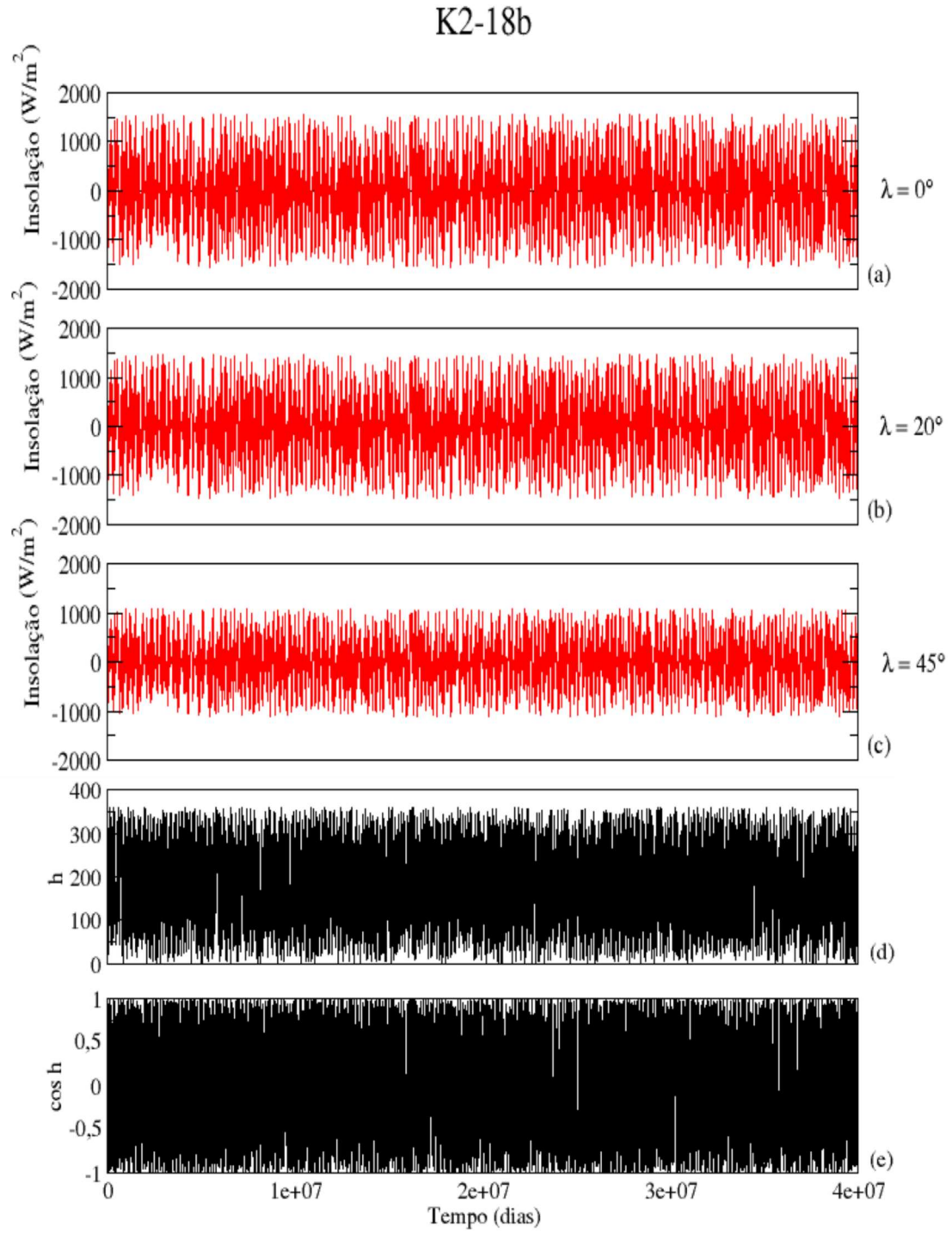


Figura 4.5: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta K2-18b no regime de rotação não síncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]

4.2.2 WASP-47e

WASP-47 é uma estrela de classe espectral G9V, uma estrela amarela semelhante ao Sol, ela se encontra a aproximadamente 264.9 pc de distância e seu sistema planetário conta com dois gigantes gasosos (WASP-47b [31] e WASP-47c [32]), um exoplaneta tipo Netuno (WASP-47d) [33] e uma Super Terra (WASP-47e)[33]. Ver tabela [4.2.2].

Tabela 4.4: Dados do sistema WASP-47

Estrela	Massa	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsecs)
WASP-47	1.058 $M_{\odot}$ [34]	1.156 $R_{\odot}$ [34]	1.16 $L_{\odot}$ [35]	5552 [35]	264.9
Planeta		e	p (dias)	$w(^{\circ})$	a (UA)
WASP-47b	1.18 M_J [34]	0.00060 [34]	4.1591510 [34]	89.0 [34]	0.052 [36]
WASP-47c	1.41 M_J [34]	0.264 [34]	589.57 [34]	111.8 [34]	1.393 [37]
WASP-47d	15.5 $M_{\oplus}$ [34]	0.0010 [34]	9.030501 [34]	83.0 [34]	0.0880 [36]
WASP-47e	9.0 $M_{\oplus}$ [34]	0.030 [36]	0.78961 [34]	90.0 [34]	0.0173 [36]

A Figura [4.2.2] é uma representação do sistema planetário WASP-47 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas dos planetas são apresentadas em ordem crescente de distância à estrela, correspondendo a WASP-47e (rosa), WASP-47b (vermelho), WASP-47d (azul) e WASP-47c (preto). Os círculos em verde claro e verde escuro indicam, respectivamente, os limites interno e externo da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars. É possível observar que apenas a órbita de WASP-47c se encontra dentro da ZH, enquanto os outros planetas permanecem mais distantes, fora dos limites estabelecidos.

WASP-47e se encontra muito próximo de sua estrela, sendo um exoplaneta de período ultracurto. O sistema planetário de WASP-47 conta com quatro exoplanetas, dessa forma, para facilitar os cálculos, estaremos determinando um perturbador para o sistema e calculando a variação da insolação no planeta com a perturbação do planeta escolhido. No caso de WASP-47e, o perturbador escolhido para o sistema foi WASP - 47d. A constante extrassolar calculada a partir da Eq. (3.1) para WASP-47e é de 5275662.73 W/m^2 .

Na tabela [4.2.2] são apresentadas as condições iniciais adotadas para o cálculo da teoria secular. As massas de WASP-47e e WASP-47d foram obtidas de Almenara et al. 2016 [36] e Nascimbeni et al. 2023[34], respectivamente. As Figuras [4.7] e [4.8] contêm a variação da insolação em WASP-47e para o sincronismo 2:1 e 3:2.

Os primeiros três quadros da Figura [4.7] analisam a variação da insolação no caso de ressonância 2:1. Foram consideradas diferentes obliquidades planetárias, variando entre 0° , 20° e 45° , com o objetivo de compreender como a inclinação do

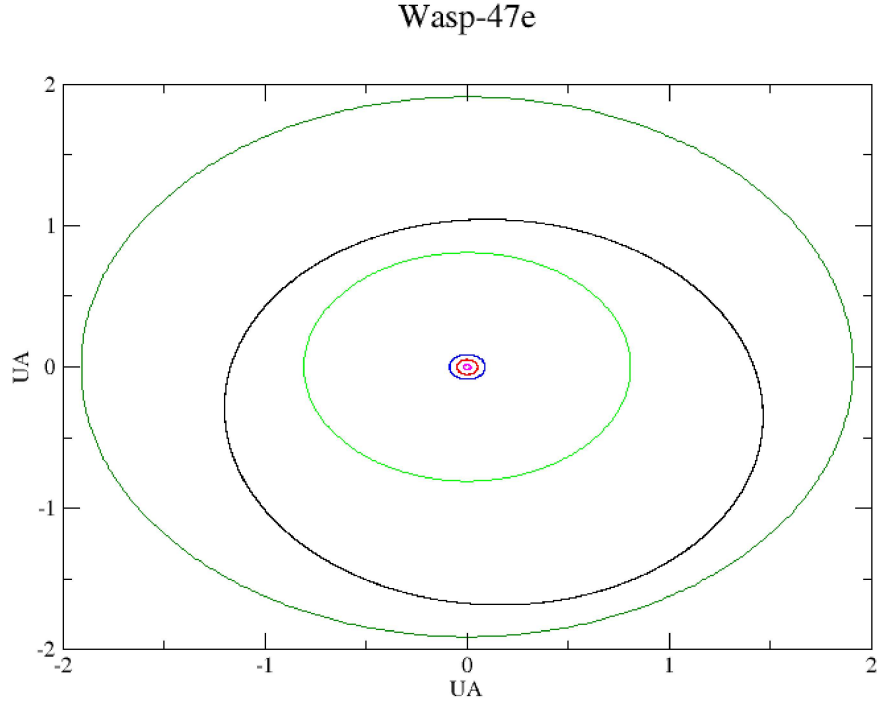


Figura 4.6: Representação do sistema planetário WASP-47 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas de WASP-47e (rosa), WASP-47b (vermelho), WASP-47d (azul) e WASP-47c (preto) são mostradas, juntamente com os limites interno (verde claro) e externo (verde escuro) da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars.

Tabela 4.5: Massa e elementos orbitais para o sistema WASP-47e

	WASP-47d	WASP-47e
Massa (kg)	7.6217×10^{26}	5.2128×10^{25}
a (UA)	0.088	0.0173
e	0.001	0.03
$I(^{\circ})$	0.0	0.0
$\varpi(^{\circ})$	83.0	90.0

eixo de rotação influencia a distribuição da radiação solar recebida ao longo do tempo.

Fig. [4.7d] apresenta a evolução temporal do ângulo horário $h = \omega t - f(t) - \varpi - \phi$, e na Fig. [4.4e] $\cos(h)$. A influência das interações gravitacionais seculares pode ser observada na Fig. [4.7f], que mostra a evolução da excentricidade de WASP-47e. A curva preta representa os dados obtidos por meio de integração numérica com

o software Mercury, enquanto a curva azul corresponde às previsões da teoria secular.

Por fim, Fig. [4.7g] apresenta a evolução da diferença entre as longitudes do pericentro de WASP-47e e WASP-47d, representada por $\Delta\varpi$. Nota-se que essa diferença oscila com o mesmo período observado nas variações de excentricidade, indicando que ambas estão fortemente correlacionadas por meio das interações seculares mútuas entre os dois planetas. De maneira análoga, a Figura [4.8] apresenta a variação da insolação para o caso de ressonância 3:2. Observa-se um comportamento diferente do obtido para a ressonância 2:1, como é possível observar na evolução temporal dos parâmetros orbitais.

WASP-47e

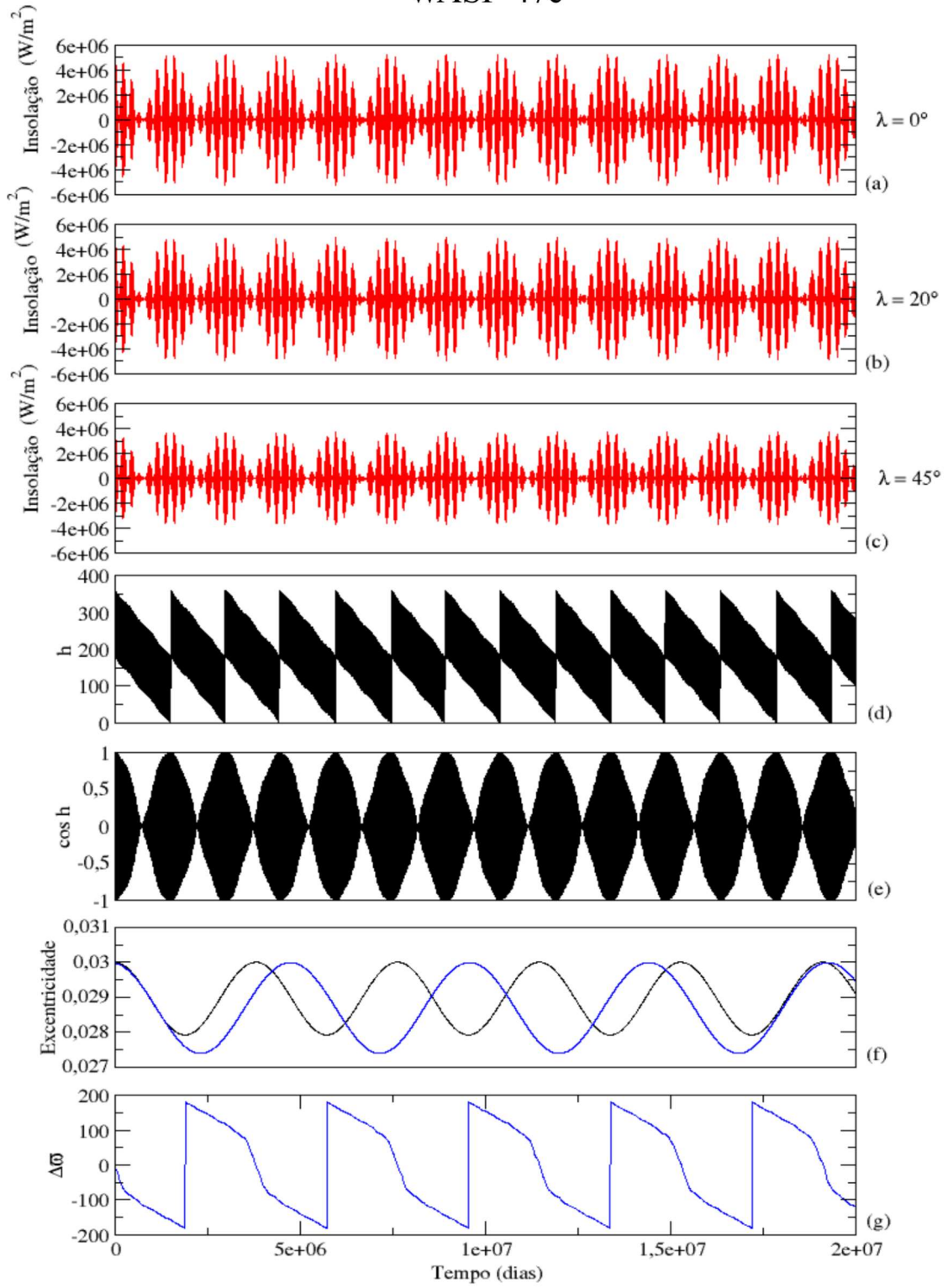


Figura 4.7: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta WASP-47e no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]

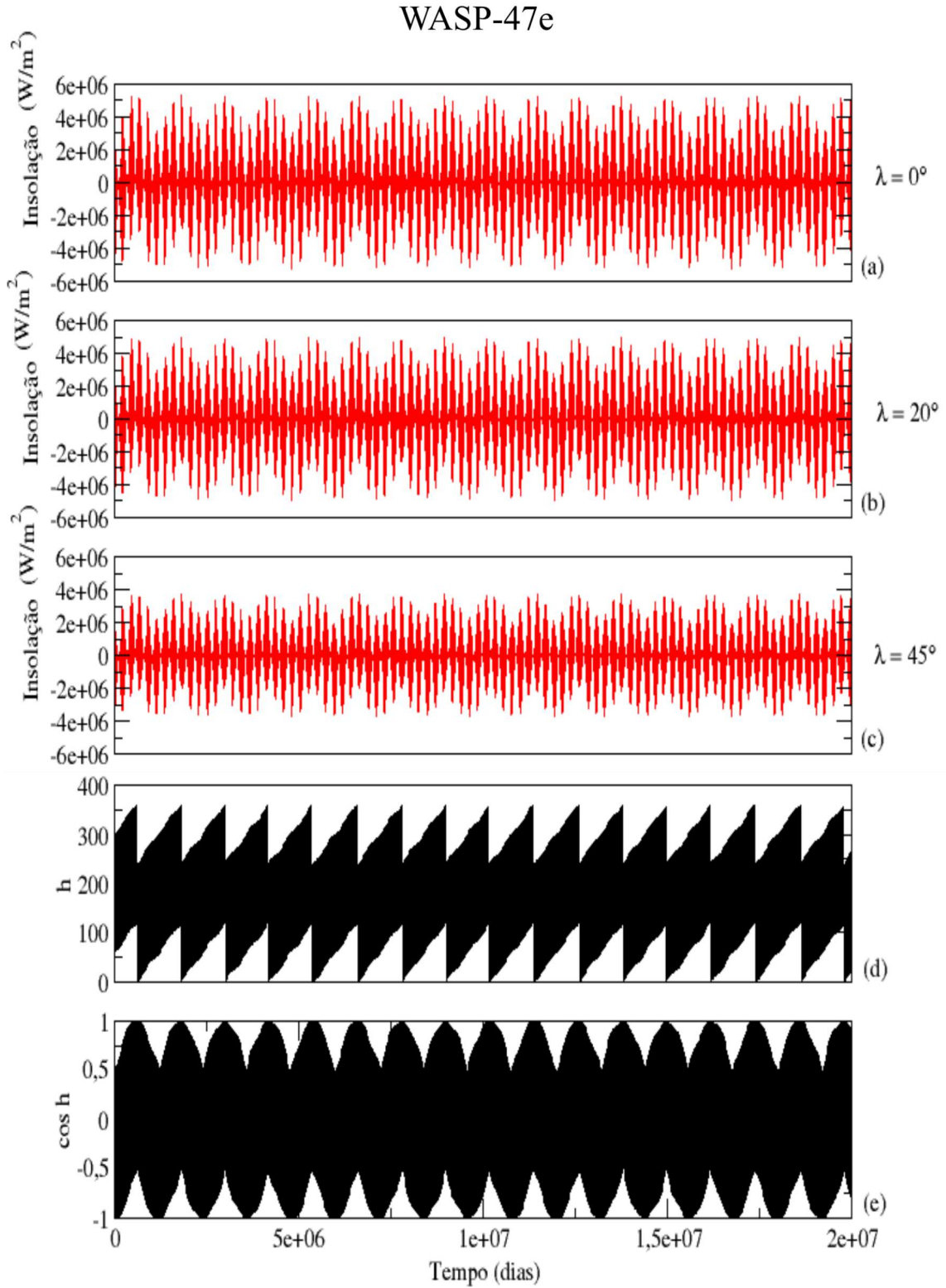


Figura 4.8: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta WASP-47e no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]

4.2.3 55 Cancri-e

55 Cancri A é uma estrela de classe espectral G8V, um pouco menos massiva e mais alaranjada que o sol, que se encontra a aproximadamente 12.5 pc de distância. Seu sistema planetário conta com quatro gigantes gasosos (55 Cancri-b [38], 55 Cancri-c [39], 55 Cancri-d [40] e 55 Cancri-f [39]), e uma Super Terra coberta por lava (55 Cancri-e [41]). A tabela [4.2.3] contém os dados do sistema planetário 55 Cancri.

Tabela 4.6: Dados do sistema 55 Cancri

Estrela	Massa	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsecs)
55 Cancri A	0.905 $M_{\odot}$ [42]	0.943 $R_{\odot}$ [42]	0.57 $L_{\odot}$ [42]	5272[42]	12.5
Planeta		e	p (dias)	$w(^{\circ})$	a (UA)
55 Cancri-b	0.803 M_J [43]	0.0023[44]	14.6516 [43]	338.5[43]	0.1134[43]
55 Cancri-c	0.1611 M_J [43]	0.03 [43]	44.3989[43]	2.40[43]	0.2373 [43]
55 Cancri-d	3.12 M_J [43]	0.13 [43]	5574.2 [43]	290.9[43]	5.957 [43]
55 Cancri-e	7.99 $M_{\oplus}$ [43]	0.05 [43]	0.7365474 [43]	86.0[43]	0.01544 [43]
55 Cancri-f	0.150 M_J [43]	0.080[43]	259.88 [43]	262.4[43]	0.7708[43]

A Figura [4.2.3] é uma representação do sistema planetário 55 Cancri em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas dos planetas são apresentadas em ordem crescente de distância à estrela, correspondendo a 55 Cancri e (preto), 55 Cancri b (amarelo), 55 Cancri c (vermelho), 55 Cancri f (roxo) e 55 Cancri d (azul). As órbitas foram assumidas coplanares. Os círculos em verde claro e verde escuro indicam, respectivamente, os limites interno e externo da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars. É possível observar que apenas a órbita de 55 Cancri f se encontra dentro da ZH, enquanto os outros planetas permanecem mais distantes, fora dos limites estabelecidos

Assim como WASP-47e, 55 Cancri-e também tem órbita muito próxima de sua estrela, sendo um exoplaneta de período ultracurto. A constante extrassolar calculada a partir da Eq. (3.1) para 55 Cancri-e é de $3254554.17 W/m^2$

Na tabela [4.2.3] são apresentadas as condições iniciais adotadas para o cálculo da teoria secular de 55 Cancri-e. O sistema planetário 55 Cancri possui cinco exoplanetas. Para simplificar os cálculos, determinamos um perturbador para o sistema. Assim, podemos calcular a variação na insolação de 55 Cancri-e com perturbação de 55 Cancri-b. As massas de 55 Cancri-b e 55 Cancri-e foram obtidas de Bourrier et al. 2018 [43]. As Figuras [4.10a, b, c] mostram as variações da insolação no caso de ressonância 2:1. De maneira análoga, a Figura [4.11a, b, c] apresenta a variação da

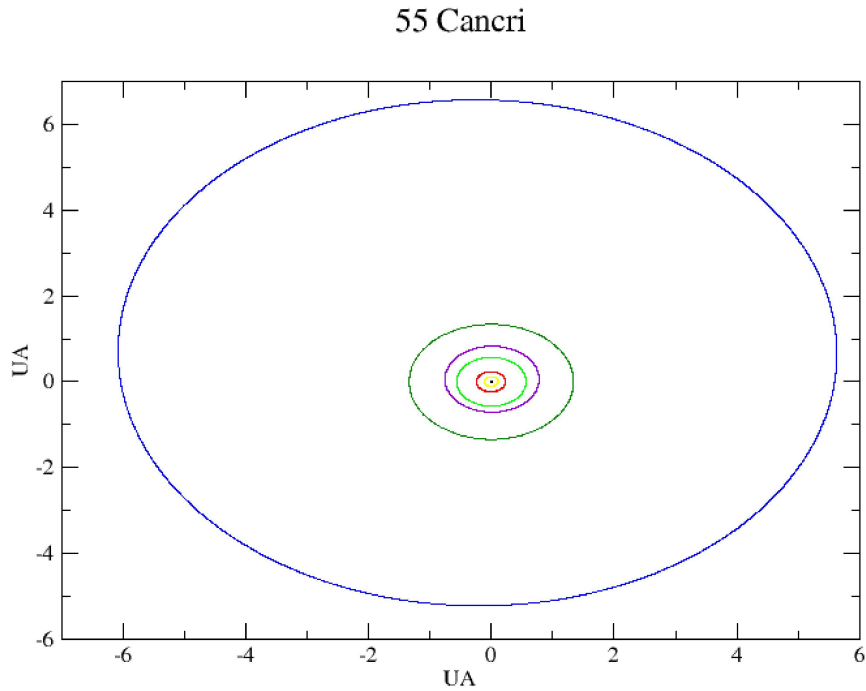


Figura 4.9: Representação do sistema planetário 55 Cancri em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas de 55 Cancri e (preto), 55 Cancri b (amarelo), 55 Cancri c (vermelho), 55 Cancri f (roxo) e 55 Cancri d (azul) são mostradas, juntamente com os limites interno (verde claro) e externo (verde escuro) da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars.

insolação para o caso de ressonância 3:2. Foram consideradas diferentes obliquidades planetárias, variando entre 0° , 20° e 45° , com o objetivo de compreender como a inclinação do eixo de rotação influencia a distribuição da radiação solar recebida ao longo do tempo.

Tabela 4.7: Massa e elementos orbitais para o sistema 55 Cancri-e

	55 Cancri-b	55 Cancri-e
Massa (kg)	1.525×10^{27}	4.7733×10^{25}
a (UA)	0.1134	0.01544
e	0.023	0.05
$I(^{\circ})$	0.0	0.0
$\varpi(^{\circ})$	338.5	86.0

As curvas de $\cos h$ apresentam diferentes padrões de variação. A insolação apresenta uma variação de curto período, ao contrário da excentricidade, que ocorre de

forma lenta e secular. Essa diferença de comportamento se deve aos ângulos de curto período, a rápida variação destes ângulos é a principal responsável pelas oscilações observadas na insolação. No caso de ressonância 2:1 [4.10], as variações na insolação são mais amplas, o que indica que 55 Cancr-e é mais sensível às perturbações gravitacionais causadas por 55 Cancr-b. Já no caso 3:2 [4.11], as oscilações ainda estão presentes, mas são menos intensas.

55 Cancri-e

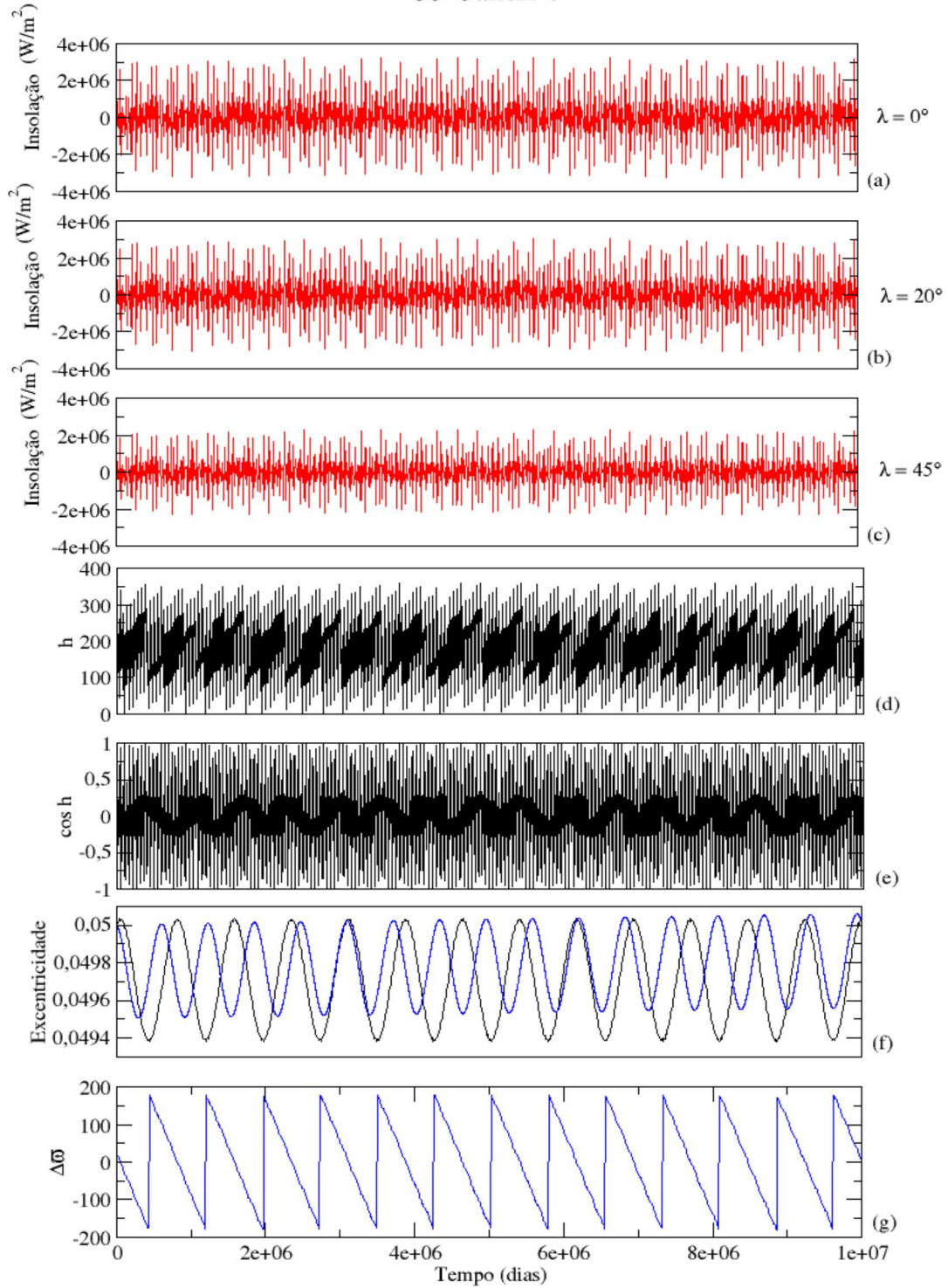


Figura 4.10: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta 55 Cancri-e no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]

55 Cancri-e

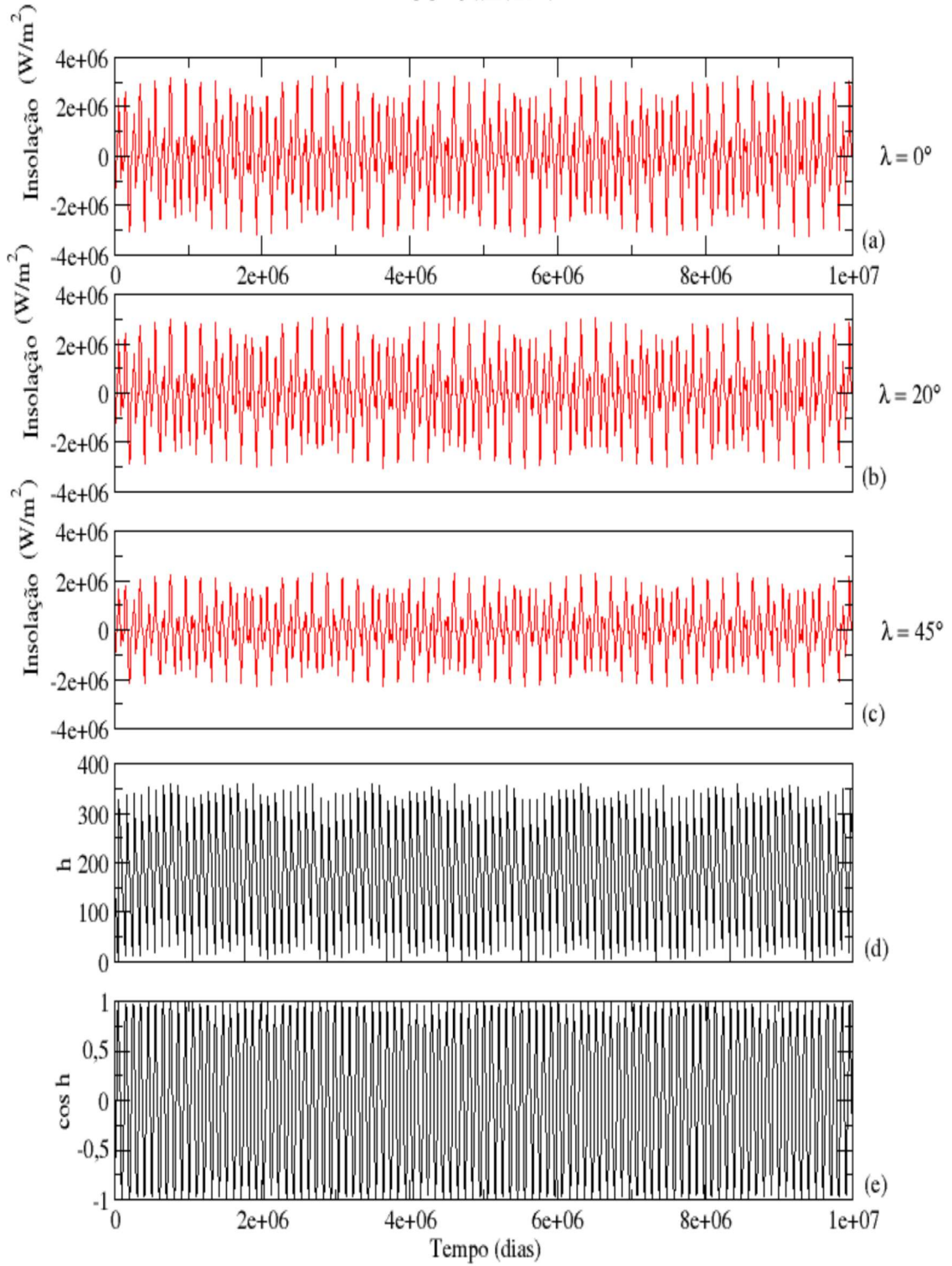


Figura 4.11: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta 55 Cancri-e no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]

4.2.4 HD 219134b

HD 219134 é classificada como uma estrela de classe espectral K3V, uma estrela laranja, menor e mais fria que o sol. Ela se encontra relativamente próxima, a uma distância de 6.4 pc. O sistema planetário de HD 219134 conta com quatro Super Terras (HD 219134b [45], HD 219134c [45], HD 219134d[45] e HD 219134f[45]), um exoplaneta do tipo Netuno (HD 219134g[46]) e um gigante gasoso (HD 219134h[46]). A tabela [4.2.4] contém os dados do sistema HD 219134.

Tabela 4.8: Dados do sistema HD 219134

Estrela	Massa	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsecs)
HD 219134	$0.788 M_{\odot}$ [47]	$0.757 R_{\odot}$ [47]	$0.265 L_{\odot}$ [47]	4817.1[47]	6.4
Planeta		e	p (dias)	$w(^{\circ})$	a (UA)
HD 219134b	$4.74 M_{\oplus}$ [48]	-	3.092926 [48]	-	0.03876 [48]
HD 219134c	$4.36 M_{\oplus}$ [48]	0.0620 [48]	6.76458 [48]	70.0 [48]	0.06530 [48]
HD 219134d	$16.17 M_{\oplus}$ [48]	0.138 [48]	46.859 [48]	173.0 [48]	0.2370 [48]
HD 219134f	$7.3 M_{\oplus}$ [48]	0.148 [48]	22.717 [48]	81.0 [48]	0.1463 [48]
HD 219134g	$11.0 M_{\oplus}$ [46]	-	94.2 [46]	-	0.3753 [46]
HD 219134h	$0.34 M_J$ [46]	0.06 [46]	2247 [46]	215.0[46]	3.11[46]

A Figura [4.2.4] é uma representação do sistema planetário 55 Cancri em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas dos planetas são apresentadas em ordem crescente de distância à estrela, correspondendo a HD 219134b (preto), HD 219134c (rosa), HD 219134f (azul), HD 219134d (vermelho), HD 219134g (amarelo) e HD 219134h (marrom). As órbitas foram assumidas coplanares. Os círculos em verde claro e verde escuro indicam, respectivamente, os limites interno e externo da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars. É possível observar que apenas a órbita de HD 219134 se encontra próxima da ZH, enquanto os outros planetas permanecem mais distantes, fora dos limites estabelecidos

Apesar de se encontrar próximo à sua estrela, HD 219134b não é considerado um planeta de período ultracurto, pois seu período de rotação é maior do que um dia. O sistema planetário HD 219134 possui seis exoplanetas. Para simplificar os cálculos, foi considerado um único planeta perturbador no sistema. Dessa forma, a variação da insolação de HD 219134b foi calculada levando em conta exclusivamente a perturbação gravitacional exercida por HD 219134f. A constante extrassolar de HD 219134b calculada é de $82996.2 W/m^2$

Na tabela [4.2.4] estão as condições iniciais do sistema composto por HD 219134b com perturbação de HD 219134f. As massas de HD 219134b e HD 219134f foram

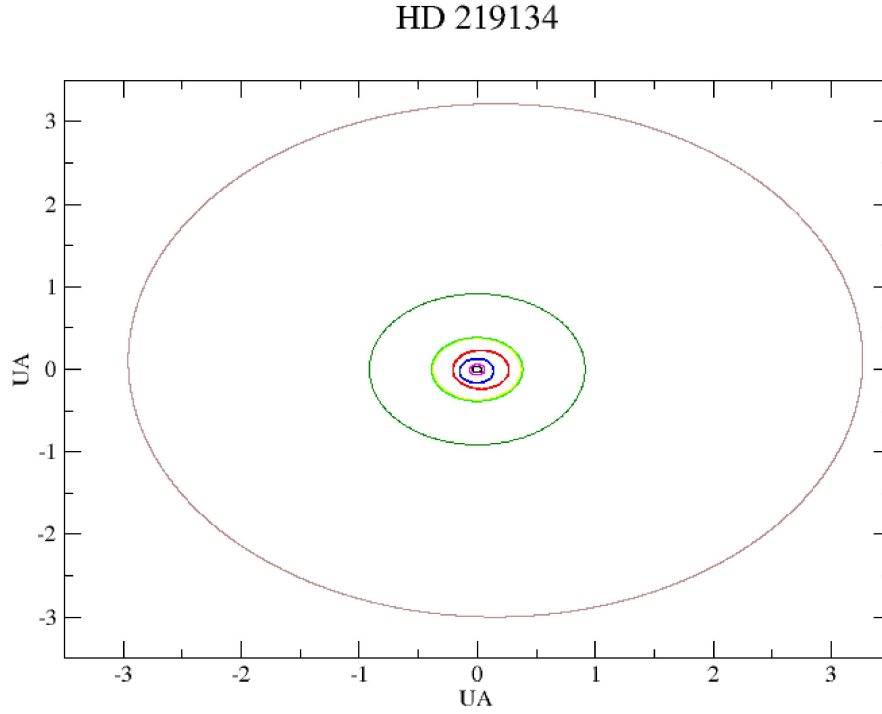


Figura 4.12: Representação do sistema planetário HD 219134 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas de HD 219134b (preto), HD 219134c (rosa), HD 219134f (azul), HD 219134d (vermelho), HD 219134g (amarelo) e HD 219134h (marrom) são mostradas, juntamente com os limites interno (verde claro) e externo (verde escuro) da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars.

obtidas de Gillon et al. 2017[48]. As Figuras [4.13] e [4.14] contêm a variação da insolação em HD 219134b para o sincronismo 2:1 e 3:2.

Tabela 4.9: Massa e elementos orbitais para o sistema HD 219134 b

	HD 219134b	HD 219134f
Massa (kg)	2.745408×10^{25}	4.22816×10^{25}
a (UA)	0.03876	0.1463
e	0.0	0.148
$I(^{\circ})$	0.0	0.0
$\varpi(^{\circ})$	0.0	81.0

A Figura [4.13a, b, c] analisa a variação da insolação no caso da ressonância 2:1. De forma semelhante, a Figura [4.14a, b, c] apresenta a variação da insolação para a ressonância 3:2. Em ambas as situações, foram consideradas diferentes obliquidades planetárias, variando entre 0° , 20° e 45° .

A Figura [4.13g] apresenta a evolução da diferença entre as longitudes do pericentro, representada por $\Delta\varpi$.

A insolação apresenta uma variação de curto período, ao contrário do que pode ser observado na excentricidade, que ocorre de forma lenta e secular. Essa diferença de comportamento se deve aos ângulos de curto período, a rápida variação destes ângulos é a principal responsável pelas oscilações observadas na insolação. As curvas de $\cos h$ mantêm o mesmo padrão de variação, indicando que as interações seculares entre HD 219134b e HD 219134f produzem efeitos semelhantes nos dois regimes de rotação.

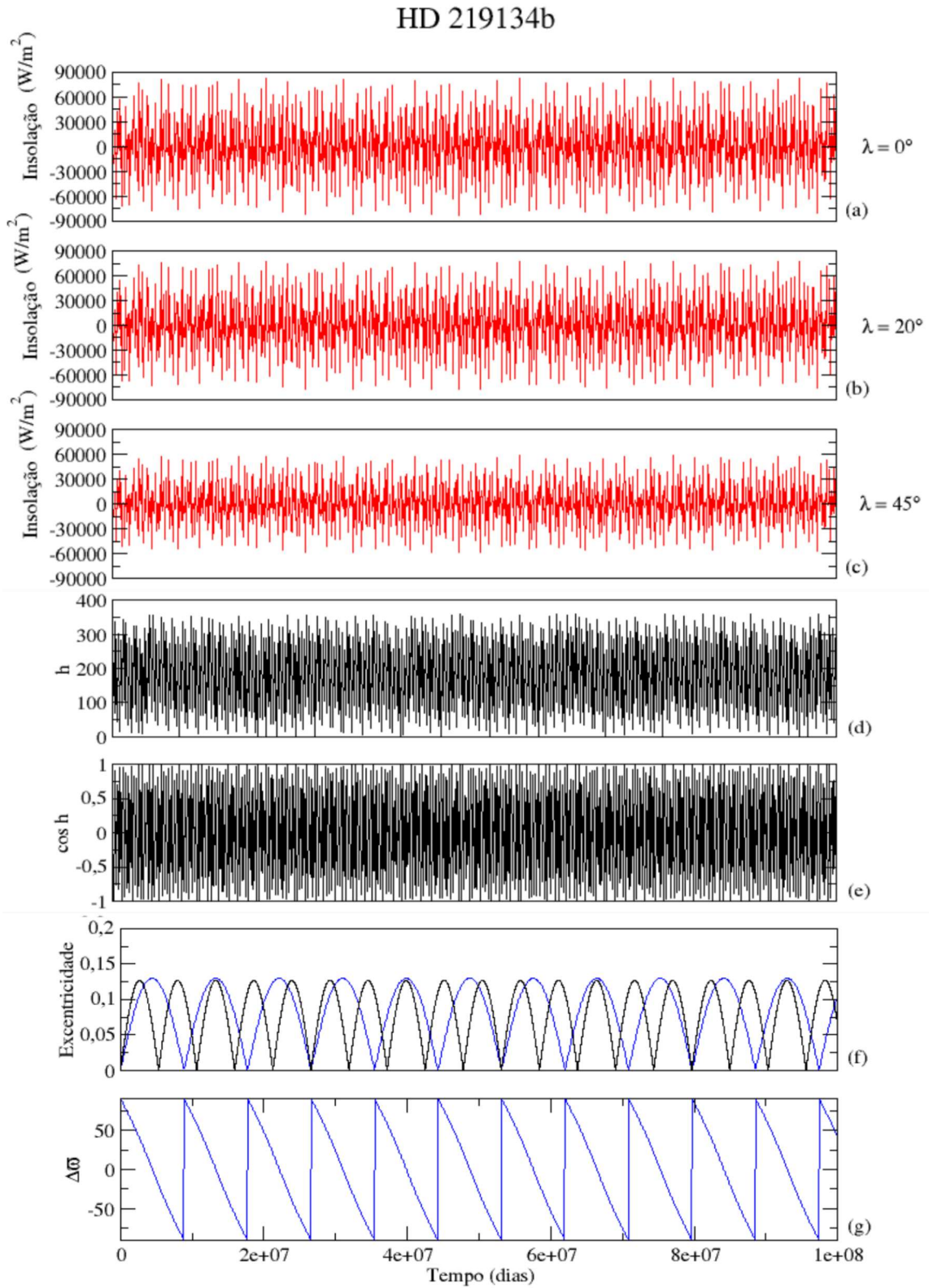


Figura 4.13: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta HD 219134b no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]

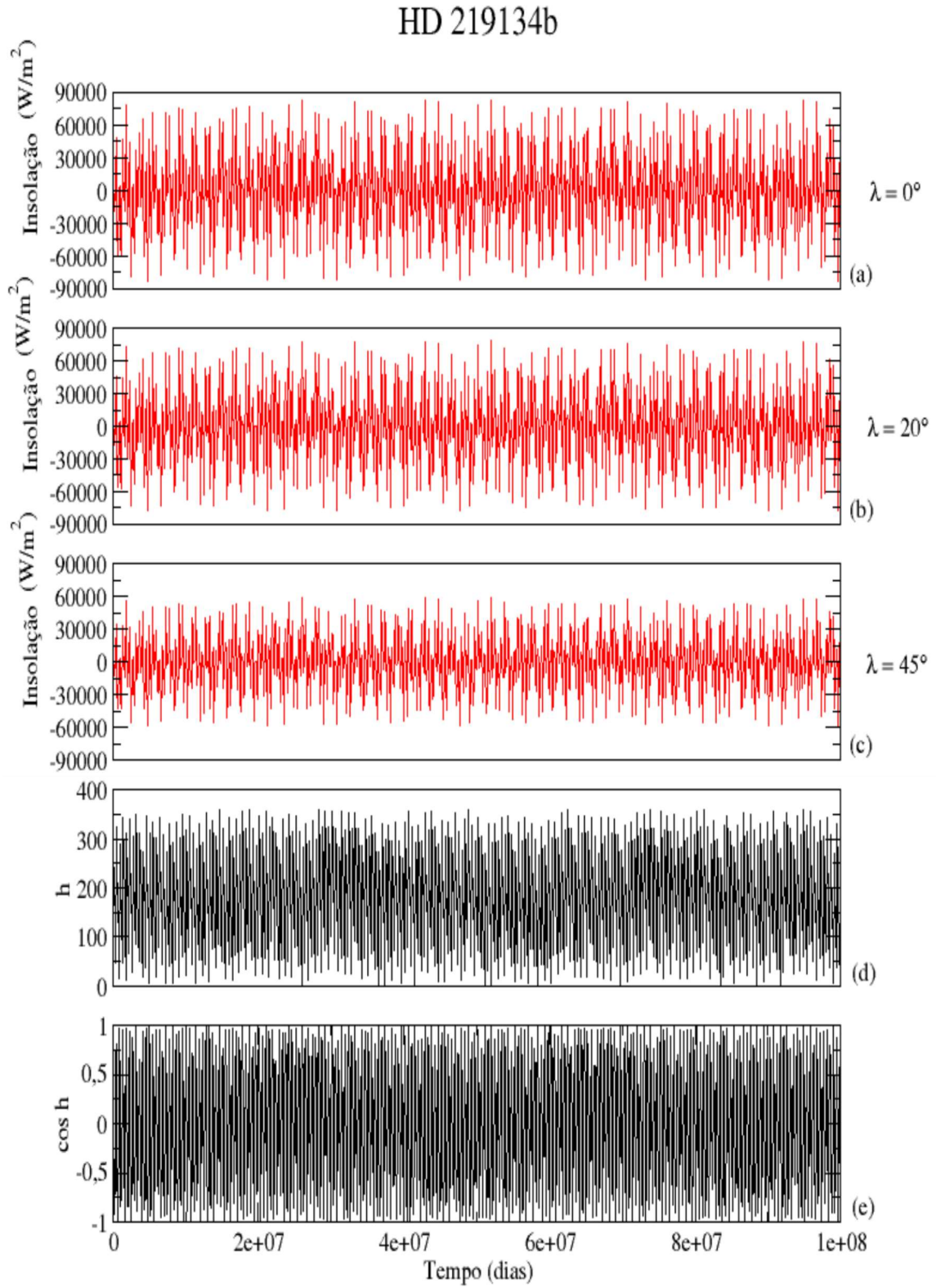


Figura 4.14: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta HD 219134b no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]

4.2.5 TRAPPIST-1d

TRAPPIST-1 é uma estrela de classe espectral M8V, uma anã vermelha ultrafria, ela se encontra a uma distância de 12 pc. O sistema planetário de TRAPPIST-1 conta com quatro super-Terras (TRAPPIST-1b[49], TRAPPIST-1c[49], TRAPPIST-1d[49] e TRAPPIST-1g[49]), e dois exoplanetas semelhantes a Terra (TRAPPIST-1e[49] e TRAPPIST-1h[49]).

Tabela 4.10: Dados do sistema TRAPPIST-1

Estrela	Massa	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsecs)
TRAPPIST-1	0.089 $M_{\odot}$ [50]	0.1992 $R_{\odot}$ [50]	0.00052 $L_{\odot}$ [51]	2566[50]	10.57
Planeta		e	p (dias)	$w(^{\circ})$	a (UA)
TRAPPIST-1b	1.374 $M_{\oplus}$ [17]	0.00622 [17]	1.510826 [52]	336.86 [17]	0.01154[17]
TRAPPIST-1c	1.308 $M_{\oplus}$ [52]	0.00654 [17]	2.421937[52]	282.45 [17]	0.01580 [17]
TRAPPIST-1d	0.388 $M_{\oplus}$ [52]	0.00837[17]	4.049219[52]	351.27 [17]	0.02227 [52]
TRAPPIST-1e	0.692 $M_{\oplus}$ [52]	0.00510[17]	6.101013[52]	108.37[17]	0.02925 [52]
TRAPPIST-1f	1.039 $M_{\oplus}$ [52]	0.01007[17]	9.207540[52]	8.81[17]	0.03849[52]
TRAPPIST-1g	1.321 $M_{\oplus}$ [52]	0.00208[17]	12.352446 [52]	191.34[17]	0.04683[52]
TRAPPIST-1h	0.326 $M_{\oplus}$ [52]	0.00567 [17]	18.772866 [52]	338.92 [17]	0.06189 [52]

A Figura [4.15] é uma representação do sistema planetário 55 Cancri em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas dos planetas são apresentadas em ordem crescente de distância à estrela, correspondendo a TRAPPIST-1 b (preto), TRAPPIST-1 c (vermelho), TRAPPIST-1 d (azul), TRAPPIST-1 e (amarelo), TRAPPIST-1 f (marom), TRAPPIST-1 g (roxo) e TRAPPIST-1 h (laranja). As órbitas foram assumidas coplanares. Os círculos em verde claro e verde escuro indicam, respectivamente, os limites interno e externo da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars. É possível observar que as órbitas de TRAPPIST-1d,e,f se encontram dentro da ZH, enquanto os outros planetas permanecem mais distantes, fora dos limites estabelecidos

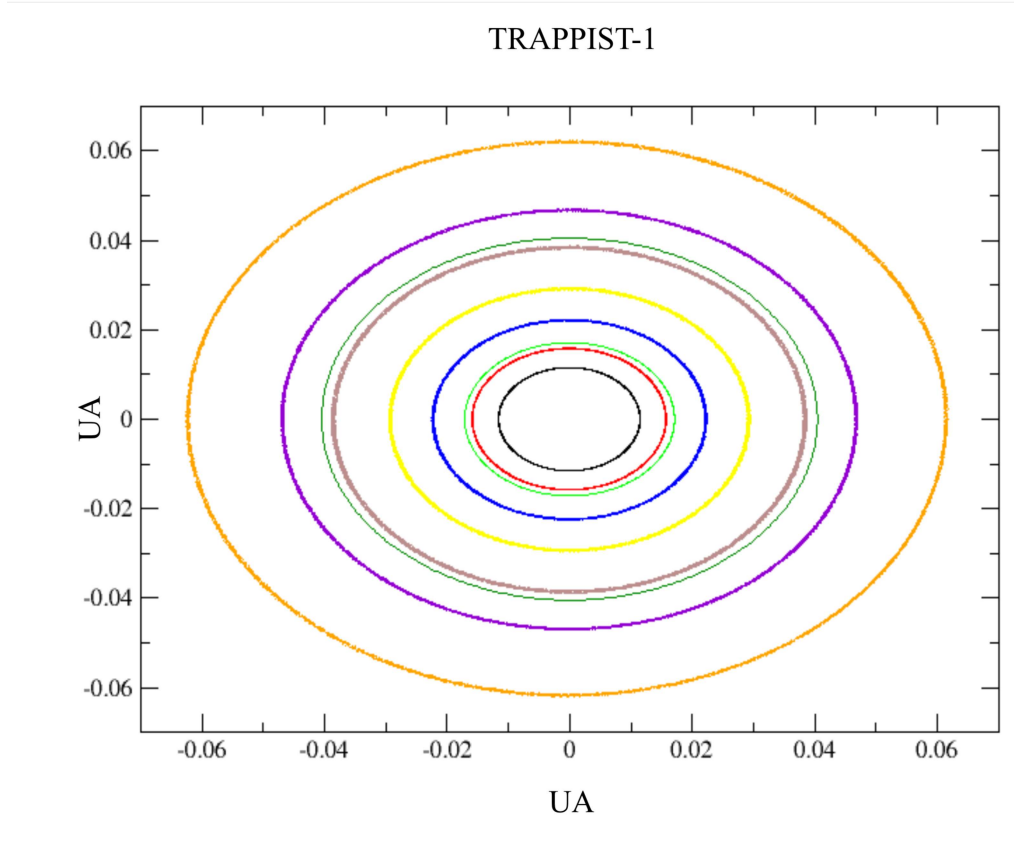


Figura 4.15: Representação do sistema planetário TRAPPIST-1 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas de TRAPPIST-1 b (preto), TRAPPIST-1 c (vermelho), TRAPPIST-1 d (azul), TRAPPIST-1 e (amarelo), TRAPPIST-1 f (marrom), TRAPPIST-1 g (roxo) e TRAPPIST-1 h (laranja) são mostradas, juntamente com os limites interno (verde claro) e externo (verde escuro) da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars.

Os exoplanetas TRAPPIST-1e e TRAPPIST-1f estão dentro da zona habitável de sua estrela, enquanto TRAPPIST-1d se encontra próximo à borda interna da zona habitável. A constante extrassolar de TRAPPIST-1d calculada é de 31.9 W/m^2

Na tabela [4.2.5] estão as condições iniciais do sistema composto por TRAPPIST-1d sendo perturbador por TRAPPIST-1c. As massas de TRAPPIST-1c e TRAPPIST-1d foram obtidas de Agol et al. 2021[52]. As Figuras [4.16] e [4.17] contêm as variações da insolação em TRAPPIST-1d para o sincronismo 2:1 e 3:2.

A Figura [4.16a, b, c] analisa a variação da insolação no caso de ressonância 2:1. De forma semelhante, a Figura [4.17a, b, c] apresenta a variação da insolação para a ressonância 3:2. Em ambas as situações, foram consideradas diferentes obliquidades planetárias, variando entre 0° , 20° e 45° .

Tabela 4.11: Massa e elementos orbitais para o sistema TRAPPIST-1d

	TRAPPIST-1c	TRAPPIST-1d
Massa (kg)	7.814×10^{24}	2.317×10^{24}
a (UA)	0.01580	0.02227
e	0.00654	0.00837
$I(^{\circ})$	0.0	0.0
$\varpi(^{\circ})$	282.45	351.27

A Figura [4.16g] apresenta a evolução da diferença entre as longitudes do peri-centro, representada por $\Delta\varpi$.

Na Figura [4.16e] podemos observar a variação de $\cos(h)$, uma função diretamente relacionada à insolação, como podemos ver na equação (3.5). Para TRAPPIST-1d no sincronismo 2:1, podemos ver que quando $h = 0^{\circ}$ ou 360° , ou seja, quando a face do planeta está diretamente voltada para a estrela, $\cos(h)$ atinge seu valor máximo, igual a 1. Este é o ponto de insolação máxima. Por outro lado, quando o ângulo horário se aproxima de 90° ou 270° , a insolação torna-se nula, com $\cos(h)$ tendendo a zero. A linha tracejada azul na Figura [4.18e] indica um ponto em que a insolação é zero, ou seja, quando $h = 90^{\circ}$; este ponto é representado pelo número I na Figura [4.18d], correspondendo a $\cos h = 0$. A linha violeta representa um ponto de insolação negativa máxima, quando $h = 180^{\circ}$ representado pelo número II na Figura [4.18d] com $\cos h = -1$, o que corresponde a uma situação em que o planeta está recebendo radiação na direção oposta àquela em que a insolação está sendo calculada. Finalmente, a linha verde indica um ponto em que a insolação volta a zero, em $h = 270^{\circ}$; de forma semelhante ao que acontece quando $\cos h = 90^{\circ}$. Este ponto é representado pelo número III na Figura [4.18d] e corresponde a $\cos h = 0$. As curvas de $\cos h$ apresentam diferentes padrões de variação, indicando que as interações seculares entre TRAPPIST-1d e TRAPPIST-1c produzem efeitos diferentes nos regimes de rotação analisados. Ao contrário do que foi observado nas subseções anteriores, em TRAPPIST-1d é possível observar que o ângulo horário apresenta uma variação mais lenta e periódica quando comparada com a excentricidade, que exibe oscilações rápidas. Essa diferença acontece porque a excentricidade é fortemente influenciada pelas perturbações gravitacionais entre os planetas, enquanto o ângulo horário está relacionado à rotação do planeta e à sua configuração de sincronismo spin-órbita. A Figura [4.16a, b, c, f] mostra que a insolação não acompanha diretamente as rápidas oscilações da excentricidade orbital. Embora a excentricidade varie rapidamente devido às perturbações gravitacionais entre os planetas do sistema, a insolação responde de forma mais lenta e regular. Já na Figura [4.16a, b, c, d] vemos que a insolação varia de acordo com o ângulo horário, indicando que as componentes rotacionais do exoplaneta têm mais influência sobre a dinâmica da insolação do que as variações orbitais, como a excentricidade.

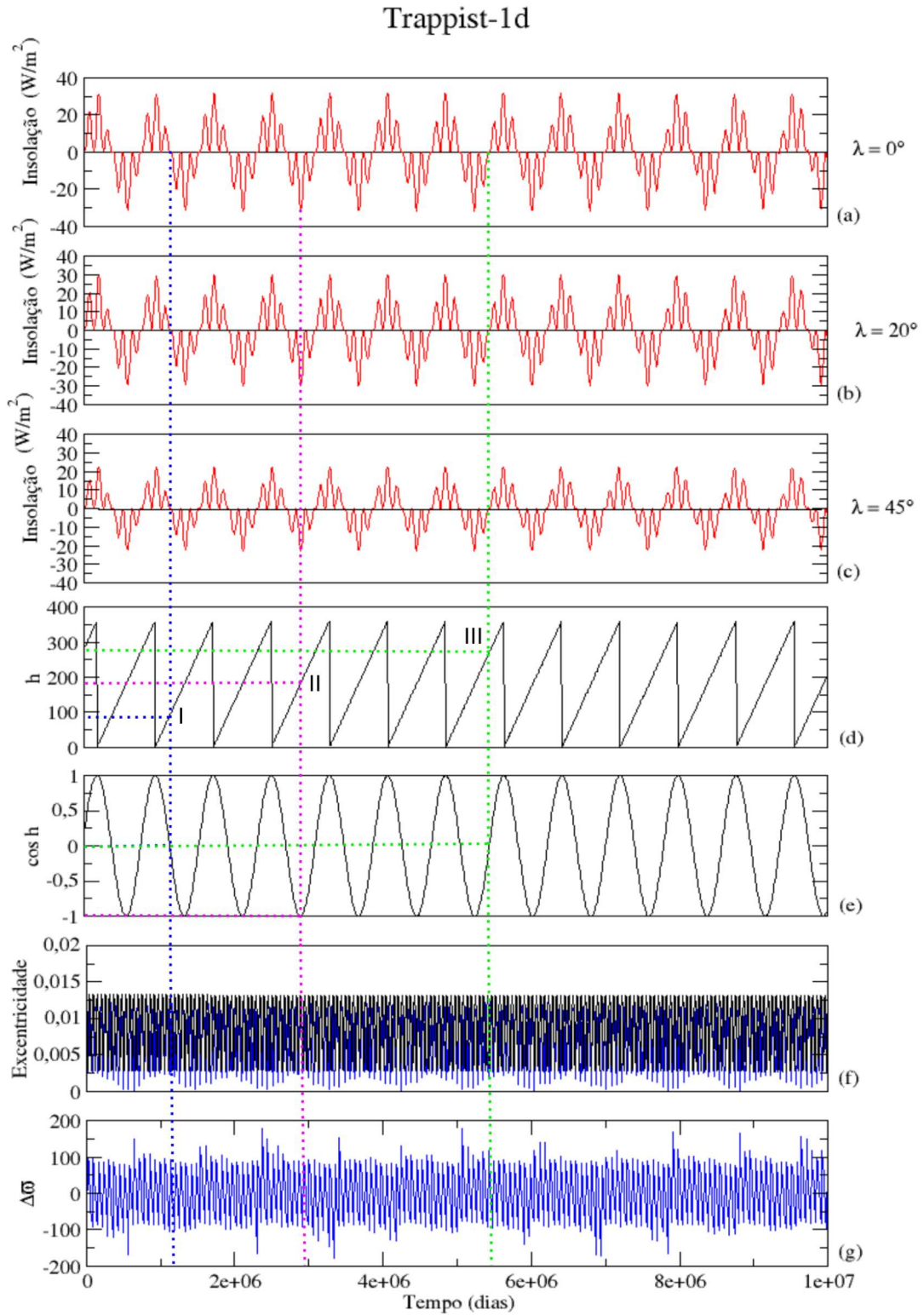


Figura 4.16: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1d no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]

TRAPPIST-1d

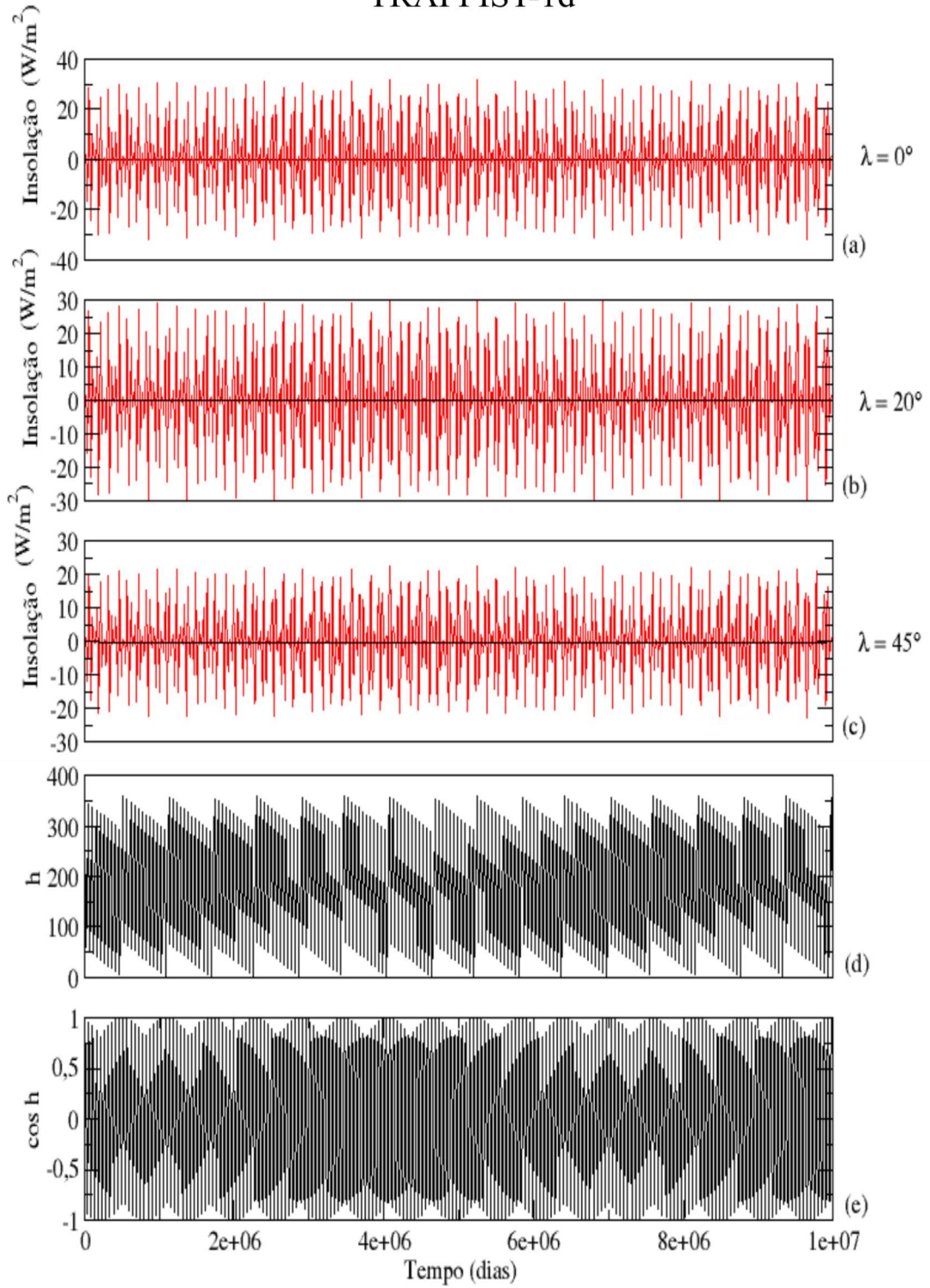


Figura 4.17: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1d no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]

4.2.6 TRAPPIST-1e

Na tabela [4.2.6] estão dadas as condições iniciais do sistema composto por TRAPPIST-1e, sendo perturbado por TRAPPIST-1g. As massas dos exoplanetas foram retiradas de Agol et al. 2021[52]. As Figuras [4.18] e [4.19] contêm a variação da insolação em TRAPPIST-1e para o sincronismo 2:1 e 3:2.

Tabela 4.12: Massa e elementos orbitais para o sistema TRAPPIST-1e

	TRAPPIST-1e	TRAPPIST-1g
Massa (kg)	4.132624×10^{24}	7.889012×10^{24}
a (UA)	0.02925	0.04683
e	0.00510	0.0208
$I(^{\circ})$	0.0	0.0
$\varpi(^{\circ})$	108.37	191.34

A Figura [4.18a, b, c] analisa a variação da insolação no caso de ressonância 2:1. De forma semelhante, a Figura [4.19a, b, c] apresenta a variação da insolação para a ressonância 3:2. Nos dois casos descritos, foram consideradas diferentes obliquidades planetárias, variando entre 0° , 20° e 45° . Em ambos as situações, observa-se que o aumento da obliquidade está diretamente relacionado à diminuição do valor máximo da insolação. A Figura [4.18g] apresenta a evolução da diferença entre as longitudes do pericentro, representada por $\Delta\varpi$.

Na Figura [4.19e] podemos observar a variação de $\cos(h)$. Para TRAPPIST-1e no sincronismo 3:2, podemos ver que quando $h = 0^{\circ}$ ou 360° , ou seja, quando a face do planeta está diretamente voltada para a estrela, $\cos(h)$ atinge seu valor máximo, igual a 1. Este é um ponto de insolação máxima. Por outro lado, quando o ângulo horário se aproxima de 90° ou 270° , a insolação, assim como $\cos(h)$ tendem a zero. A linha tracejada azul na Figura [4.19e] indica um ponto em que a insolação é zero, ou seja, quando $h = 90^{\circ}$; este ponto é representado pelo número I na Figura [4.19d], correspondendo a $\cos h = 0$. A linha violeta representa um ponto de insolação negativa máxima, quando $h = 180^{\circ}$ representado pelo número II na Figura [4.19d] com $\cos h = -1$, o que corresponde a uma situação em que o planeta está recebendo radiação na direção oposta àquela em que a insolação está sendo calculada. Finalmente, a linha verde indica um ponto em que a insolação volta a zero, em $h = 270^{\circ}$; de forma semelhante ao que acontece quando $\cos h = 90^{\circ}$. Este ponto é representado pelo número III na Figura [4.19d] e corresponde a $\cos h = 0$.

As curvas de $\cos h$ apresentam diferentes padrões de variação, indicando que as interações seculares entre TRAPPIST-1e e TRAPPIST-1g produzem efeitos diferentes nos regimes de rotação analisados.

De modo análogo a TRAPPIST-1d, em TRAPPIST-1e é possível observar que o ângulo horário apresenta uma variação mais lenta e periódica quando comparada com a excentricidade, que exibe oscilações rápidas. Essa diferença acontece porque a excentricidade é fortemente influenciada pelas perturbações gravitacionais entre os planetas, enquanto o ângulo horário está relacionado à rotação do planeta e à sua configuração de sincronismo spin-órbita.

TRAPPIST-1e

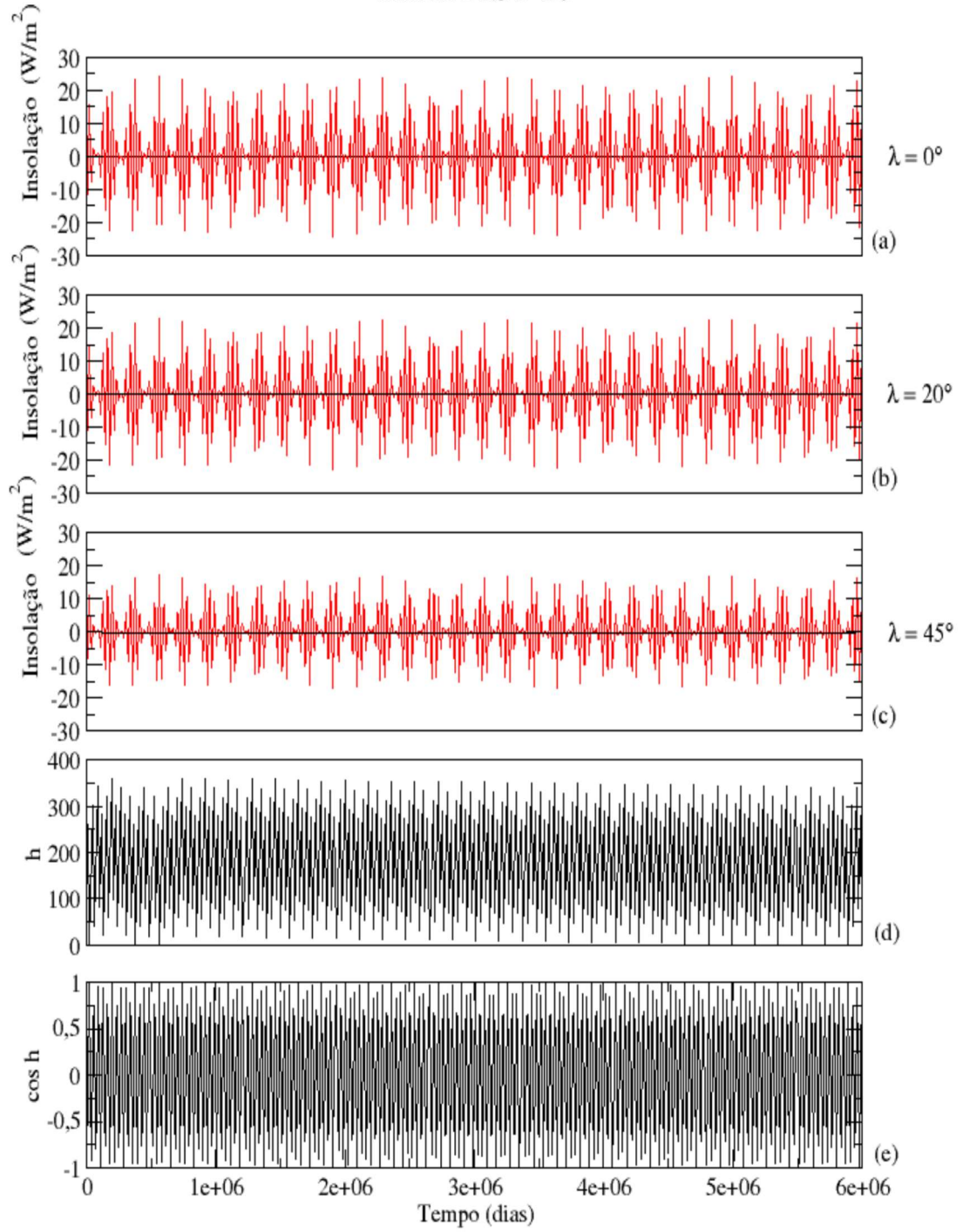


Figura 4.18: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1e no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]

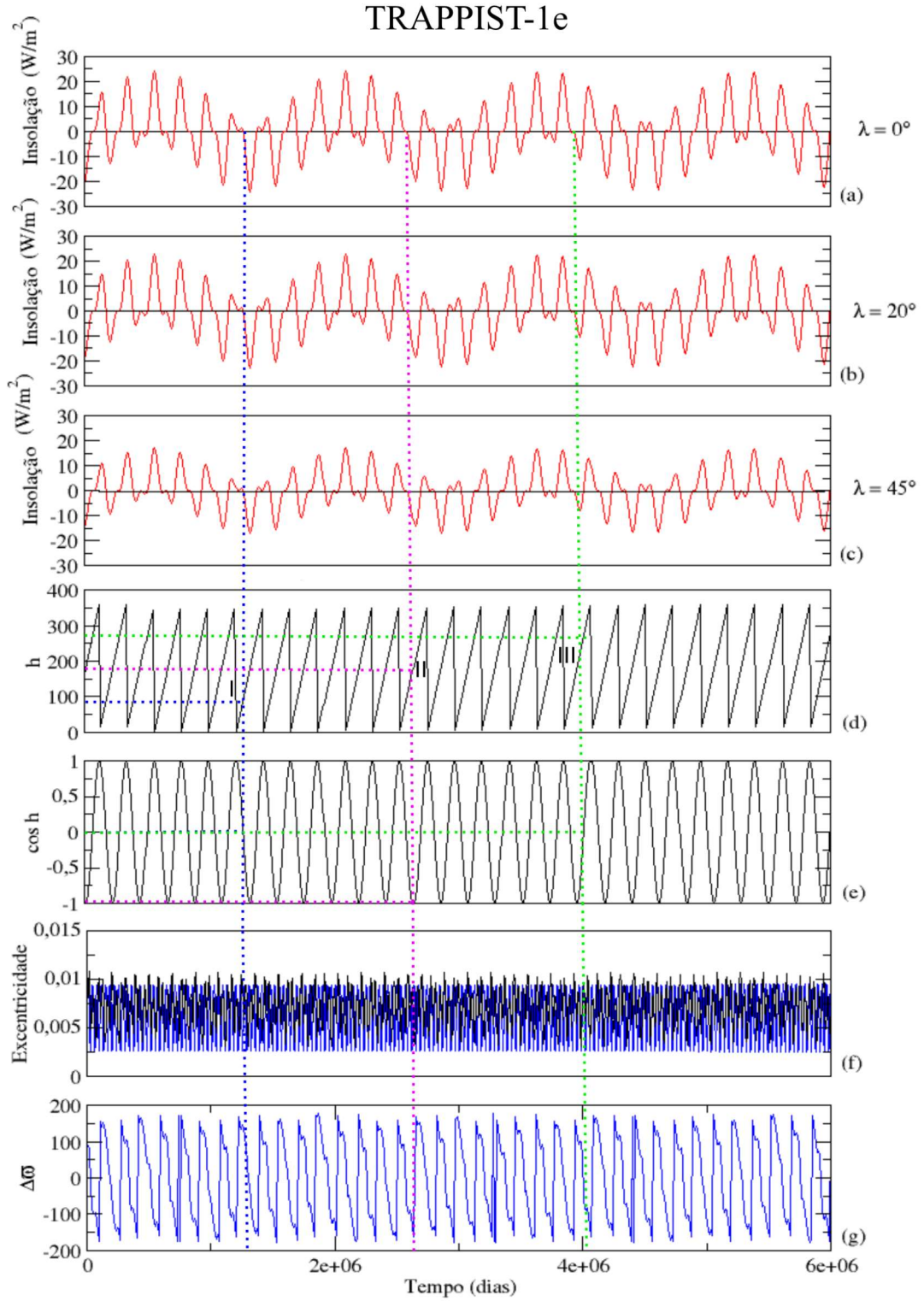


Figura 4.19: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1e no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]

4.2.7 TRAPPIST-1f

Na tabela [4.2.7] estão as condições iniciais do sistema composto por TRAPPIST-1f, com perturbação causada por TRAPPIST-1c. As massas dos exoplanetas foram retiradas de Agol et al. 2021[52]. As Figuras [4.20] e [4.21] contêm a variação da insolação em TRAPPIST-1f para o sincronismo 2:1 e 3:2.

Tabela 4.13: Massa e elementos orbitais para o sistema TRAPPIST-1f

	TRAPPIST-1c	TRAPPIST-1f
Massa (kg)	7.814×10^{24}	6.204908×10^{24}
a (UA)	0.01580	0.03849
e	0.00654	0.01007
$I(^{\circ})$	0.0	0.0
$\varpi(^{\circ})$	282.45	8.81

A Figura [4.20a, b, c] analisa a variação da insolação no caso de ressonância 2:1. De forma semelhante, a Figura [4.21a, b, c] apresenta a variação da insolação para a ressonância 3:2. Em ambas as situações, foram consideradas diferentes obliquidades planetárias, variando entre 0° , 20° e 45° . Em ambos os casos, observa-se que o aumento da obliquidade está diretamente relacionado à diminuição do valor máximo da insolação.

Na Figura [4.21e] podemos observar a variação de $\cos(h)$. Para TRAPPIST-1f no sincronismo 3:2, podemos ver que quando $h = 0^{\circ}$ ou 360° , ou seja, quando a face do planeta está diretamente voltada para a estrela, $\cos(h)$ atinge seu valor máximo, igual a 1. Este é o ponto de insolação máxima. Por outro lado, quando o ângulo horário se aproxima de 90° ou 270° , a insolação, assim como $\cos(h)$ tendem a zero. A linha tracejada azul na Figura [4.21e] indica um ponto em que a insolação é zero, ou seja, quando $h = 90^{\circ}$; este ponto é representado pelo número I na Figura [4.21d], correspondendo a $\cos h = 0$. A linha violeta representa um ponto de insolação negativa máxima, quando $h = 180^{\circ}$ representado pelo número II na Figura [4.21d] com $\cos h = -1$, o que corresponde a uma situação em que o planeta está recebendo radiação na direção oposta àquela em que a insolação está sendo calculada. Finalmente, a linha verde indica um ponto em que a insolação volta a zero, em $h = 270^{\circ}$; de forma semelhante ao que acontece quando $\cos h = 90^{\circ}$. Este ponto é representado pelo número III na Figura [4.21d] e corresponde a $\cos h = 0$.

Na Figura [4.21] podemos observar a relação entre a excentricidade orbital e a variação da insolação recebida pelo exoplaneta. Nota-se que alguns picos de excentricidade coincidem com os máximos de insolação, o que sugere a existência de ciclos periódicos de aquecimento e resfriamento, análogos aos ciclos de Milankovitch observados na Terra. Esses ciclos, conhecidos por afetar significativamente o clima

terrestre em escalas de tempo geológicas, poderiam exercer papel semelhante na estabilidade térmica e na evolução climática do exoplaneta. Além disso, é possível perceber que o padrão de variação do ângulo horário apresenta uma relação com as oscilações da excentricidade, indicando que as componentes de curto período interagem com as variações seculares da insolação. Essa relação reforça a hipótese de que tanto as perturbações rotacionais de curto período quanto as variações orbitais de longo período influenciam de maneira conjunta o regime de insolação do exoplaneta, caracterizando a quantidade de energia recebida pelo planeta ao longo do tempo.

As curvas de $\cos(h)$ apresentam diferentes padrões de variação, indicando que as interações seculares entre TRAPPIST-1f e TRAPPIST-1c produzem efeitos diferentes nos regimes de rotação analisados.

TRAPPIST-1f

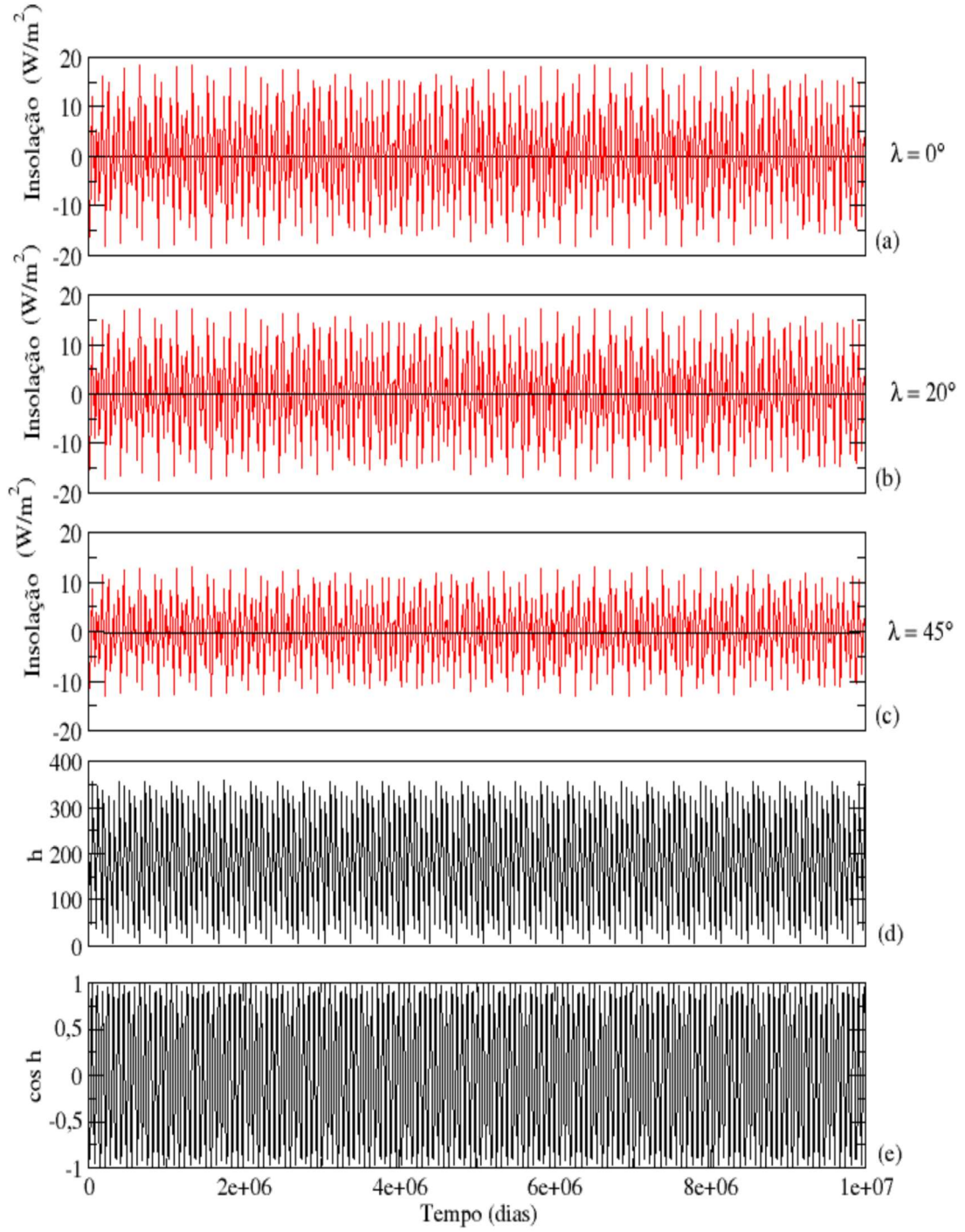


Figura 4.20: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1f no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]

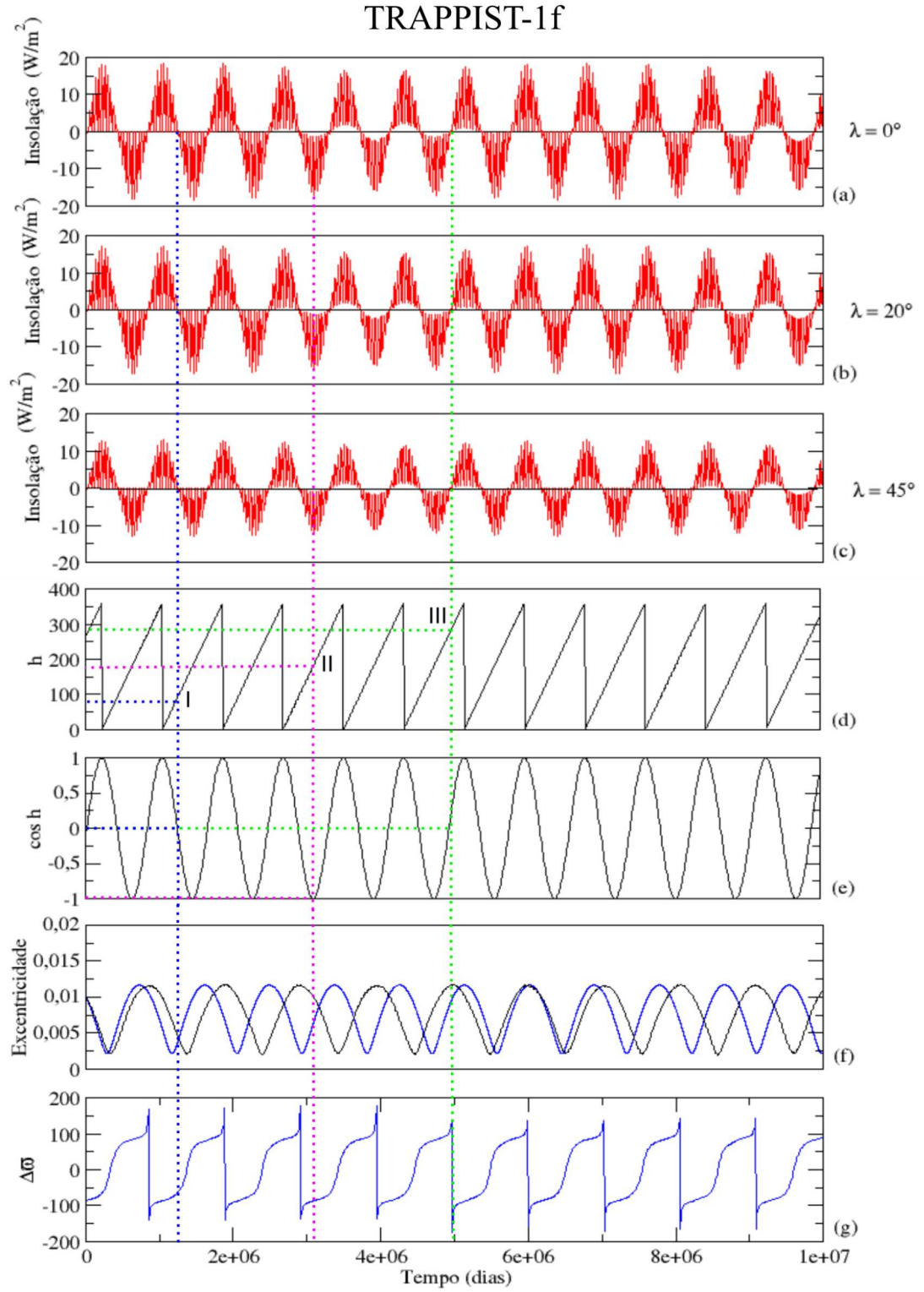


Figura 4.21: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta TRAPPIST-1f no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]

4.2.8 LP 791-18d

LP 791-18 é uma estrela de classe espectral M6V, uma anã vermelha, ligeiramente maior e mais quente que TRAPPIST-1, ela se encontra a uma distância de 26.6 pc. O sistema planetário de LP 791-18 conta com um planeta terrestre (LP 791-18b[53]), um exoplaneta do tipo super-Terra (LP 791-18d[54]) e um planeta que pode ser uma super-Terra ou um planeta tipo Netuno (LP 791-18c[53]). A tabela [4.2.8] contém os dados do sistema LP 971-18.

Tabela 4.14: Dados do sistema LP 791-18

Estrela	Massa	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsecs)
LP 791-18	$0.139 M_{\odot}$ [54]	$0.18 R_{\odot}$ [54]	$0.00229 L_{\odot}$ [54]	2960 [54]	26.6
Planeta		e	P (dias)	$w(^{\circ})$	a (UA)
LP 791-18b	$1.94 M_{\oplus}$ [55]	-	0.9479981 [54]	-	0.00978 [54]
LP 791-18c	$7.1 M_{\oplus}$ [54]	0.000080 [54]	4.9899093 [54]	-	0.02961 [54]
LP 791-18d	$0.90 M_{\oplus}$ [54]	0.00150 [54]	2.753436 [54]	-	0.01992 [54]

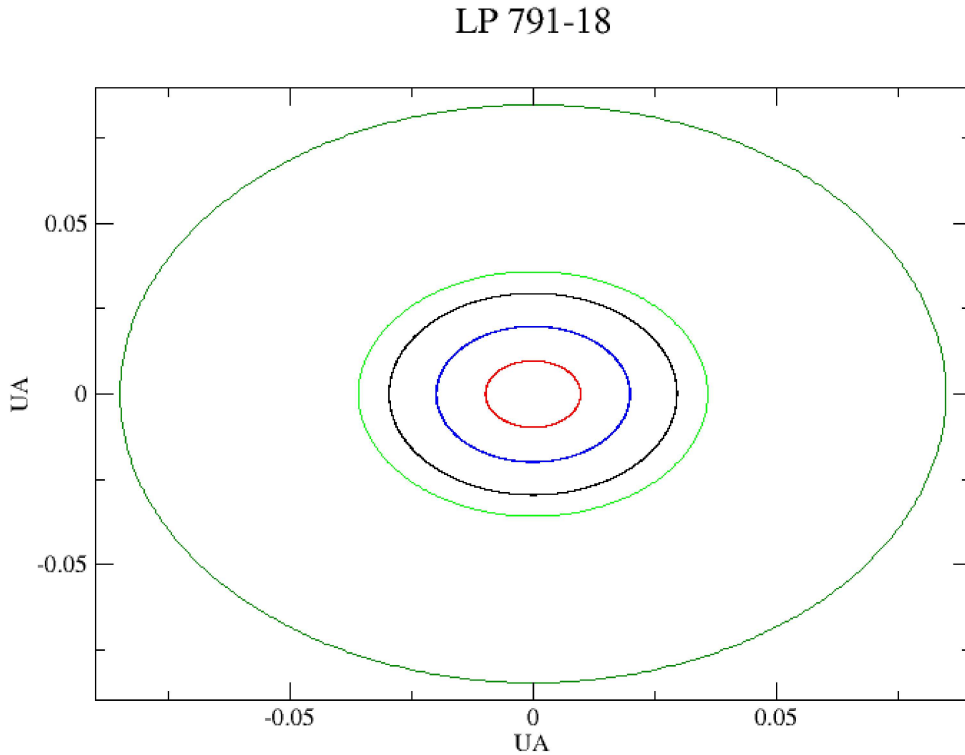


Figura 4.22: Representação do sistema planetário LP 971-18, assim como de sua zona habitável

Todos os planetas do sistema LP 791-18 orbitam sua estrela muito mais próximos do que o planeta Mercúrio em relação ao sol. A constante extrassolar de LP 791-18c calculada é de 136 W/m^2

A Fig. [4.22] é uma representação do sistema planetário LP 791-18 em coordenadas cartesianas no plano orbital, com os eixos expressos em unidades astronômicas (UA). As órbitas dos planetas são apresentadas em ordem crescente de distância à estrela, correspondendo a LP 791-18b (vermelho), LP 791-18d (azul) e LP 791-18c (preto). As órbitas foram assumidas coplanares. Os círculos em verde claro e verde escuro indicam, respectivamente, os limites interno e externo da zona habitável, definidos pelos critérios de Recent Venus e Early Mars. De acordo com os parâmetros adotados neste trabalho para o cálculo da ZH, o exoplaneta LP 791-18 d encontra-se fora da zona habitável estimada para sua estrela hospedeira. Esse resultado difere das conclusões apresentadas por Peterson et al. (2023)[54] e Ferraz-Mello et al. (2025)[56]. No entanto, decidimos manter os valores aqui obtidos; consequentemente, LP 791-18 d não está localizado próximo à zona habitável neste estudo. Na tabela [4.2.8] estão as condições iniciais do sistema composto por LP 791-18d, sendo perturbado por LP 791-18c. As massas de LP 791-18c e LP 791-18d foram obtidas de Peterson et al. 2023 [54]. As Figuras [4.23] e [4.24] contêm a variação da insolação em LP 791-18d para o sincronismo 2:1 e 3:2, respectivamente.

Tabela 4.15: Massa e elementos orbitais para o sistema LP 791-18

	LP 791-18c	LP 791-18d
Massa (kg)	4.23941×10^{25}	6.204908×10^{24}
a (UA)	0.02961	0.01992
e	0.00008	0.00150
$I(^{\circ})$	0.0	0.0
$\varpi(^{\circ})$	0.0	0.0

A Figura [4.23a, b, c] analisa a variação da insolação no caso de ressonância 2:1. De forma semelhante, a Figura [4.24a, b, c] apresenta a variação da insolação para a ressonância 3:2. Em ambas as situações, foram consideradas diferentes obliquidades planetárias, variando entre 0° , 20° e 45° . Na Fig. [4.24] observa-se um comportamento diferente do obtido para a ressonância 2:1, como é possível observar na evolução temporal dos parâmetros orbitais. As curvas de $\cos(h)$ apresentam diferentes padrões de variação, indicando que as interações seculares entre LP 791-18d e LP 791-18c produzem efeitos diferentes nos regimes de rotação analisados. Embora os padrões de variação para h e $\cos h$ sejam diferentes nos dois regimes analisados, a insolação apresenta comportamentos semelhantes. Isso indica que, mesmo com diferenças na evolução do ângulo horário, os padrões de insolação se mantêm semelhantes nos dois regimes estudados.

LP 791-18d

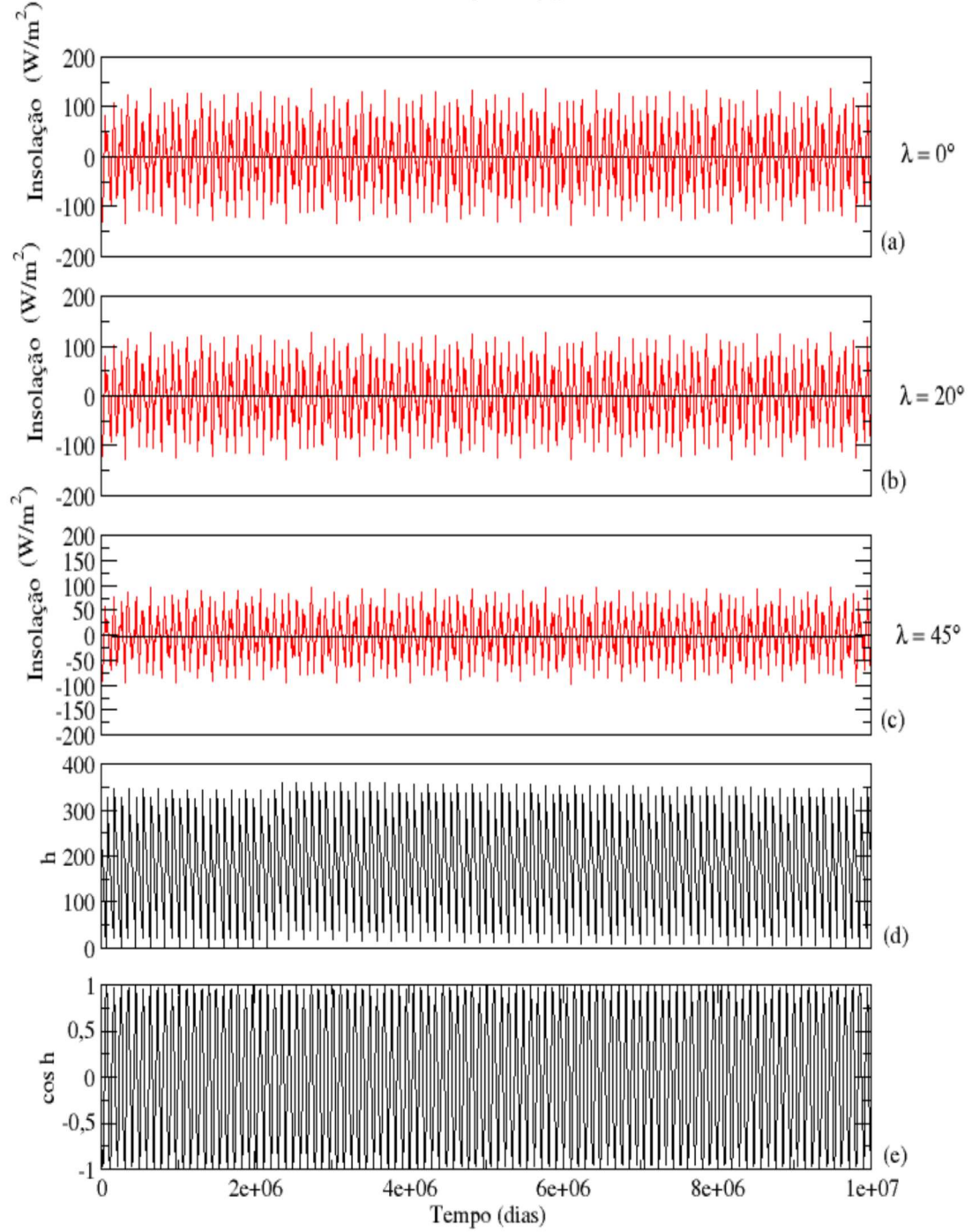


Figura 4.24: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta LP791-18d no regime de rotação assíncrona 3:2. A descrição dos quadros (a) - (e) é análoga à da Figura [4.4]

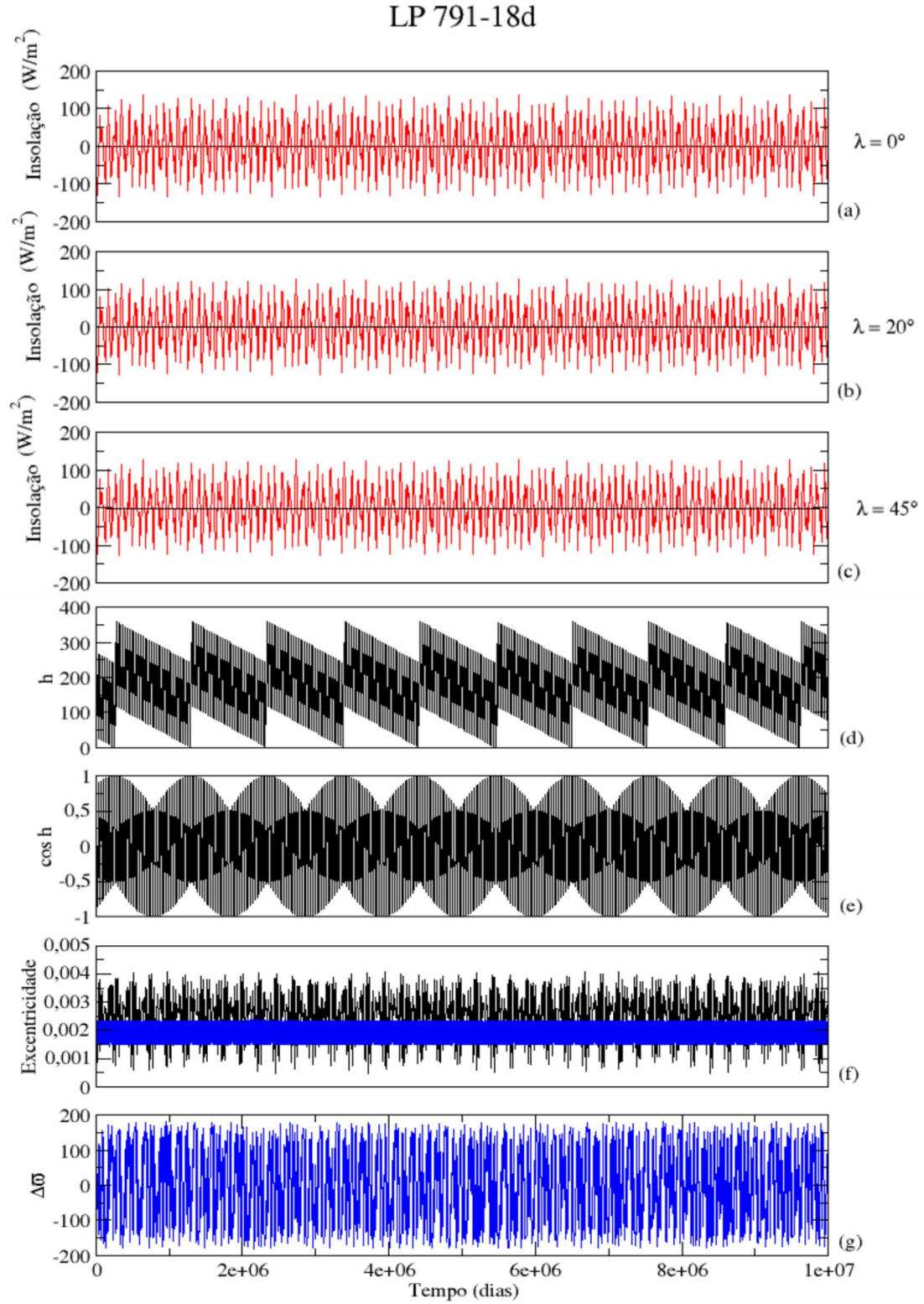


Figura 4.23: Evolução temporal dos parâmetros orbitais do exoplaneta LP 791-18d no regime de rotação assíncrona 2:1. A descrição dos quadros (a) - (g) é análoga à da Figura [4.4]

Capítulo 5

Conclusão

Neste trabalho, investigamos a variação da insolação em exoplanetas terrestres pertencentes sistemas multiplanetários. São considerados os casos síncrono e assíncrono para determinar a variação da insolação. A metodologia utilizada combinou integrações numéricas utilizando o software package Mercury em conjunto com a teoria secular, com o intuito de compreender como as interações gravitacionais entre os corpos podem influenciar parâmetros orbitais e, conseqüentemente, a habitabilidade de exoplanetas do tipo terrestre.

Inicialmente, revisamos e adaptamos a formulação proposta por Dobrovolskis (2007)[11] para o cálculo da insolação planetária, sendo necessário uma modificação essencial no ângulo horário. A introdução explícita do termo referente à longitude do pericentro, ϖ , que permitiu representar com maior precisão geometrias orbitais não alinhadas, garantindo que o modelo reproduzisse corretamente o deslocamento angular entre o periastro e o meridiano principal. Essa alteração mostrou-se fundamental para a correta descrição da insolação.

Com base nessa formulação, analisamos dois regimes principais: o caso síncrono 1:1, no qual a mesma face do planeta permanece voltada para a estrela, e o caso assíncrono, com ressonâncias spin-órbita 2:1 e 3:2, nos quais o planeta completa duas ou três rotações para cada órbita em torno da estrela. Para o caso síncrono, nossos resultados mostram que a excentricidade orbital é responsável por romper a constância da insolação, tendo papel central na caracterização da insolação, já que mesmo no regime síncrono, verificamos que a insolação apresenta pequenas variações sempre que a excentricidade orbital é diferente de zero, uma vez que a distância entre o planeta e a estrela se altera ao longo da órbita.

É importante ressaltar que, apesar de existir uma variação no valor da insolação, ainda estamos no caso síncrono, portanto, S não atinge valores negativos. Apesar da insolação variar com o tempo, por não apresentar valores de insolação negativos, ou seja, pela posição da estrela no céu do planeta não variar a ponto de iluminar o hemisfério oposto, a mesma face do planeta é constantemente iluminada.

Enquanto que no caso assíncrono, os resultados mostram que a dinâmica orbital do sistema exerce um papel fundamental na caracterização da insolação, revelando variações periódicas associadas às mudanças no ângulo horário e à excentricidade orbital. Essas oscilações refletem a dinâmica entre rotação e translação, influenciada pelas perturbações seculares de planetas vizinhos. Em ambos os casos, é possível destacar a influência da obliquidade.

Através da comparação entre os diferentes sistemas analisados, verificamos que planetas muito próximos de suas estrelas, como WASP-47e, HD 219134b e 55 Cancri-e, apresentam insolação extrema, sendo, portanto, pouco favoráveis à habitabilidade, uma vez que a existência de água em estado líquido em suas superfícies é improvável. Em contraste, planetas como K2-18b, LP 791-18d e Trappist-1d, e, f exibem valores de insolação mais moderados, com K2-18b tendo valores muito próximos do terrestre.

Os exoplanetas Trappist-1d [4.16], Trappist-1e [4.19] e Trappist-1f [4.21] apresentam pontos (I, II e III) que destacam momentos específicos da variação da insolação. A insolação atinge seu valor máximo quando $h = 0^\circ$ ou $h = 360^\circ$, correspondendo ao instante em que a estrela se encontra diretamente acima do observador, isto é, quando $\cos h = 1$. À medida que o ângulo horário evolui, a insolação diminui progressivamente, tornando-se nula em $h = 90^\circ$ e $h = 270^\circ$, momentos em que $\cos h = 0$. Esses instantes são representados pelos pontos I e III nas figuras mencionadas. Quando o ângulo horário atinge $h = 180^\circ$, a insolação assume seu valor negativo máximo, representando a condição em que a estrela se encontra no hemisfério oposto ao do observador, esse instante é identificado como o ponto II.

O comportamento descrito nas figuras representa o movimento aparente da estrela em relação ao observador: durante parte do ciclo, apenas um hemisfério do planeta recebe iluminação, mas, à medida que o ângulo horário evolui, o hemisfério iluminado se desloca. Assim, a região anteriormente voltada para o lado escuro passa gradualmente a receber radiação estelar, reproduzindo o efeito de um ciclo diurno completo.

Destaca-se o caso de Trappist-1f, em que picos de excentricidade coincidem com aumentos na insolação máxima, sugerindo a presença de ciclos análogos aos ciclos de Milankovitch observados na Terra. Esses resultados sugerem que processos orbitais de longo período podem provocar variações climáticas periódicas em outros sistemas planetários, com implicações diretas na estabilidade térmica e na manutenção de água líquida. A abordagem adotada fornece um modelo útil para o estudo de outros exoplanetas em regimes similares.

Dessa forma, concluímos que a potencial habitabilidade de exoplanetas em

sistemas multiplanetários não depende somente da sua posição na ZH, mas também da interação entre os corpos do sistema, uma vez que pequenas variações orbitais podem gerar impactos climáticos significativos ao longo de escalas de tempo muito longas.

Dessa forma, concluímos que a localização de um planeta dentro da zona habitável não garante, por si só, a existência de água líquida em sua superfície. A zona habitável deve ser interpretada como uma condição necessária, mas não suficiente, para a habitabilidade. A manutenção de água líquida depende de um conjunto de fatores adicionais, como a composição da atmosfera, o albedo, e os mecanismos de regulação térmica do planeta. Um exemplo interessante é Marte, que se encontra dentro da zona habitável do Sol, mas que atualmente não apresenta água líquida estável em sua superfície devido, principalmente, à perda significativa de sua atmosfera ao longo de sua evolução.

De forma análoga, os resultados deste trabalho indicam que a potencial habitabilidade de exoplanetas em sistemas multiplanetários não depende apenas de sua posição em relação à zona habitável, mas também da dinâmica orbital do sistema. As interações gravitacionais entre os planetas podem induzir variações seculares nos parâmetros orbitais, especialmente na excentricidade, modificando a distribuição espacial e temporal da insolação ao longo de escalas de tempo geológicas, influenciando diretamente a capacidade de um planeta em sustentar condições favoráveis à água líquida, e consequentemente à vida.

Além disso, observou-se que, em alguns casos, a insolação responde de forma semelhante em diferentes regimes de rotação, mesmo quando os padrões de variação do ângulo horário e de seu cosseno diferem. Isso indica que a insolação média é mais sensível às variações de excentricidade e obliquidade do que às oscilações rotacionais de curto período, destacando a importância dos efeitos seculares de longo prazo na evolução climática planetária.

Em resumo, este estudo apresentou uma abordagem cinemática para estimar a insolação em exoplanetas sujeitos a perturbações seculares, demonstrando que a inclusão da longitude do pericentro na definição do ângulo horário é fundamental para o realismo físico do modelo. Os resultados obtidos contribuem para o entendimento de como a dinâmica orbital pode caracterizar a habitabilidade em outros sistemas planetários. Assim, a pesquisa aqui desenvolvida reforça a ideia de que ciclos orbitais e ressonâncias spin-órbita desempenham papel essencial na evolução climática de planetas distantes do Sistema Solar.

Referências

- [1] M. M. Milankovitch. Canon of insolation and the iceage problem. *Koniglich Serbische Akademie Beograd Special Publication*, 132, 1941.
- [2] A. Berger. The Milankovitch astronomical theory of paleoclimates: a modern review. *Vistas in Astronomy*, 24:103–122, 1980.
- [3] N. Scafetta. Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72 (13):951–970, 2010.
- [4] R. M. Ramirez. A more comprehensive habitable zone for finding life on other planets. *Geosciences*, 8(8):280, 2018.
- [5] S. H. Dole. Habitable planets for man. 1964.
- [6] S. I. Rasool and C. de Bergh. The runaway greenhouse and the accumulation of co2 in the venus atmosphere. *Nature*, 226(5250):1037–1039, 1970.
- [7] J. F. Kasting. Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of earth and venus. *Icarus*, 74(3):472–494, 1988.
- [8] D. P. Whitmire and R. T. Reynolds J. F. Kasting. Habitable zones for earth-like planets around main sequence stars. In *Bioastronomy: The Search for Extra-terrestrial Life—The Exploration Broadens*, pages 173–178. Springer, 1991.
- [9] R. K. Kopparapu, R. Ramirez, J. F. Kasting, V. Eymet, T. D. Robinson, S. Mahadevan, R. C. Terrien, S. Domagal-Goldman, V. Meadows, and R. Deshpande. Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *The Astrophysical Journal*, 765(2):131, 2013.
- [10] J. F. Kasting, D. P. Whitmire, and R. T. Reynolds. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 101(1):108–128, 1993.
- [11] A. R. Dobrovolskis. Spin states and climates of eccentric exoplanets. *Icarus*, 192(1):1–23, 2007.
- [12] N. Callegari and A. Rodríguez. Dynamics of rotation of super-earths. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 116:389–416, 2013.

- [13] T. Lichtenberg and Y. Miguel. Super-earths and earth-like exoplanets. *arXiv preprint arXiv:2405.04057*, 2024.
- [14] R. Hu, A. Bello-Arufe, A. Tokadjian, J. Yang, M. Damiano, P.-A. Roy, L.-P. Coulombe, N. Madhusudhan, S. Constantinou, and B. Benneke. A water-rich interior in the temperate sub-neptune k2-18 b revealed by jwst. *arXiv preprint arXiv:2507.12622*, 2025.
- [15] T. G. Meier, D. J. Bower, T. Lichtenberg, M. Hammond, and P. J. Tackley. Interior dynamics of super-earth 55 cancri e. *Astronomy & Astrophysics*, 678: A29, 2023.
- [16] R. Ligi, C. Dorn, A. Crida, Y. Lebreton, O. Creevey, F. Borsa, D. Mourard, N. Nardetto, I. Tallon-Bosc, F. Morand, et al. From the stellar properties of hd 219134 to the internal compositions of its transiting exoplanets. *Astronomy & Astrophysics*, 631:A92, 2019.
- [17] S. L. Grimm, B.-O. Demory, M. Gillon, C. Dorn, E. Agol, A. Burdanov, L. Delrez, M. Sestovic, A. H. M. J. Triaud, M. Turbet, et al. The nature of the trappist-1 exoplanets. *Astronomy & Astrophysics*, 613:A68, 2018.
- [18] E. T. Wolf. Assessing the habitability of the trappist-1 system using a 3d climate model. *The Astrophysical Journal Letters*, 839(1):L1, 2017.
- [19] M. Greklek-McKeon, H. A. Knutson, W. G. Levine, R. Hu, M. Saidel, J. G. Barrientos, K. Batygin, and B. Benneke. Updated mass, eccentricity, and tidal heating constraints for the earth-sized planet lp 791-18 d. *The Astronomical Journal*, 170(2):65, 2025.
- [20] J. E. Chambers. Mercury: A software package for orbital dynamics. *Astrophysics Source Code Library*, pages ascl-1201, 2012.
- [21] C. D. Murray and S. F. Dermott. *Solar system dynamics*. Cambridge university press, 1999.
- [22] NASA’s Exoplanet Exploration Program. Nasa exoplanet archive. Disponível em: [urlhttps://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/) Acesso em: 20/04/2025, 2025.
- [23] M. Bartuccelli, J. Deane, and G. Gentile. Periodic and quasi-periodic attractors for the spin-orbit evolution of mercury with a realistic tidal torque. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(1):127–150, 2017.
- [24] D. Brouwer and G. M. Clemence. *Methods of celestial mechanics*. Elsevier, 2013.

- [25] B. T. Montet, T. D. Morton, D. Foreman-Mackey, J. A. Johnson, D. W. Hogg, B. P. Bowler, D. W. Latham, A. Bieryla, and A. W. Mann. Stellar and planetary properties of k2 campaign 1 candidates and validation of 17 planets, including a planet receiving earth-like insolation. *The Astrophysical Journal*, 809(1):25, 2015.
- [26] R. Cloutier, N. Astudillo-Defru, R. Doyon, X. Bonfils, J.-M. Almenara, B. Benneke, F. Bouchy, X. Delfosse, D. Ehrenreich, T. Forveille, et al. Characterization of the K2-18 multi-planetary system with harps-a habitable zone super-earth and discovery of a second, warm super-earth on a non-coplanar orbit. *Astronomy & Astrophysics*, 608:A35, 2017.
- [27] Encyclopaedia of Exoplanetary Systems. Exoplanet.eu. Disponível em: https://exoplanet.eu/catalog/k2_18_b--3953/. Acesso em: 24/02/2025., 2025.
- [28] NASA’s Exoplanet Exploration Program. Exoplanet exploration: Planets beyond our solar system. Disponível em: [://science.nasa.gov/exoplanet-catalog/K2-18-b/](https://science.nasa.gov/exoplanet-catalog/K2-18-b/). Acesso em: 24/02/2025, 2025.
- [29] P. Sarkis, T. Henning, M. Kürster, T. Trifonov, M. Zechmeister, L. Tal-Or, G. Anglada-Escudé, P. A. Hatzes, M. Lafarga, S. Dreizler, et al. The carmenes search for exoplanets around m dwarfs: A low-mass planet in the temperate zone of the nearby K2-18. *The Astronomical Journal*, 155(6):257, 2018.
- [30] G. Kopp and J. L. Lean. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1), 2011.
- [31] C. Hellier, D. R. Anderson, A. Collier Cameron, A. P. Doyle, A. Fumel, M. Gillon, E. Jehin, and M. Seven transiting hot jupiters from wasp-south, euler and trappist: Wasp-47b, wasp-55b, wasp-61b, wasp-62b, wasp-63b, wasp-66b and wasp-67b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426(1):739–750, 2012.
- [32] M. Neveu-VanMalle, D. Queloz, D. R. Anderson, D. J. A. Brown, A. Collier Cameron, L. Delrez, R. F. Díaz, M. Gillon, C. Hellier, E. Jehin, et al. Hot jupiters with relatives: discovery of additional planets in orbit around wasp-41 and wasp-47. *Astronomy & Astrophysics*, 586:A93, 2016.
- [33] J. C. Becker, A. Vanderburg, F. C. Adams, S. A. Rappaport, and H. M. Schwengel. Wasp-47: A hot jupiter system with two additional planets discovered by k2. *The Astrophysical Journal Letters*, 812(2):L18, 2015.
- [34] V. Nascimbeni, L. Borsato, T. Zingales, G. Piotto, I. Pagano, M. Beck, C. Broeg, D. Ehrenreich, S. Hoyer, F. Z. Majidi, et al. A new dynamical modeling of the wasp-47 system with cheops observations. *Astronomy & Astrophysics*, 673:A42, 2023.

- [35] E. M. Bryant and D. Bayliss. Revisiting wasp-47 with espresso and tess. *The Astronomical Journal*, 163(5):197, 2022.
- [36] J. M. Almenara, R. F. Diaz, X. Bonfils, and S. Udry. Absolute densities, masses, and radii of the wasp-47 system determined dynamically. *Astronomy & Astrophysics*, 595:L5, 2016.
- [37] A. Vanderburg, J. C. Becker, L. A. Buchhave, A. Mortier, E. Lopez, L. Malavolta, R. D. Haywood, D. W. Latham, D. Charbonneau, M. López-Morales, et al. Precise masses in the wasp-47 system. *The Astronomical Journal*, 154(6):237, 2017.
- [38] R. P. Butler, G. W. Marcy, E. Williams, H. Hauser, and P. Shirts. Three new “51 pegasi-type” planets. *The Astrophysical Journal*, 474(2):L115, 1997.
- [39] B. E. McArthur, M. Endl, W. D. Cochran, G. F. Benedict, D. A. Fischer, G. W. Marcy, R. P. Butler, D. Naef, M. Mayor, D. Queloz, et al. Detection of a neptune-mass planet in the ρ 1 cancri system using the hobby-eberly telescope. *The Astrophysical Journal*, 614(1):L81, 2004.
- [40] G. W. Marcy, R. P. Butler, D. A. Fischer, G. Laughlin, S. S. Vogt, G. W. Henry, and D. Pourbaix. A planet at 5 au around 55 cancri. *The Astrophysical Journal*, 581(2):1375, 2002.
- [41] D. A. Fischer, G. W. Marcy, R. P. Butler, S. S. Vogt, G. Laughlin, G. W. Henry, D. Abouav, K. M. G. Peek, J. T. Wright, J. A. Johnson, et al. Five planets orbiting 55 cancri. *The Astrophysical Journal*, 675(1):790, 2008.
- [42] L. L. Zhao, V. Kunovac, J. M. Brewer, J. Llama, S. C. Millholland, C. Hedges, A. E. Szymkowiak, R. M. Roettenbacher, S. H. C. Cabot, S. A. Weiss, et al. Measured spin–orbit alignment of ultra-short-period super-earth 55 cancri e. *Nature Astronomy*, 7(2):198–205, 2023.
- [43] V. Bourrier, X. Dumusque, C. Dorn, G. W. Henry, N. Astudillo-Defru, J. Rey, B. Benneke, G. Hébrard, C. Lovis, B.-O. Demory, et al. The 55 cancri system reassessed. *Astronomy & Astrophysics*, 619:A1, 2018.
- [44] B. E. Nelson, E. B. Ford, J. T. Wright, D. A. Fischer, K. von Braun, A. W. Howard, M. J. Payne, and S. Dindar. The 55 Cancri planetary system: fully self-consistent n-body constraints and a dynamical analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(1):442–451, 2014.
- [45] F. Motalebi, S. Udry, M. Gillon, C. Lovis, D. Ségransan, L. A. Buchhave, B.-O. Demory, L. Malavolta, C. D. Dressing, D. Sasselov, et al. The harps-n rocky planet search-i. hd 219134 b: A transiting rocky planet in a multi-planet system at 6.5 pc from the sun. *Astronomy & Astrophysics*, 584:A72, 2015.

- [46] S. S. Vogt, J. Burt, S. Meschiari, R. P. Butler, G. W. Henry, S. Wang, B. Holden, C. Gapp, R. Hanson, P. Arriagada, et al. Six planets orbiting hd 219134. *The Astrophysical Journal*, 814(1):12, 2015.
- [47] L. J. Rosenthal, B. J. Fulton, L. A. Hirsch, H. T. Isaacson, A. W. Howard, C. M. Dedrick, I. A. Sherstyuk, S. C. Blunt, E. A. Petigura, H. A. Knutson, et al. The california legacy survey. i. a catalog of 178 planets from precision radial velocity monitoring of 719 nearby stars over three decades. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 255(1):8, 2021.
- [48] M. Gillon, B.-O. Demory, V. Van Grootel, F. Motalebi, C. Lovis, A. Collier Cameron, D. Charbonneau, D. Latham, E. Molinari, F. A. Pepe, et al. Two massive rocky planets transiting a k-dwarf 6.5 parsecs away. *Nature Astronomy*, 1(3):0056, 2017.
- [49] M. Gillon, E. Jehin, S. M. Lederer, L. Delrez, J. de Wit, A. Burdanov, V. Van Grootel, A. J. Burgasser, A. H. M. J. Triaud, C. Opitom, et al. Temperate earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star. *Nature*, 533(7602): 221–224, 2016.
- [50] C. Piaulet-Ghorayeb, B. Benneke, M. Turbet, K. Moore, P. A. Roy, O. Lim, R. Doyon, T. J. Fauchez, L. Albert, M. Radica, et al. Strict limits on potential secondary atmospheres on the temperate rocky exo-earth trappist-1 d. *The Astrophysical Journal*, 989(2):181, 2025.
- [51] V. Van Grootel, C. S. Fernandes, M. Gillon, E. Jehin, J. Manfroid, R. Scufflaire, A. J. Burgasser, K. Barkaoui, Z. Benkhaldoun, A. Burdanov, et al. Stellar parameters for trappist-1. *The Astrophysical Journal*, 853(1):30, 2018.
- [52] E. Agol, C. Dorn, S. L. Grimm, M. Turbet, E. Ducrot, L. Delrez, M. Gillon, B.-O. Demory, A. Burdanov, K. Barkaoui, et al. Refining the transit-timing and photometric analysis of trappist-1: masses, radii, densities, dynamics, and ephemerides. *The planetary science journal*, 2(1):1, 2021.
- [53] I. J. M. Crossfield, W. Waalkes, E. R. Newton, N. Narita, P. Muirhead, K. Ment, E. Matthews, A. Kraus, V. Kostov, M. R. Kosiarek, et al. A super-earth and sub-neptune transiting the late-type m dwarf lp 791-18. *The Astrophysical Journal*, 883(1):L16, 2019.
- [54] M. S. Peterson, B. Benneke, K. Collins, C. Piaulet, I. J. M. Crossfield, M. Ali-Dib, J. L. Christiansen, J. Gagné, J. Faherty, E. Kite, et al. A temperate earth-sized planet with tidal heating transiting an m6 star. *Nature*, 617(7962): 701–705, 2023.
- [55] NASA Exoplanet Science Institute. Lp 791-18 b - exoplanet catalog. <https://science.nasa.gov/exoplanet-catalog/lp-791-18-b/>, 2025. Acessado em: 10 Dez. 2025.

- [56] S. Ferraz-Mello, T. Menezes Bechara, and R. Alves-Silva. Tidal dissipation and synchronization of the temperate exo-earth lp 791-18d. *The European Physical Journal Special Topics*, pages 1–11, 2025.