

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Campus Duque de Caxias Professor Geraldo Cidade

Raquel Gomes Gonçalves Farias

Influência de características orbitais  
e atmosféricas na estabilidade da  
temperatura de exoplanetas

Duque de Caxias

2019

Raquel Gomes Gonçalves Farias

# Influência de características orbitais e atmosféricas na estabilidade da temperatura de exoplanetas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas: Biotecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito necessário para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas: Biotecnologia.

Professora Dr<sup>a</sup>. Beatriz Blanco Siffert.

Duque de Caxias  
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho por qualquer meio convencional ou eletrônico para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação (CIP)  
Ficha Catalográfica elaborada pelo autor

Farias, Raquel Gomes Gonçalves, 1997-

Influência de características orbitais e atmosféricas na estabilidade da temperatura de exoplanetas / Raquel Gomes Gonçalves Farias. Rio de Janeiro, 2019.

66 f. : il. color; 30 cm.

Orientador: Dr<sup>a</sup>. Beatriz Blanco Siffert.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Curso de Ciências Biológicas: Biotecnologia, 2019.

1. Astrobiologia. 2. Exoplanetas. 3. Sistema TRAPPIST-1. 4. Habitabilidade. I. Siffert, Beatriz Blanco. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. III. Campus Duque de Caxias Professor Geraldo Cidade. IV. Influência de características orbitais e atmosféricas na estabilidade da temperatura de exoplanetas.

CDD:

CDU:

Raquel Gomes Gonçalves Farias

INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS ORBITAIS E ATMOSFÉRICAS  
NA ESTABILIDADE DA TEMPERATURA DE EXOPLANETAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas: Biotecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito necessário para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas: Biotecnologia.

Aprovada em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Beatriz Blanco Siffert (Orientadora)  
Professora Adjunta Campus Duque de Caxias

---

Prof. Dr. Gustavo F. Porto de Mello (Coorientador)  
Professor Associado Observatório do Valongo

---

Prof. Dr. Luan Ghezzi Ferreira Pinho (Membro da Banca)  
Professor Adjunto Observatório do Valongo

---

Prof. Dr. Leonardo de Castro Palmieri (Membro da Banca)  
Professor Adjunto Campus Duque de Caxias

---

Dr. Marcelo Borges Fernandes (Revisor e Suplente)  
Pesquisador Titular Observatório Nacional

*à minha família e amigos...*

# Agradecimentos

Primeiramente, sou grata ao planeta Terra, por ainda possuir condições que permitem a minha existência e a de todos os diversos outros seres que aqui coabitam comigo.

Agradeço à minha mãe e pai, Mara e Mário, que foram as minhas partículas elementares. Sou grata por terem servido de estrutura para grande parte do que sou hoje e por sempre possibilitarem meus grandes saltos quânticos. Pai, logo você, que sempre tão atrasado, acabou se apressando para partir. Obrigada por me creditar, aceitar e apoiar até quando eu mesma não o fazia. Por mais que você se esforçasse, nenhum presente seu foi alguma vez melhor que a sua presença.

Agradeço ao Rafael, por ter sido garoa enquanto fui furacão. Parafraseando nosso querido Carl Sagan, diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer para mim dividir um planeta e uma época com você, obrigada.

Agradeço aos meus amigos da minha querida turma 2015.1, pela relação que nós temos como um grupo, ela será inesquecível, a gente se ajuda, a gente se apoia... E principalmente às Najas, meu grande obrigada. Tenho imenso orgulho, admiração e carinho por todas, cada uma de vocês tem uma luz intrínseca e singular. Sou grata e feliz pela sorte de conhecer vocês e compartilhar essa jornada.

Obrigada a todos os meus amigos que, de alguma forma, contribuíram para manter a sanidade da que vos fala. Seja tomando um café da tarde ou dividindo uma dose dupla de chope; seja discutindo sobre o significado da existência ou jogando uma partida de Magic; seja aturando os meus surtos de militância e desilusão.

À minha companheira de grupo de pesquisa, Anna Beatriz, por dividir esse projeto e pelos rolês astrobiológicos, obrigada. Ao meu coorientador, Gustavo Porto de Mello, muito obrigada por possibilitar e ajudar nessa caminhada científica.

À minha orientadora, Beatriz Siffert, deixo minha admiração e meu obrigada. Agradeço imensamente pela paciência, confiança, apoio e conhecimento compartilhado.

Aos professores Dr. Luan Ghezzi, Dr. Leonardo Palmieri, por aceitarem de prontidão serem membros da banca avaliadora e ao Dr. Marcelo Borges, pela revisão minuciosa.

À agência de fomento CNPq, pelo suporte para a realização do projeto.

À todos, citados ou não, que fizeram parte dessa caminhada, muito obrigada.

*“It’s not what the world holds for you.  
It’s what you bring to it”.*

*— Anne Shirley-Cuthbert*

# Resumo

A descoberta de planetas fora do Sistema Solar, denominados exoplanetas, teve início na década de 1990, com a detecção de exoplanetas ao redor de um pulsar e o primeiro exoplaneta orbitando uma estrela do tipo solar, 51 Pegasi. Desde então, já foram confirmados mais de 4000 exoplanetas, com a maior parte detectada pela missão espacial Kepler da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). A descoberta de sistemas planetários além do nosso naturalmente suscita nossa curiosidade sobre a possibilidade de vida fora da Terra. Embora bastante diversificada no nosso planeta, ainda não se pode afirmar se a vida é um fenômeno frequente no Universo e a vida na Terra continua sendo o único exemplo conhecido. Nesse contexto, é crucial o estudo da zona de habitabilidade estelar (ZH), que consiste na região ao redor de uma estrela na qual é possível a existência de água líquida na superfície de um planeta rochoso com uma atmosfera. Entretanto, além da presença na ZH da estrela, o planeta deve possuir propriedades que permitam uma temperatura ideal para vida como conhecemos, sem variações bruscas ao longo do ano, e algumas dessas características serão estudadas neste projeto.

Neste trabalho, realizamos inicialmente cálculos numéricos, aplicando o código desenvolvido em Mathematica, baseado em Pinotti<sup>[1]</sup>, para estudar a variação da temperatura na superfície de planetas hipotéticos. Aplicamos o modelo para planetas hipotéticos assumindo algumas características da Terra, utilizando diferentes valores de excentricidade orbital, albedo e emissividade, além de estudar a influência de características atmosféricas, como densidade colunar e capacidade térmica na estabilização da variação de temperatura do planeta. Em seguida, aplicamos o modelo para os exoplanetas *TRAPPIST-1e*, *TRAPPIST-1f* e *TRAPPIST-1g*, que se encontram dentro da ZH de sua estrela. De acordo com nosso modelo, pôde ser observado que a excentricidade orbital influencia drasticamente a variação de temperatura de todos os planetas estudados. Nota-se que parâmetros como albedo e emissividade influenciam a temperatura global do planeta, mas não sua variação ao longo do ano. Além disso, é possível perceber que a presença de uma atmosfera espessa atua estabilizando a variação de temperatura ao longo do ano, aumentando as chances do desenvolvimento e manutenção da vida.

**Palavras-chave:** astrobiologia, exoplanetas, sistema *TRAPPIST-1*, zona de habitabilidade, atmosfera, temperatura planetária.

# Abstract

The discovery of planets outside the Solar System, called exoplanets, began in the 1990 decade with the detection of exoplanets orbiting a pulsar and the first exoplanet orbiting a solar-type star, 51 Pegasi. Since then, over 4,000 exoplanets have been confirmed, most of them detected by NASA's Kepler Space Mission. The discovery of planetary systems beyond our own naturally raises our curiosity about the possibility of life outside Earth. Although quite diverse on our planet, we cannot yet say whether life is a common or a rare phenomenon in the Universe, and life on Earth remains as the only known example. In this context, it becomes crucial to study the stellar Habitable Zone (HZ), defined as the region around a star that allows liquid water on the surface of a rocky planet with an atmosphere. However, besides its presence in the star's HZ, the planet must have properties that allow an ideal temperature for life as we know it, with no sudden variations throughout the year, and some of these features will be studied in this project.

In this work, we initially performed numerical calculations by applying the code developed in Mathematica, based on Pinotti<sup>[1]</sup>, to study the surface temperature variation of hypothetical planets. We first apply the model for hypothetical planets assuming some Earth characteristics, for different values of orbital eccentricity, albedo, and emissivity. We also studied the influence of atmospheric characteristics such as column density and thermal capacity on the stabilization of the planet's temperature variation. Then, we applied the model for the exoplanets *TRAPPIST-1e*, *TRAPPIST-1f* and *TRAPPIST-1g*, which are within their host star's HZ. According to our model, it can be observed that orbital eccentricity drastically influences the temperature variation of all studied planets. Parameters such as albedo and emissivity influence the global temperature of the planet, but do not change its variation throughout the year. Besides, it is possible to notice that the presence of a thick atmosphere acts stabilizing the temperature throughout the year, increasing the chances of developing and sustaining life.

**Keywords:** astrobiology, exoplanets, *TRAPPIST-1* system, habitable zone, atmosphere, planetary temperature.

# Lista de Figuras

---

1.1	Relação entre massa, raio e excentricidade orbital dos exoplanetas já confirmados até hoje. Fonte: The Extrasolar Planets Encyclopaedia ( <i>exoplanet.eu</i> ).	2
2.1	Ilustração das macromoléculas biológicas que operam as três funções fundamentais para vida: compartimentalização, replicação e metabolismo. Ilustração autoral.	9
2.2	Esquema representando a história do Universo. Fonte: NASA / WMAP Science Team. A figura pode ser acessada em <a href="https://map.gsfc.nasa.gov">https://map.gsfc.nasa.gov</a>	11
2.3	Quantidade de exoplanetas descobertos por cada método de detecção ao longo dos anos. Fonte: NASA Exoplanet Archive.	15
2.4	Detecção através do método da variação da velocidade radial. A onda azul, de menor comprimento de onda, representa a luz recebida no telescópio quando a estrela está se aproximando do observador. A onda vermelha representa a situação oposta, quando a estrela está se afastando do observador. Ilustração autoral.	16
2.5	Detecção da diminuição do brilho da estrela causada pela presença de um ou mais planetas por trânsito planetário. Ilustração autoral.	17
2.6	Detecção do brilho da estrela causada pelo alinhamento com uma estrela e seu exoplaneta através de microlentes gravitacionais. Ilustração autoral.	18
2.7	Detecção de um exoplaneta através do bloqueio da luz de sua estrela usando o <i>starshade</i> pelo Imageamento Direto. Ilustração autoral.	19
2.8	Ilustração da zona de habitabilidade estelar. Ilustração autoral.	24
2.9	Ilustração da zona de habitabilidade (em verde) do sistema TRAPPIST-1, comparada ao Sistema Solar. Fonte: Jet Propulsion Laboratory NASA.	26
3.1	Diagrama representando a anomalia excêntrica ( $E$ ), semi-eixo maior ( $a$ ) e a distância orbital ( $r$ ), dependentes da posição de um planeta ao longo de sua órbita. Ilustração autoral.	31

- 
- 3.2 Gráficos ilustrando os quatro parâmetros de análise das curvas. As curvas em linha sólida representam a variação da temperatura para um planeta com atmosfera ( $\chi$  e  $c_p$  não nulos), e as curvas pontilhadas representam o resultado para o mesmo planeta, no caso sem atmosfera. . . . . 35
- 3.3 Temperatura como função do tempo para seis planetas hipotéticos sem atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os três planetas à esquerda orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA, com a excentricidade orbital da Terra e com três condições iniciais de temperatura diferentes. Os três planetas à direita orbitam uma estrela com luminosidade da TRAPPIST-1, em uma órbita com semi-eixo maior de 0,038 UA, com excentricidade orbital de 0,061 e três condições iniciais de temperatura diferentes. . . . . 37
- 4.1 Temperatura como função do tempo para cinco planetas hipotéticos sem atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os cinco planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com valores de excentricidade diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1. . . . . 40
- 4.2 Temperatura como função do tempo para quatro planetas hipotéticos sem atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os quatro planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA, com valores de excentricidade orbital e albedo planetário diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1. . . . . 42
- 4.3 Temperatura como função do tempo para quatro planetas hipotéticos sem atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os quatro planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA, com valores de excentricidade orbital e emissividade planetária diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1. . . . . 43
- 4.4 Temperatura como função do tempo, para quatro planetas hipotéticos com atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os quatro planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com valores de capacidade térmica molar diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1. Colocamos as curvas tracejadas correspondentes aos casos sem atmosfera, para comparação. . . . . 45

- 
- 4.5 Temperatura como função do tempo para dois planetas hipotéticos com a atmosfera fina de Marte, obtida através da equação 3.7, comparadas com os mesmos planetas sem atmosfera. Os dois planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com duas excentricidades orbitais diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1. . . . . . 47
- 4.6 Temperatura como função do tempo para dois planetas hipotéticos com densidade colunar similar à da Terra, obtida através da equação 3.7, comparados com os mesmos planetas sem atmosfera. Os dois planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com duas excentricidades orbitais diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1. . . . . . 48
- 4.7 Temperatura como função do tempo para dois planetas hipotéticos com uma hipotética atmosfera espessa, obtida através da equação 3.7, comparados com os mesmos planetas sem atmosfera. Os dois planetas com densidade colunar similar à da Terra orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com duas excentricidades orbitais diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1. . . . . . 49
- 4.8 Temperatura como função do tempo para os exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*, sem a presença de uma atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os planetas orbitam a estrela com os semi-eixos maiores mostrados na Tabela 3.2, para duas excentricidades orbitais diferentes. . . . . . 51
- 4.9 Temperatura como função do tempo para os exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*, sem a presença de uma atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os planetas orbitam a estrela com os semi-eixos maiores mostrados na Tabela 3.2, para dois valores de albedo planetário diferentes, assumindo uma excentricidade de 0,061. . . . . . 53

- 
- 4.10 Temperatura como função do tempo para os os exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*, com a presença de uma atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os planetas orbitam a estrela com os semi-eixos maiores mostrados na Tabela 3.2, para três valores de densidade colunar diferentes, comparados ao caso sem atmosfera. Os gráficos a esquerda correspondem à variação de temperatura ao longo de 50 períodos de cada exoplaneta, enquanto os da direita correspondem ao momento em que a variação da temperatura se estabiliza. . . . . 55

# Lista de Tabelas

---

3.1	Valores de albedo, emissividade, excentricidade, capacidade térmica molar e densidade colunar atmosférica da Terra e usados como referência para o estudo da influência dos parâmetros livres <sup>[1]</sup> . . . . .	33
3.2	Parâmetros Físicos coletados da base de dados exoplanet.eu. O símbolo “ $\oplus$ ” representa quantidades referentes à Terra. . . . .	38
4.1	Medida de estreitamento para cada excentricidade orbital. . . . .	41
4.2	Medidas de assimetria e estreitamento para os dois valores de albedo e emissividade diferentes para duas excentricidades orbitais distintas. . . . .	44
4.3	Medidas de atenuação, <i>phase lag</i> , assimetria e estreitamento para os dois valores de capacidade térmica molar atmosférica distintas, para duas excentricidades diferentes. . . . .	46
4.4	Medidas de atenuação, <i>phase lag</i> , assimetria e estreitamento para cada densidade colunar e excentricidade diferente. . . . .	48
4.5	Indicadores de assimetria e estreitamento para as duas excentricidades orbitais para o <i>TRAPPIST-1 e</i> , <i>TRAPPIST-1 f</i> e <i>TRAPPIST-1 g</i> . . . . .	52
4.6	Variação de temperatura dos exoplanetas <i>TRAPPIST-1 e</i> , <i>TRAPPIST-1 f</i> e <i>TRAPPIST-1 g</i> , causados pela variação no valor de albedo planetário. $T_{m\acute{e}dia}$ representa a temperatura média da variação de cada parâmetro e $\Delta T$ consiste na variação total de temperatura ao longo da órbita (diferença entre temperatura máxima e mínima atingida). . . . .	54
4.7	Indicadores de assimetria e estreitamento para cada valor de albedo planetário diferente, para os exoplanetas <i>TRAPPIST-1 e</i> , <i>TRAPPIST-1 f</i> , <i>TRAPPIST-1 g</i> . . . . .	54
4.8	Indicadores de atenuação, <i>phase lag</i> , assimetria e estreitamento para cada densidade colunar diferente, para os exoplanetas <i>TRAPPIST-1 e</i> , <i>TRAPPIST-1 f</i> , <i>TRAPPIST-1 g</i> . . . . .	56

# Lista de Abreviações

---

**ATP** Adenosina trifostato.

**CNES** *Centre National d'Études Spatiales.*

**CoRoT** *Convection, Rotation et Transits Planétaires.*

**ESA** *European Space Agency.*

**Ga** bilhões de anos atrás.

**HST** *Hubble Space Telescope.*

**IV** infravermelho.

**JWST** *James Webb Space Telescope.*

**K2** Missão Kepler Secundária.

**km** Quilômetros.

**NAI** *NASA Astrobiology Institute.*

**NASA** *National Aeronautics and Space Administration.*

**SP** Sequência Principal.

**TESS** *Transiting Exoplanet Survey Satellite.*

**TRAPPIST** *Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope.*

**UA** Unidade Astronômica.

**ZH** Zona de habitabilidade.

# Sumário

---

<b>Lista de Figuras</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Abreviações</b>	<b>vi</b>
<b>Sumário</b>	<b>vii</b>
<b>1 <i>Introdução</i></b>	<b>1</b>
<b>2 <i>Astrobiologia</i></b>	<b>4</b>
2.1 O Fenômeno Vida . . . . .	6
2.1.1 Origem da Vida . . . . .	7
2.2 Formação planetária . . . . .	10
2.3 Exoplanetas . . . . .	13
2.3.1 Métodos de Detecção . . . . .	14
2.3.2 Missões espaciais . . . . .	20
2.3.3 Dados Gerais . . . . .	22
2.4 Habitabilidade . . . . .	22
2.4.1 Sistema TRAPPIST-1 . . . . .	26
<b>3 <i>Metodologia</i></b>	<b>28</b>
3.1 Modelagem da Temperatura de Superfície . . . . .	29
3.2 Influência dos Parâmetros Livres . . . . .	32

---

3.3	Influência da Condição Inicial . . . . .	36
3.4	Seleção de Exoplanetas . . . . .	37
<b>4</b>	<b><i>Resultados</i></b>	<b>39</b>
4.1	Simulações em Terras Hipotéticas . . . . .	39
4.1.1	Influência da Excentricidade . . . . .	40
4.1.2	Influência do Albedo e Emissividade . . . . .	41
4.1.3	Influência da Atmosfera . . . . .	45
4.2	Simulações em Exoplanetas Reais . . . . .	50
4.2.1	Influência da Excentricidade . . . . .	50
4.2.2	Influência do Albedo . . . . .	52
4.2.3	Influência da Atmosfera . . . . .	54
<b>5</b>	<b><i>Discussão e Conclusão</i></b>	<b>58</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>63</b>

# Capítulo 1 | *Introdução*

---

Menos de um bilhão de anos após a formação do planeta Terra<sup>[2]</sup>, reações químicas viáveis em qualquer lugar do Universo permitiram a ocorrência de um evento, até o momento, único para nós, o surgimento de vida. Os questionamentos envolvendo esse fenômeno estão entre os maiores enigmas não solucionados das ciências naturais, permanecendo ainda hoje sob intenso debate científico. Dúvidas que abordam desde sua definição, como também quais condições desencadearam sua manifestação inicial, ocupam as mentes de diversos seres humanos que a experienciam. Muitos também se questionam acerca da existência de vida nos muitos objetos que se observa no céu noturno.

A atenção científica pelas origens e pela vida em outros lugares começou há muito tempo, mas foi apenas no século passado que se iniciou o estudo dessas questões através do método científico, como por exemplo nos experimentos de Miller et al.<sup>[3]</sup>. A astrobiologia foi um novo ramo da ciência criado a fim de tentar responder algumas dessas perguntas. Segundo a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a astrobiologia é uma área que consiste no estudo da origem, evolução, distribuição e futuro da vida na Terra e no Universo<sup>[4]</sup>. Apesar do termo “astrobiologia” parecer se referir ao estudo da vida fora da Terra, seu escopo engloba o estudo do fenômeno da vida como um todo, cujo seu primeiro objetivo é pesquisar se realmente existe vida além da que conhecemos. De acordo com Briot<sup>[5]</sup>, a astrobiologia é uma ciência que ainda está se desvendando, cujo o objeto de pesquisa é a busca pelo objeto.

A procura por ambientes que sustentem a existência de vida fora da Terra é uma das diversas instâncias possíveis de serem abordadas no estudo da astrobiologia. A descoberta

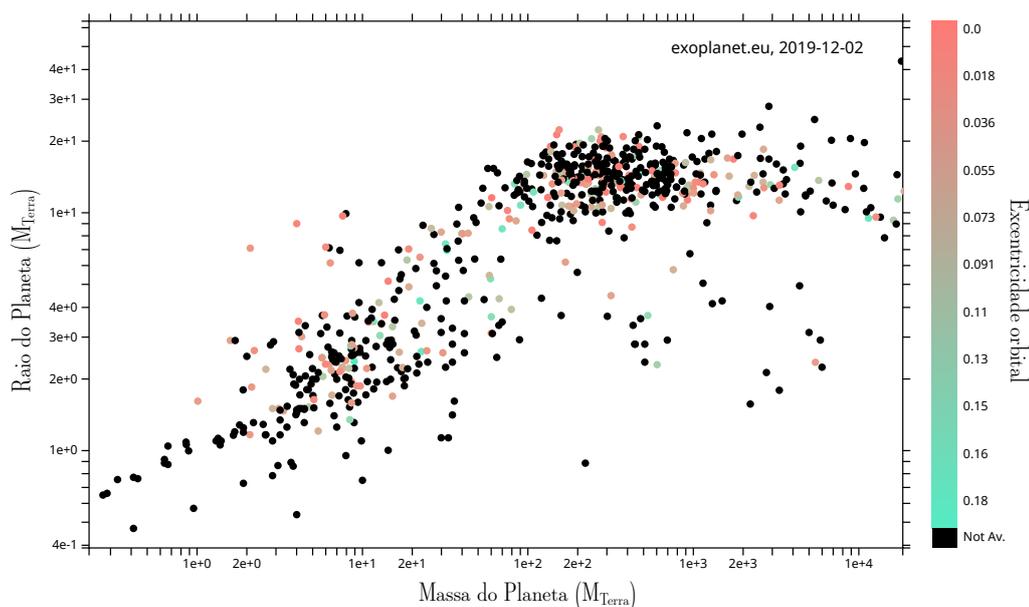


Figura 1.1: Relação entre massa, raio e excentricidade orbital dos exoplanetas já confirmados até hoje. Fonte: The Extrasolar Planets Encyclopaedia (*exoplanet.eu*).

de planetas fora do Sistema Solar, denominados exoplanetas, teve início em meados da década de 1990, primeiramente em 1992, com a descoberta de exoplanetas ao redor de um pulsar<sup>[6]</sup>, como também em 1995, a partir da detecção do primeiro exoplaneta orbitando uma estrela do tipo solar, 51 Pegasi<sup>[7]</sup>, descoberta que rendeu aos seus autores o prêmio Nobel de Física em 2019. Desde então, mais de 4000 exoplanetas já foram confirmados, com a maior parte deles tendo sido descoberta pela missão espacial Kepler, lançada pela NASA<sup>[8]</sup>. A existência de planetas é tão comum, que provavelmente não só todas as estrelas da Via Láctea possuem pelo menos um, como muitos desses possuem tamanhos comparáveis ao da Terra e podem exibir características necessárias para abrigar vida<sup>[9]</sup>.

A zona de habitabilidade (ZH) estelar pode ser definida como a região ao redor de uma estrela na qual água líquida possa existir de forma estável na superfície de um planeta rochoso. Esse conceito pressupõe que vida extraterrestre seria baseada em carbono e exigiria água líquida, como nos moldes conhecidos no planeta Terra<sup>[10]</sup>.

Uma das características do planeta que pode influenciar na sua temperatura superficial é a presença de uma atmosfera, que contribui para a estabilização da temperatura ao longo do ano. Em planetas de atmosfera fina, o clima depende mais fortemente das variações do

fluxo da energia provinda da estrela hospedeira. Neste caso, a variação de temperatura planetária é determinada basicamente pela distância entre ele e a estrela<sup>[9]</sup>. Em órbitas circulares (não excêntricas) a distância não varia, o que contribui para uma entrada de energia constante no planeta. Contudo, em casos de órbitas elípticas (excêntricas), há uma variação da distância entre o planeta e a estrela ao longo do ano. Assim, quanto maior a excentricidade da órbita, maior a variação do fluxo da radiação estelar que chega no planeta, gerando uma maior variação da sua temperatura ao longo do ano.

De acordo com as observações, os exoplanetas parecem ter, em média, órbitas mais excêntricas que as dos planetas do Sistema Solar. A excentricidade média dos oito planetas do sistema solar é 0,047. Enquanto que, com os dados do *Extrasolar Planets Encyclopaedia*<sup>1</sup>, a média das excentricidades dos exoplanetas confirmados fica em torno de 0,169.

Neste trabalho analisaremos quais características planetárias são responsáveis por controlarem sua temperatura. Estudaremos como a excentricidade da órbita influencia a temperatura de superfície do planeta, tal como compreender o papel de uma atmosfera na estabilização dessa temperatura. Para tal, estudamos a variação da temperatura de um planeta de acordo com o formalismo descrito em Pinotti<sup>[1]</sup>, para exoplanetas hipotéticos e reais com espessuras atmosféricas e excentricidades orbitais variadas. Executamos simulações da temperatura do planeta ao longo de diversas revoluções ao redor da estrela hospedeira, para observar se haveria estabilização. Realizamos o estudo desses parâmetros, primeiramente simulando exoplanetas com as características da Terra, para servir de controle e, posteriormente, para exoplanetas reais.

No Capítulo 2 fazemos uma revisão da literatura, definindo mais precisamente alguns conceitos utilizados ao longo do trabalho. No Capítulo 3 explicamos a metodologia adotada, a base de dados e os critérios utilizados na seleção dos exoplanetas estudados. No Capítulo 4 exibimos os resultados da variação de temperatura em planetas hipotéticos com características da Terra, bem como em exoplanetas reais. Já no Capítulo 5, discutimos o impacto dos resultados, além de apresentarmos nossas conclusões e perspectivas.

---

<sup>1</sup>O catálogo pode ser acessado em: <http://exoplanet.eu>.

## Capítulo 2 | *Astrobiologia*

---

A astrobiologia se preocupa com a vida como um fenômeno planetário, ou seja, como a biologia interage com os objetos celestes. A astrobiologia pode ser definida como a área que busca entender a origem, a evolução, a distribuição e o futuro da vida no Universo<sup>[4]</sup>. É a ciência envolvida com as principais perguntas feitas pela humanidade ao longo de milênios: como a vida começa e evolui, se a vida existe em outras partes do Universo e qual seria o futuro da vida na Terra e além. A astrobiologia também funciona como uma perspectiva para melhorar a comunicação e a troca de conhecimento entre pesquisadores de áreas distintas com um interesse comum. Assim, é necessário que possua uma abordagem interdisciplinar, combinando conceitos de biologia molecular, ecologia, geologia, astronomia, ciência da informação, tecnologias de exploração espacial e diversas outras disciplinas pertinentes<sup>[11]</sup>.

As primeiras discussões acerca da existência de outros mundos povoados remontam à Grécia Antiga. Com o conhecimento científico contemporâneo, a pluralidade dos mundos significa a existência de sistemas planetários em torno de outras estrelas além do nosso Sol. Entretanto, na Antiguidade a ideia do mundo era muito diferente da atual.

As mais antigas alusões envolvendo outros mundos são dos filósofos gregos Demócrito (470 – 365 a.C.) e seu discípulo Epicuro (342 – 270 a.C.), que defendiam a existência de infinitos mundos, alguns semelhantes e outros diferentes do nosso. Aristarco de Samos (320 – 250 a.C.) foi o primeiro a propor um modelo heliocêntrico do Sistema Solar, implicando que a Terra seria apenas um planeta entre outros orbitando o Sol. Só após a Idade Média, no ano de 1543, que a teoria heliocêntrica ganhou notoriedade, com Nicolaus

Copérnico (1473 – 1543). No final do século XVI, Giordano Bruno (1548 – 1600) defendeu a pluralidade de mundos habitados por uma multiplicidade de vidas. Galileu Galilei (1564 – 1642) descobriu a presença de montanhas na Lua em 1609, apontando para a hipótese da existência de seres vivos lá. Em 1600, Johannes Kepler (1571 – 1630) evidenciou sua crença em habitantes em Júpiter, motivado pela descoberta de Galileu acerca dos satélites do planeta gasoso<sup>[5]</sup>.

De acordo com Briot<sup>[5]</sup>, a ideia de que a vida em outros planetas era um evento comum foi bem aceita pelos astrônomos na época, todavia apenas nos séculos posteriores essas discussões puderam se tornar mais embasadas cientificamente. No século XIX cresceu o debate acerca da possibilidade da existência de vida em outros locais do Universo, devido à criação da Teoria da Evolução por seleção natural, desenvolvida independentemente por Charles Darwin (1809 – 1882) e Alfred R. Wallace (1823 – 1913). Essa teoria de Darwin e Wallace, válida até hoje, defende que os organismos se adaptaram através de pequenas variações genéticas ao longo de gerações, resultando nas diversas formas de vida mais complexas observadas atualmente. E como uma consequência lógica do pensamento evolutivo, entende-se que essas formas mais complexas de vida se originaram de um organismo em comum bem simples. Além disso, a descoberta durante o século XX de organismos extremófilos, que sobrevivem às condições extremas se comparadas às condições nas quais vivemos, reforçou a hipótese de se encontrar locais habitáveis no Sistema Solar<sup>[12]</sup>.

Apesar do debate sobre a pluralidade de mundos habitáveis dominar as mentes de muitos intelectuais há tempos, determinar a primeira vez em que o termo “astrobiologia” foi utilizado é bem improvável. A expressão já vinha sendo utilizada em diferentes contextos desde a década de 1940, sendo seu primeiro uso em português no ano de 1958, quando o biólogo brasileiro Flávio Augusto Pereira publicou o livro *“Introdução à astrobiologia”*<sup>[13]</sup>. Diferentemente do que acontece com outras disciplinas, existem pelo menos três ou quatro sinônimos para indicar a mesma área científica. Pois além de astrobiologia, essa ciência já foi chamada de exobiologia, bioastronomia, astrobotânica e, às vezes, cosmobiologia<sup>[4,5]</sup>. Entretanto, o reconhecimento da astrobiologia como um campo científico só se deu em

1998 quando a NASA optou pela reestruturação e ampliação do seu Programa de Exobiologia, que buscava apenas por vida fora da Terra. Assim, renomeou-o como Programa de Astrobiologia e criou o *NASA Astrobiology Institute* (NAI), um dos mais influentes na área<sup>[4]</sup>. Essa mudança aconteceu após a compreensão de que, além de procurar por vida fora da Terra, era necessário entender melhor como a vida atua aqui, para poder utilizá-la como modelo.

Naturalmente, a descoberta de organismos extremófilos e suas capacidades adaptativas aumenta as nossas esperanças de encontrar condições habitáveis em outros corpos do Sistema Solar e além. Com o avanço de métodos observacionais e a confirmação de diversos sistemas planetários na Via Láctea, nos aproximamos cada vez mais da possibilidade de encontrar condições de habitabilidade em algum desses planetas. Logo, o tema da pluralidade dos mundos, ou seja, a busca por planetas com os requisitos necessários para habitabilidade, é o foco principal dessa pesquisa.

## 2.1 O FENÔMENO VIDA

Independentemente de uma definição, identificar a manifestação de vida parece ser uma capacidade cognitiva intrínseca a nós humanos. Intuitivamente distinguimos o animado do inanimado e sabemos que um peixe nadando no rio está vivo, enquanto um rio não está. De forma inerente nos perguntamos sobre os eventos ao nosso redor, reconhecendo padrões, os classificando e definindo para tentar entendê-los. E com a reflexão acerca dessas observações, filósofos e cientistas emergiram a fim de teorizar sobre a vida.

A filosofia abrange principalmente três possíveis concepções para a vida, animista, mecanicista e organicista<sup>[14]</sup>. Criada por Aristóteles (384 – 322 a.C.) e a mais velha de todas, a teoria animista diz que a alma é a causa da vida, sendo responsável pelo exercício coordenado de todas as capacidades do corpo de agir. Enquanto na teoria mecanicista, defendida por Descartes (1596 – 1650), o corpo vivo é uma máquina e suas funções não passam de mecanismos complexos. Já a teoria organicista, desenvolvida por Kant (1724

– 1804), é responsável pela criação da palavra “organismo” usada até hoje, cujas partes são meios que operam juntos para constituir o todo. Além disso, Kant sugere que “seres organizados” se auto-organizam, sendo capazes de auto-manutenção, auto-reparo e auto-reprodução<sup>[15]</sup>.

Aproximadamente na metade do século XVIII se desenvolveu uma área devotada exclusivamente ao estudo do fenômeno da vida e dos seres vivos, a biologia. Com o avanço científico nos séculos XIX e XX, um conjunto de várias teorias abrangeu todo o espectro de seres que denominamos vivos. Primeiramente surgiu a teoria celular e depois a teoria evolutiva. Finalmente a biologia molecular e a bioquímica se complementaram com a demonstração de que todos os seres vivos compartilham os mesmos constructos, como ácidos nucleicos e proteínas, e desempenham funções metabólicas. Todas essas teorias evidenciaram que seres vivos partilham uma gama de características que os distinguem de quaisquer outras manifestações naturais<sup>[15]</sup>.

Entretanto, apesar de ser uma ciência que estuda todas as formas e manifestações de vida, a biologia poucas vezes se atentou em definir um conceito de vida. Atualmente, o conhecimento compartilhado entre essas subáreas torna possível a tentativa de estabelecê-lo. A definição consistiria em extrair as doutrinas mais gerais da biologia celular, bioquímica, teoria da evolução e biologia molecular. Algumas teorias insistem na presença de membranas e um metabolismo, outras na reprodução e capacidade de evoluir por seleção natural, enquanto algumas defendem as moléculas orgânicas como constructos básicos da vida. O Programa de Exobiologia da Nasa, por exemplo, define vida como um sistema químico auto-sustentável capaz de passar pela evolução darwiniana<sup>[15]</sup>. No entanto, existe ainda amplo debate sobre essa questão.

### 2.1.1 *Origem da Vida*

O planeta Terra se formou há aproximadamente 4,53 bilhões de anos atrás (Ga), através da aglutinação gravitacional de objetos quilométricos e do catastrófico impacto que gerou a Lua. Após esse impacto, a superfície da Terra primitiva esfriou rapidamente

até abaixo do ponto de ebulição da água, ocasionando na formação de uma hidrosfera e uma crosta continental. O oceano primitivo era ocasionalmente vaporizado, devido à impactos massivos de meteoritos na crosta terrestre nas primeiras centenas de milhões de anos, chamado intenso bombardeio tardio. A água líquida e as moléculas orgânicas, essenciais para a vida, normalmente são instáveis a temperaturas superiores a 100 °C, logo é improvável que a vida tenha existido e sobrevivido antes de 4,2 Ga. A partir do cruzamento de evidências geológicas com análises filogenéticas, infere-se que a vida na Terra tenha se originado entre 4,1 e 4,2 Ga<sup>[2]</sup>.

Até o momento, existem diversas proposições de locais em que a vida poderia ter se originado, sendo as fontes hidrotermais a proposta mais forte atualmente. Entretanto, não há nenhuma configuração única que ofereça diversidade química e física suficiente para tal. A ideia atual de ambiente habitável baseia-se na evolução química como resultado de interações complexas mediante diversos processos geoquímicos. Essa concepção envolve a presença de uma atmosfera, água e solo terrestre, que coexistem através de uma reciclagem contínua de seus materiais, como ocorre no ciclo carbonato-silicato terrestre<sup>[16]</sup>. Cada um desses três componentes abastece o ambiente com os elementos essenciais carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre, além de diversos nutrientes. A atmosfera fornece o carbono e o nitrogênio; a água o hidrogênio e oxigênio; enquanto o solo terrestre provê o fósforo, enxofre e nutrientes.

A vida é geralmente caracterizada pela existência de três funções básicas, a compartimentalização, a replicação e o metabolismo, como representado na Figura 2.1. A compartimentalização é a habilidade do organismo de se distinguir do ambiente externo e de manter seus componentes agrupados. A replicação é a capacidade de processar e transmitir as informações herdadas para sua progênie. O metabolismo é a competência de capturar energia e transformar os recursos materiais orgânicos. Todas essas atividades são realizadas através de biopolímeros, como os fosfolídeos, as proteínas e os ácidos nucleicos (DNA e RNA). Os fosfolídeos compõem as membranas celulares e são feitos de dois ácidos graxos hidrofóbicos ligados a uma molécula de glicerol hidrofílica. As molé-

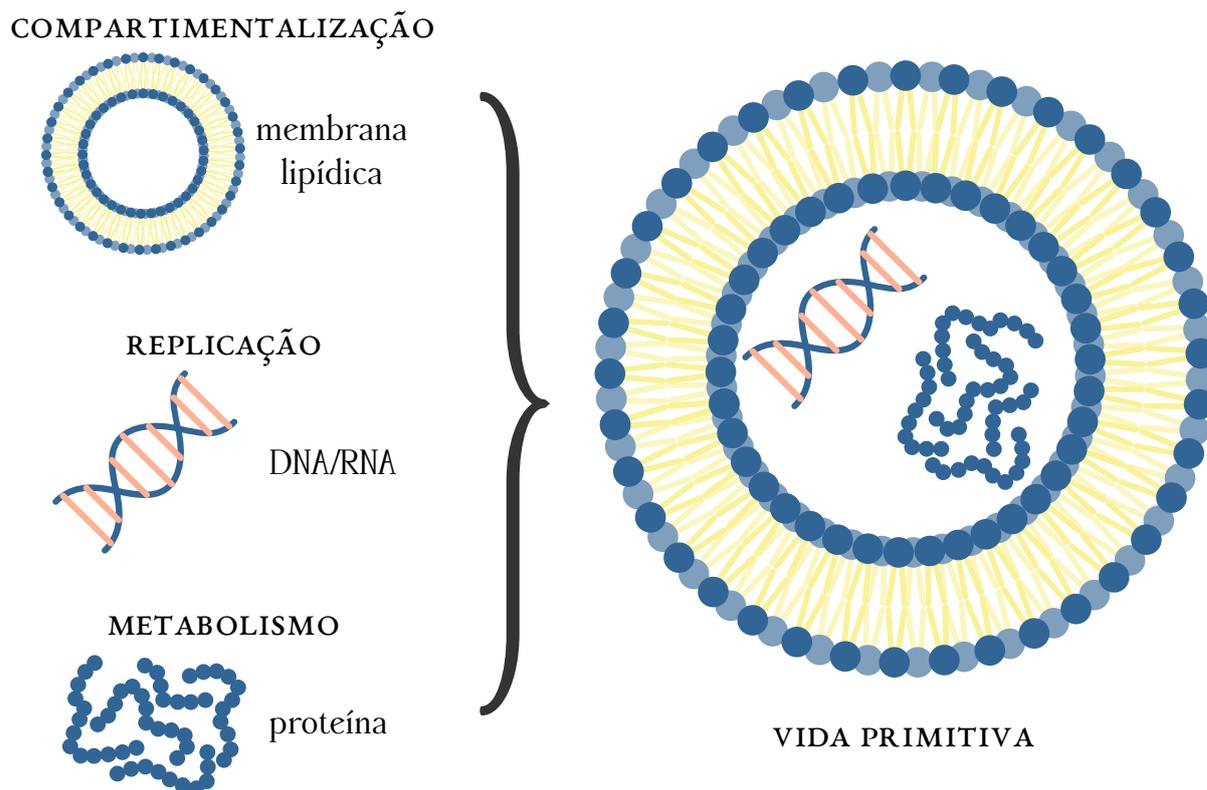


Figura 2.1: Ilustração das macromoléculas biológicas que operam as três funções fundamentais para vida: compartimentalização, replicação e metabolismo. Ilustração autoral.

culas de DNA e RNA são ácidos nucleicos compostos por uma pentose, um grupo fosfato e uma base nitrogenada, unidos através de ligações fosfodiéster. Enquanto o RNA é uma ribose, o DNA é uma desoxirribose, devido à ausência de uma hidroxila. As proteínas são formadas por aminoácidos unidos por ligações peptídicas. Geralmente se supõe que esses elementos vitais foram sintetizados abioticamente, posteriormente reunidos e transformados em biopolímeros. Então esses biopolímeros supostamente interagiram mutuamente e evoluíram para um sistema auto-sustentável por intermédio dos fenômenos naturais que ocorriam na Terra primitiva.

Diversas teorias e simulações laboratoriais foram estudadas com o intuito de mimetizar as possíveis condições que permitiram todos esses processos acontecerem. A teoria mais difundida foi hipotetizada, independentemente, por Alexander Oparin (1894 – 1980) em 1924 e John Haldane (1892 – 1964) em 1929, consistindo na ideia de uma “sopa primordial”<sup>[17]</sup>. Nessa teoria, compostos orgânicos complexos, tais como aminoácidos, açúcares,

bases nucleicas etc., surgiram a partir de moléculas simples, como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{CH}_4$  presentes em uma atmosfera redutora (ausente de oxigênio), como consequência da ação da luz solar e de relâmpagos. Por sua vez, os compostos teriam se dissolvido no oceano primitivo, se concentrado e interagido entre si, formando polímeros, que poderiam se aglomerar em estruturas que remetem à células, chamadas de gotículas coacervadas. Essas gotículas cresceram por fusão e se dividiram em outras gotículas filhas através da ação das ondas das marés. Ao longo de milhões de anos tiveram seu nível de complexidade aumentado gradativamente, desenvolvendo a capacidade de catalisar sua própria replicação por meio de um mecanismo semelhante à seleção natural, o que acabou levando ao surgimento da vida. A confirmação experimental da formação de biomoléculas a partir de moléculas simples, nas condições que existiam na Terra primitiva, só foi realizada em 1953, por Stanley Miller (1930 – 2007) e Harold Urey (1893 – 1981)<sup>[3]</sup>. Posteriormente houveram muitas críticas ao experimento de Miller, a principal consistindo na ideia de que provavelmente a atmosfera da Terra primitiva era diferente dos gases utilizados para simulá-la no experimento. Entretanto, vários ensaios demonstraram não só que essas questões poderiam ser resolvidas, mas também que com o aprimoramento de seus detalhes, essa hipótese se tornaria um ponto de partida de muitas teorias modernas para a origem da vida<sup>[2]</sup>.

## 2.2 FORMAÇÃO PLANETÁRIA

Ao longo do último século, o modelo padrão da cosmologia desenvolveu-se a ponto de permitir a criação de ferramentas coesas, que descrevem de forma coerente a origem e evolução do Universo e de suas estruturas<sup>[18]</sup>. Hoje sabemos que o Universo surgiu a partir de um início extremamente denso e quente, que se expandiu subitamente. Esse processo de expansão rápida é chamado de “*Big Bang*” e demarca o surgimento do cosmos há aproximadamente 13,8 bilhões de anos atrás<sup>[19]</sup>, como pode ser observado na Figura 2.2. O Universo primordial era dominado pela radiação a altíssima temperatura. Uma fração de segundos após a sua constituição, o Universo era uma “sopa” quente e disforme

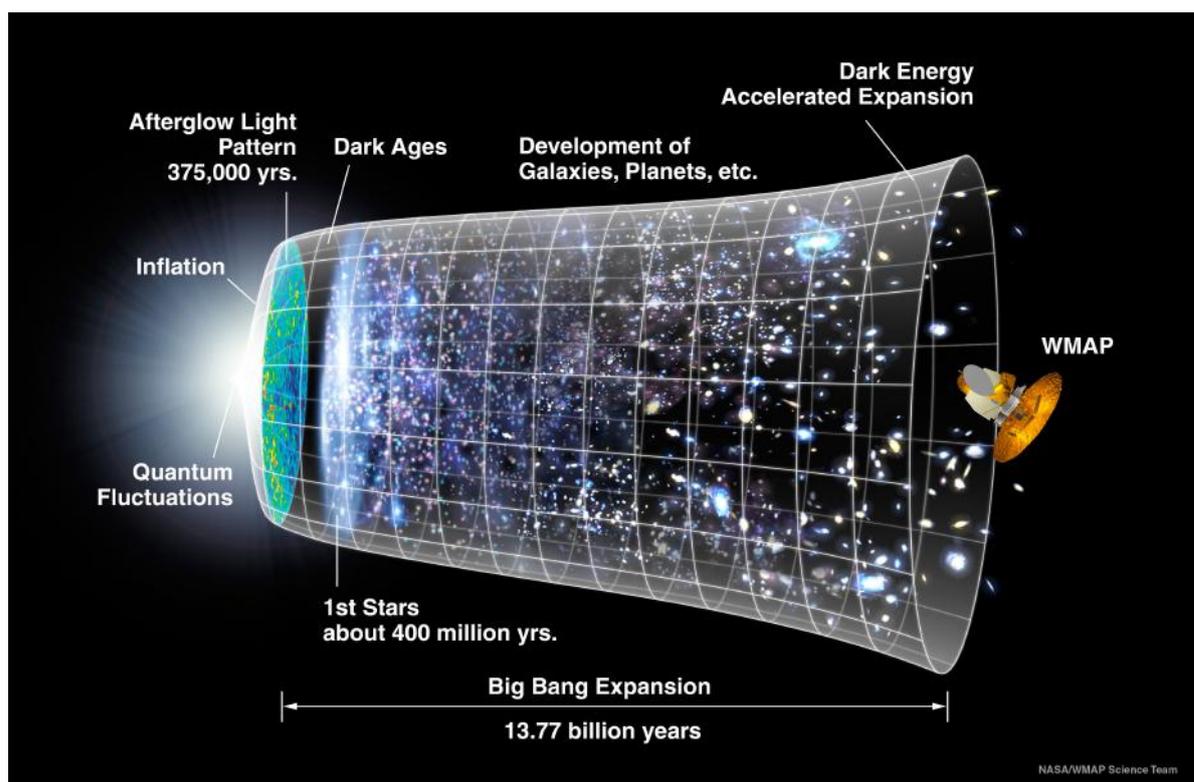


Figura 2.2: Esquema representando a história do Universo. Fonte: NASA / WMAP Science Team. A figura pode ser acessada em <https://map.gsfc.nasa.gov>

de partículas elementares. Desde então, a medida que o Universo foi se expandindo e resfriando como consequência, os *quarks* se condensaram em prótons e nêutrons. Entretanto, somente 3 minutos após o *Big Bang* que o Universo teve sua temperatura resfriada a cerca de um bilhão de graus, dando início à nucleossíntese primordial. Assim, a energia térmica diminuiu e prótons e nêutrons se combinaram sob ação da força nuclear forte, tendo como consequência a formação dos núcleos de elementos leves, como isótopos de hidrogênio, hélio, lítio, até o berílio<sup>[19]</sup>.

Com a evolução contínua do Universo, a matéria primordial formada por nuvens de gás e poeira, que inicialmente era homogênea, começou a se acomodar em regiões de sobredensidade, aumentando assim seu potencial gravitacional e dando origem às estruturas em larga escala que conhecemos. As primeiras estrelas se formaram através de um processo similar, quando um fragmento de uma região mais densa dentro de uma estrutura primordial colapsou sob ação de sua própria gravidade, formando uma nebulosa protoes-

telar. Esse colapso converteu energia potencial gravitacional em energia térmica, gerando em seu centro uma região densa e quente, que deu início à primeira geração de estrelas. Ao passo que a estrela prossegue em seu processo de formação, ela continua a sugar toda a matéria circundante, e a conservação do momento angular faz com que sua região periférica menos quente e densa forme discos espessos de gás e grãos de poeira. Mesmo para estrelas mais recentes, quase todo gás desses discos é feito de hidrogênio e hélio, enquanto uma pequena porção consiste em todos os outros elementos. Na astronomia, esses outros elementos são considerados pesados e são chamados de metais, mesmo muitos deles sendo não-metálicos. A metalicidade é uma função logarítmica, que consiste na razão das abundâncias de ferro e hidrogênio na estrela em relação ao mesmo valor no Sol. Logo, aquelas com razão menor do que no Sol são estrelas de baixa metalicidade e aquelas com razão positiva possuem alta metalicidade.

Os elementos mais pesados não foram produto do *Big Bang*, mas sim da fusão nuclear, que ocorre no interior de várias gerações de estrelas, e é expelido através de ventos estelares, quando elas explodem ou ejetam as camadas externas ao longo de sua evolução. Logo, qualquer estrela pode ser considerada uma indústria de elementos químicos, que chegando ao fim de sua vida, os expelle enriquecendo o meio interestelar com átomos mais pesados, que posteriormente poderão reagir e formar moléculas mais complexas<sup>[20]</sup>. Portanto, o colapso de nuvens ricas em elementos pesados acarreta na formação de estrelas cujos discos protoplanetários permitirão o surgimento de planetas rochosos e todas as formas conhecidas de vida.

Os discos que são formados são denominados discos protoplanetários e constituem as regiões de formação planetária. Grãos de poeira, gelo, e moléculas de gás se aglutinam gradativamente e se tornam planetesimais, tão massivos que se atraem mutuamente. Nesse momento, a estrela está quase completamente formada. Quando uma estrela começa a realizar a fusão de hidrogênio em seu núcleo, ela entra em uma fase de sua vida chamada Sequência Principal. Essas estrelas são classificadas de acordo com sua temperatura, em ordem decrescente, chamadas de anãs O, B, A, F, G, K e M. Quanto maior a massa,

maior sua luminosidade e menor seu tempo de vida na Sequência Principal. Quando passam a fundir hidrogênio, a radiação emitida dissipa o disco de acreção circunstelar, evaporando gelo, partículas sólidas e dissipando o gás. Enquanto isso, os planetesimais interagem e colidem entre si, crescendo. O tamanho e a composição dos planetas que se formam têm relação com a distância até a estrela, de forma que a taxa de acreção e a quantidade de planetesimais disponíveis diminuem com a distância da estrela. Em regiões próximas à estrela, as temperaturas são muito altas e não permitem a condensação de moléculas voláteis, como água e metano. Desta forma, não haverá gás o suficiente para o planeta se tornar um gigante e os planetas nesta região serão formados majoritariamente por compostos com altos pontos de fusão, como metais e silicatos. Para objetos formados depois da linha do gelo, as temperaturas são baixas o suficiente para manter as substâncias no estado sólido. Se os planetesimais crescem muito rapidamente, aglutinam enormes quantidades de material mais leve, principalmente hidrogênio, crescendo e se tornando gigantes gasosos, como Júpiter e Saturno. Caso não consigam aglutinar muito gás, devido à distância, tornam-se gigantes de gelo, como Urano e Netuno. Se esses planetesimais não atingirem tamanho necessário para acumular gás, se transformarão em planetas rochosos, como a Terra, Marte, Mercúrio e Vênus. Ao fim desse processo, têm-se um sistema planetário, composto de uma estrela, alguns planetas formados e alguns resíduos sólidos sob a forma de pequenos corpos, cometas e asteroides, visto que grande parte do gás, gelo e poeira foram expulsos do sistema.

### 2.3 EXOPLANETAS

No Universo observável encontram-se centenas de bilhões de galáxias, onde cada uma delas contém algumas centenas de bilhões de estrelas. Tendo em vista o que parece ser um oceano ilimitado de estrelas, há muito tempo especula-se sobre a existência de outros sistemas planetários e a possibilidade de alguns destes abrigarem vida<sup>[21]</sup>. Após séculos de busca, a descoberta de planetas fora do Sistema Solar, denominados exoplanetas,

transformou o que era o contexto de muitas ficções em pesquisas científicas reais. A detecção dos primeiros exoplanetas começou na década de 1990, com a identificação em 1992 de um planeta em torno uma estrela de nêutrons<sup>[6]</sup> e de um outro planeta orbitando uma estrela de tipo solar, 51 Pegasi, em 1995<sup>[7]</sup>. Atualmente, mais de duas décadas depois, já foram confirmados cerca de 4000 exoplanetas<sup>[22]</sup>, majoritariamente descobertos pela missão espacial Kepler, lançada pela NASA em 2009. A constatação da presença de vários sistemas planetários na Via Láctea reforça o conceito de que a vida pode não ser um fenômeno tão raro.

### 2.3.1 *Métodos de Detecção*

Observar diretamente um exoplaneta, ou seja, detectar os fótons provenientes de um planeta fora do Sistema Solar, é uma tarefa extremamente difícil. Os planetas, ao contrário das estrelas, não produzem reações nucleares em seu interior e portanto não emitem luz. Logo, são dificilmente observáveis, visto que refletem apenas uma porção da luz de suas estrelas hospedeiras. A identificação desses exoplanetas é apenas o primeiro passo para a descoberta de vida. Após a detecção, é necessário ser feito um estudo das características do planeta, começando pelos parâmetros físicos, como tamanho, massa e distância da estrela, por exemplo. Posteriormente deve-se seguir para as medidas mais complexas, como a temperatura, possível presença de atmosfera e sua composição química. Então, finalmente, deve-se buscar por indicações na atmosfera que possam ser causadas pela presença de vida como conhecemos, como uma alta concentração de oxigênio (produto da fotossíntese), chamadas de bioassinaturas. No atual estágio das tecnologias de detecção, é possível medir as características planetárias mais simples, como também sua composição química e a presença de uma atmosfera. Entretanto, ainda é necessário um longo caminho para afirmarmos seguramente se existe ou não alguma forma de vida fora do nosso Sistema Solar. As técnicas de detecção de exoplanetas mais utilizadas são as de variação da velocidade radial, trânsito planetário, microlenteamento gravitacional e imageamento direto, e serão descritas em mais detalhes a seguir. Existem outros métodos de detecção,

mas que têm resultados menos expressivos e portanto não serão abordados. Na Figura 2.3, é mostrado o número de exoplanetas descobertos por cada método de detecção ao longo dos anos, de acordo com o NASA Exoplanet Archive<sup>2</sup>.

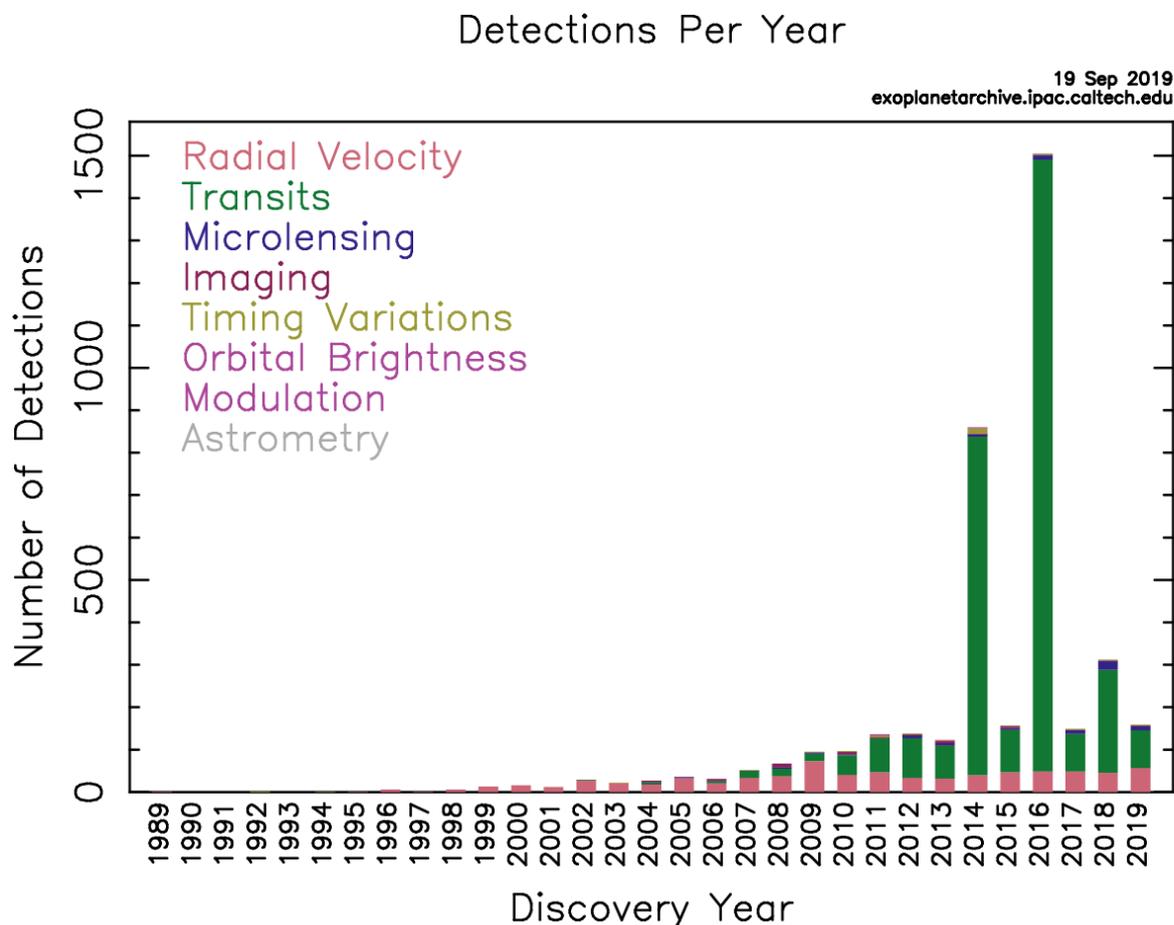


Figura 2.3: Quantidade de exoplanetas descobertos por cada método de detecção ao longo dos anos. Fonte: NASA Exoplanet Archive.

### *Velocidade radial*

É um método que se baseia numa medida indireta dos efeitos planetários sobre a sua estrela, ou seja, percebe-se a presença do exoplaneta através de como ele altera gravitacionalmente a órbita e velocidade da estrela hospedeira<sup>[20]</sup>. Todos os corpos de um sistema planetário orbitam o centro de massa daquele conjunto de corpos, com esse ponto central no espaço não necessariamente coincidindo com a posição geométrica da estrela. Logo, a

<sup>2</sup>O catálogo pode ser acessado em: <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/>.

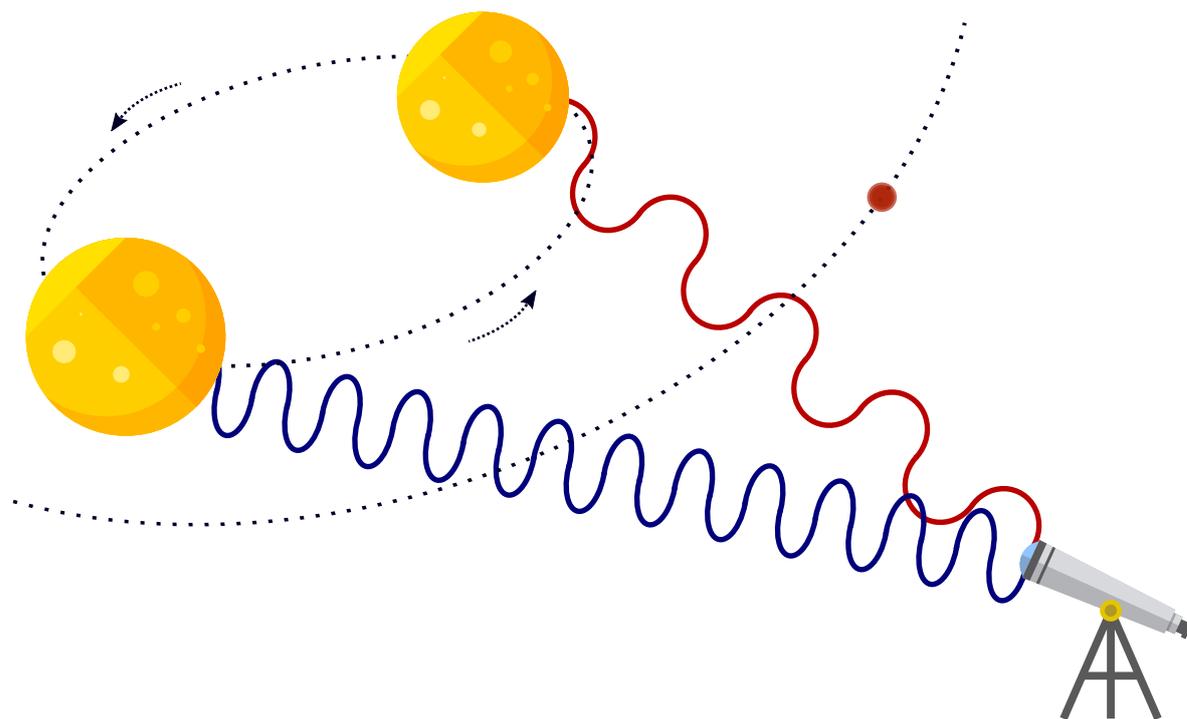


Figura 2.4: Detecção através do método da variação da velocidade radial. A onda azul, de menor comprimento de onda, representa a luz recebida no telescópio quando a estrela está se aproximando do observador. A onda vermelha representa a situação oposta, quando a estrela está se afastando do observador. Ilustração autoral.

estrela também possui uma órbita, que é deslocada devido à atração gerada pelo campo gravitacional do exoplaneta. A gravidade do planeta faz com que a estrela rotacione em torno do centro de massa do sistema e, quanto maior a massa do planeta, maior será a amplitude desse efeito<sup>[23]</sup>. As variações da direção da velocidade da estrela podem ser percebidas através do efeito *Doppler* resultante, que altera o comprimento de onda observado, como pode ser visto na Figura 2.4. É um dos métodos mais produtivos para descobrir exoplanetas até o momento, sendo responsável pela identificação de quase 19% do total, ou seja, mais de 760 dos exoplanetas confirmados até hoje<sup>[22]</sup>.

### *Trânsito planetário*

O trânsito planetário ocorre quando um planeta passa diretamente entre o observador e a estrela que orbita, diminuindo parte da luz que é observada dessa estrela<sup>[20,23]</sup>. O

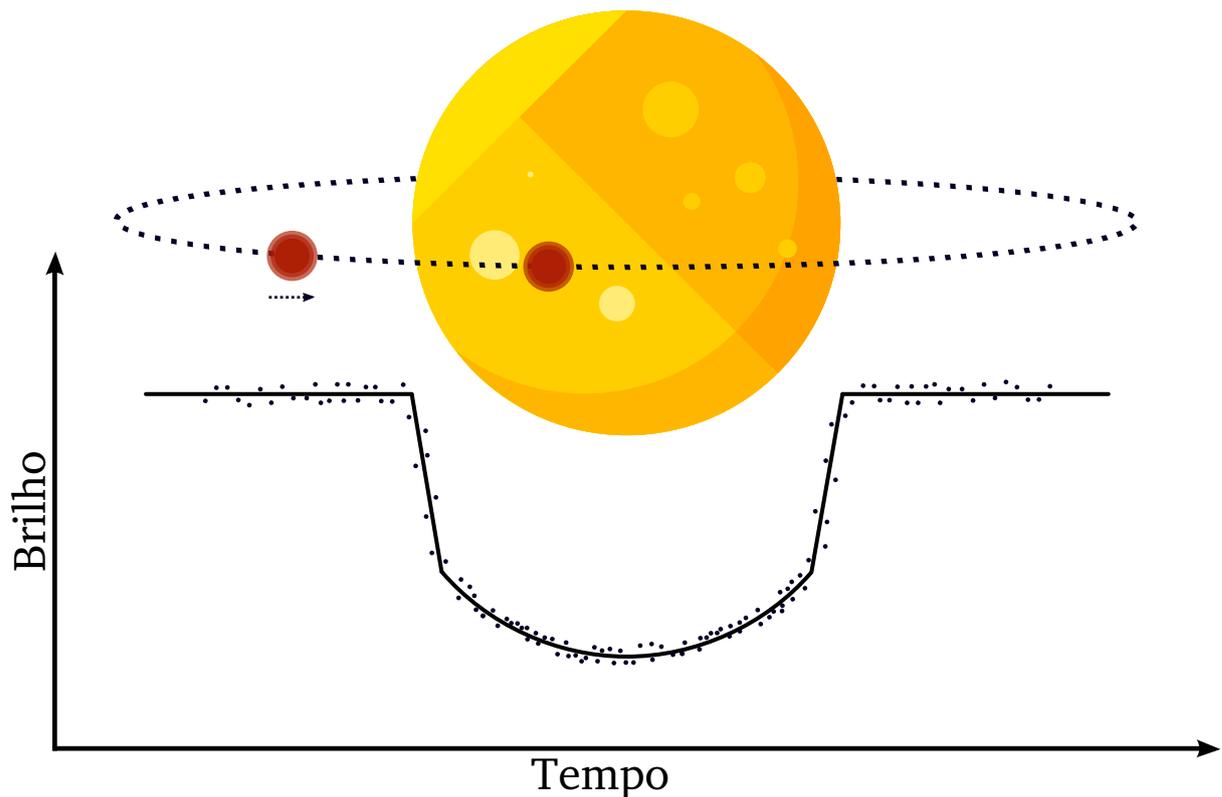


Figura 2.5: Detecção da diminuição do brilho da estrela causada pela presença de um ou mais planetas por trânsito planetário. Ilustração autoral.

método de trânsito consiste na observação da curva de luz da estrela, buscando identificar pequenas diminuições no fluxo recebido, como representado na Figura 2.5. A intensidade e a frequência dessas diminuições irão depender do tamanho e do período orbital do planeta. Planetas maiores bloquearão mais luz, gerando curvas mais profundas, enquanto planetas mais distantes de suas estrelas terão um evento de trânsito mais demorado. Além disso, esse método pode fornecer informações sobre a composição da atmosfera de um planeta, se ele possuir uma, como também de sua temperatura. Quando um exoplaneta passa em frente ao disco de sua estrela, parte da luz passa através de sua atmosfera e as linhas de absorção geradas podem ser identificadas por espectroscopia, resultando em seu espectro de transmissão. É o método mais eficiente de detecção de exoplanetas, tendo descoberto quase 77% dos exoplanetas confirmados hoje, ou seja, mais de 3110 deles<sup>[22]</sup>.

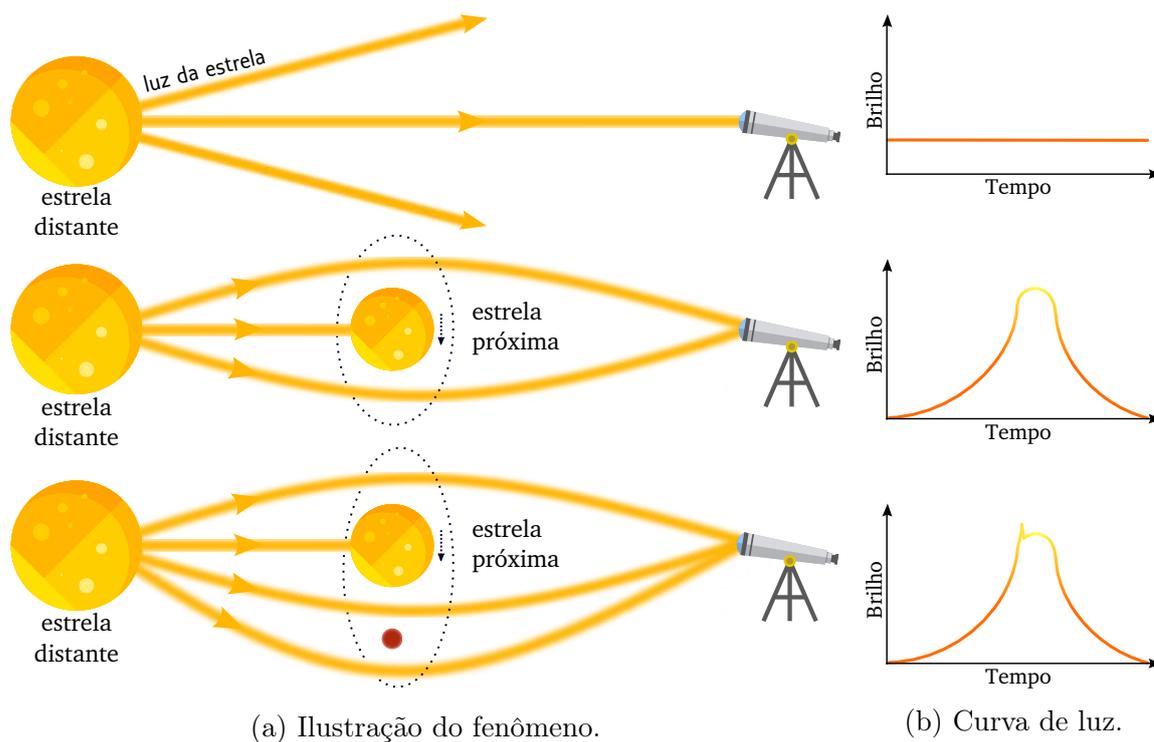


Figura 2.6: Detecção do brilho da estrela causada pelo alinhamento com uma estrela e seu exoplaneta através de microlentes gravitacionais. Ilustração autoral.

### *Microlenteamento gravitacional*

É uma técnica que permite a detecção de pequenos exoplanetas a longas distâncias, tendo sido utilizada na descoberta de 83 (2%) dos exoplanetas atualmente confirmados, sendo baseada e explicada pela Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein (1879 – 1955)<sup>[22]</sup>. Segundo Einstein, a gravidade é uma propriedade geométrica do espaço-tempo, na qual massa e energia deformam a estrutura do espaço-tempo. Logo, esse efeito faz com que a gravidade de um objeto maciço, como uma estrela ou um planeta, afete a trajetória da luz emitida por objetos mais distantes, atuando como uma lente<sup>[20,23]</sup>. No caso do microlenteamento, o efeito observado é a magnificação da luz de uma estrela fonte quando a lente cruza a sua linha de visada, e dura tipicamente de alguns dias a semanas, como ilustrado na Figura 2.6a. Se a lente é uma estrela que possui um planeta, a magnificação apresentará um pico correspondente ao efeito adicional da gravidade do planeta, como ilustrado na Figura 2.6b. Trata-se de um fenômeno relativamente raro e

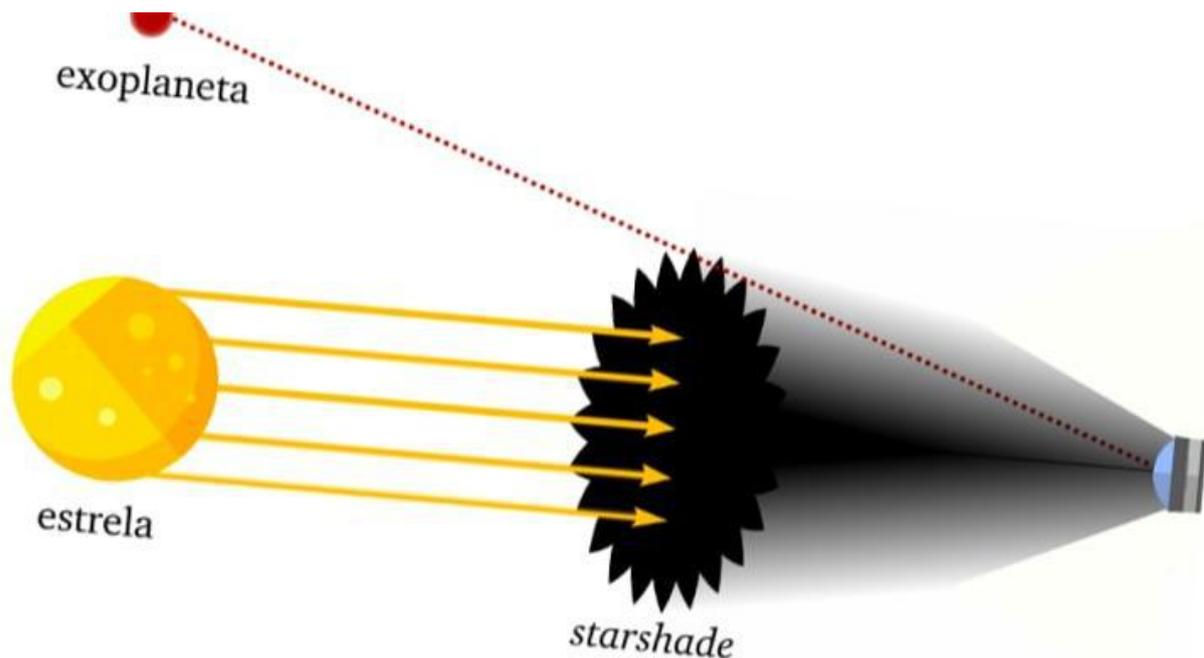


Figura 2.7: Detecção de um exoplaneta através do bloqueio da luz de sua estrela usando o *starshade* pelo Imageamento Direto. Ilustração autoral.

não reprodutível, visto que, para um determinado sistema, a reprodução do alinhamento necessário com uma estrela fonte é bastante improvável. Esse método permite a detecção de exoplanetas de baixa massa e até super-Terras, além de uma estimativa do semi-eixo maior.

#### *Imageamento direto*

É uma das técnicas menos usadas e mais difíceis para detectar exoplanetas, tendo identificado apenas 47 exoplanetas, ou seja 1,2% dos já confirmados<sup>[22]</sup>. A dificuldade em aplicá-la se dá pelo fato de que as estrelas são milhões ou bilhões de vezes mais brilhantes que os exoplanetas que as orbitam. Logo, a luz refletida no planeta e a sua emissão térmica são ofuscados pela radiação proveniente de sua estrela hospedeira. O método se baseia no imageamento dos exoplanetas usando técnicas que removam o brilho da estrela hospedeira, geralmente na faixa do infravermelho (IV)<sup>[20,23]</sup>. Utiliza-se várias técnicas para bloquear a luz das estrelas e depois que o brilho é reduzido, é possível ver melhor os objetos ao redor da estrela. O bloqueio da luz pode ser feito por dois métodos, um deles

é através de um dispositivo dentro do telescópio que impede que a luz da estrela atinja seu detector, chamado de coronógrafo estelar. Além desse método, um projeto chamado de *starshade*<sup>[24]</sup> propõe o posicionamento de um dispositivo em um determinado ângulo e distância do telescópio, de forma que bloqueie a luz de uma estrela antes mesmo de entrar no telescópio, representado na Figura 2.7.

### 2.3.2 Missões espaciais

A partir da descoberta dos primeiros exoplanetas, as principais agências espaciais, como a NASA, a *European Space Agency* (ESA) e o *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), começaram a desenvolver missões que impulsionariam as fronteiras do estudo desses objetos e a busca por mundos potencialmente habitáveis.

O *Hubble Space Telescope* (HST), foi lançado em 1990 pela NASA em parceria com a ESA antes mesmo da certeza da existência de planetas fora do Sistema Solar. É um telescópio que orbita baixa acima da superfície da Terra, sendo um dos quatro grandes observatórios da NASA. O Hubble geralmente trabalha estudando mais profundamente exoplanetas descobertos por outros telescópios, obtendo imagens em infravermelho e no visível. Através da técnica de espectroscopia de trânsito, em 2001 o HST se tornou o primeiro telescópio a medir diretamente a atmosfera de um exoplaneta e analisar seu espectro, descobrindo a presença de sódio<sup>[25]</sup>. Em 2018 foi utilizado para o estudo da atmosfera de sete exoplanetas, três dos quais orbitam a zona de habitabilidade de sua estrela anã vermelha, TRAPPIST-1<sup>[26]</sup>. O telescópio Hubble continua até hoje a dar contribuições significativas para a pesquisa e estudo de exoplanetas, sendo único devido à sua durabilidade, estabilidade e precisão. Em 2019, o telescópio detectou a presença de vapor de água na atmosfera do exoplaneta K2-18 b, que possui oito massas terrestres e orbita dentro da zona de habitabilidade de sua estrela<sup>[27]</sup>.

O Telescópio Espacial Spitzer foi lançado pela NASA em 2003, sendo, junto com o Hubble, parte do Programa dos Grandes Observatórios. O Spitzer foi projetado para detectar radiação infravermelha<sup>[28]</sup>, sendo capaz de observar a atmosfera de exoplanetas

que eclipsam suas estrelas. Utilizando o telescópio Spitzer, em 2005, Charbonneau et al. observou diretamente pela primeira vez exoplanetas emanando luz infravermelha<sup>[29]</sup>, o que deu início a um novo tipo de observação direta de planetas. Essa descoberta permitiu a análise da atmosfera, do tamanho e da órbita de um exoplaneta.

A missão espacial *Convection, Rotation et Transits Planétaires* (CoRoT) foi lançada em 2006 pela parceria internacional entre o CNES, ESA e outros países, incluindo o Brasil. O telescópio tinha o intuito de observar continuamente campos estelares na Via Láctea por períodos de até 6 meses e embora focada em asterosismologia, a missão descobriu planetas extrassolares através do método de trânsito<sup>[30]</sup>. Apesar de contribuir bastante na detecção de exoplanetas, tendo revelado a existência de vários deles, a sonda CoRoT foi tirada de órbita em 2014.

Lançada pela NASA em 2009, a Missão Espacial Kepler é responsável pela maioria das descobertas de exoplanetas até agora. O Kepler foi um telescópio projetado para vasculhar uma região de 100 graus quadrados das constelações de Cisne e Lira, para descobrir planetas terrestres em trânsito dentro ou próximos à zona de habitabilidade e explorar a estrutura e diversidade dos sistemas planetários<sup>[8]</sup>. Devido a um defeito, em 2013 a missão Kepler primária se encerrou, deixando um legado de 2346 exoplanetas descobertos. Em 2014 retornou como a Missão Kepler Secundária (K2). Dentre as muitas descobertas dessas missões, foi descoberto em 2013 o primeiro exoplaneta rochoso Kepler-10b<sup>[31]</sup>, como também um exoplaneta rochoso, Kepler-78, do tamanho da Terra e dentro da ZH<sup>[32]</sup>. Depois de nove anos em atividade, as missões Kepler deixaram um legado de mais de 2600 exoplanetas descobertos.

O *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS) foi lançado pela NASA em 2018<sup>[33]</sup>, sendo o primeiro telescópio criado para vasculhar o céu inteiro. Seu intuito é pesquisar centenas de milhares de estrelas quanto à presença de exoplanetas, utilizando a técnica de trânsito planetário. Embora semelhante ao Kepler, os alvos da missão TESS são mais próximos do que as estrelas estudadas pelo Kepler e seu objetivo é encontrar exoplanetas próximos, que vão de pequenos e rochosos a gigantes, mostrando a diversidade de planetas

na Galáxia. Por se focar nas proximidades, muitos dos exoplanetas descobertos pelo TESS serão futuramente observados de forma mais detalhada com o lançamento do *James Webb Space Telescope* (JWST)<sup>[34]</sup>, programado para 2021, para a aquisição de dados na região do infravermelho. O telescópio JWST utilizará a espectroscopia de transmissão para estudar exoplanetas que orbitam estrelas frias próximas e obter espectros de alta qualidade de suas atmosferas. Um dos alvos desse telescópio será o sistema planetário TRAPPIST-1. Apesar de orbitar estrelas frias, esses exoplanetas podem apresentar condições superficiais que permitam a existência de água líquida.

### 2.3.3 *Dados Gerais*

Até dezembro de 2019, foi confirmada a existência de 4104 exoplanetas pelo Arquivo de Exoplanetas da NASA<sup>1</sup>. Os exoplanetas descobertos são categorizados de acordo com suas similaridades com corpos do nosso Sistema Solar. De acordo com arquivo de exoplanetas da NASA<sup>[22]</sup>, 1375 são exoplanetas gigantes de gelo similares a Netuno, 1272 são considerados Super-Terras, 1290 são gigantes gasosos similares à Júpiter, 161 são terrestres e apenas 6 deles têm suas propriedades ainda desconhecidas. A partir da análise da base de dados do The Extrasolar Planets Encyclopaedia<sup>2[35]</sup>, de todos esses exoplanetas confirmados, 1983 deles possuem o raio medido até 3 vezes o raio da Terra. Apenas 52 exoplanetas confirmados possuem massa medida menor ou igual a 3 vezes a massa da Terra. E apenas 45 deles possuem raio e massa até 3 vezes o raio e massa da Terra, possuindo portanto valores de densidade semelhantes ao nosso planeta.

## 2.4 HABITABILIDADE

O termo habitabilidade é usado na literatura de diversas áreas científicas e consiste genericamente na capacidade de um ambiente de sustentar a atividade de pelo menos um organismo conhecido, segundo Cockell<sup>[16]</sup>. A astrobiologia tenta reunir as exigências

---

<sup>1</sup>O catálogo pode ser acessado em: <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/>.

<sup>2</sup>O catálogo pode ser acessado em: <http://exoplanet.eu>

necessárias para o suporte da vida e extrapolá-las para ambientes fora da Terra. Logo, baseados nos moldes terrestres, buscamos planetas residindo dentro da zona de habitabilidade estelar, a região ao redor da estrela onde água líquida possa existir de forma estável em sua superfície<sup>[10]</sup>. Entretanto, existem muitos fatores que influenciam a habitabilidade, abrangendo desde as características da estrela hospedeira, seu ambiente local e Galáctico, até a natureza do próprio planeta<sup>[36]</sup>. Assim, para estudar habitabilidade, é necessário estabelecer alguns critérios que os sistemas devem atender para poderem ser considerados promissores.

Alguns defendem que não só as estrelas possuem uma zona de habitabilidade, mas que as galáxias também a possuem. A zona de habitabilidade galáctica pode ser definida em termos da probabilidade de planetas habitáveis existirem em cada tipo de estrutura presente em galáxias porém, por ser ainda uma discussão bastante controversa, não aprofundaremos esse tópico no presente trabalho. A zona de habitabilidade estelar depende do tempo de vida e do tipo de estrela a ser considerada. Estrelas consideradas jovens são significativamente mais ativas do que as mais antigas. Logo, quanto mais nova a estrela, maior será sua radiação eletromagnética de alta energia, maior a frequência e intensidade de explosões, como também maior a quantidade de material expelido por ela. Portanto, devido à sua instabilidade, é improvável a formação e manutenção de vida em torno de estrelas mais novas que várias centenas de milhões de anos. Conforme as estrelas da sequência principal envelhecem, elas vão ficando mais luminosas, resultando no afastamento gradual de sua zona de habitabilidade. Assim, planetas próximos a essa borda interna tendem a saírem da zona de habitabilidade.

As anãs M possuem baixa luminosidade, logo sua região habitável é muito próxima, resultando em alta ação das forças de maré no planeta. Isso pode ser prejudicial para o desenvolvimento de vida, visto que o planeta poderá ter apenas uma face virada para a estrela. Como as estrelas anãs M são as mais abundantes na Galáxia e possuem longo tempo de vida, elas aumentam consideravelmente a probabilidade de acharmos planetas similares à Terra orbitando suas zonas de habitabilidade<sup>[36]</sup>. A Figura 2.8 ilustra os limites

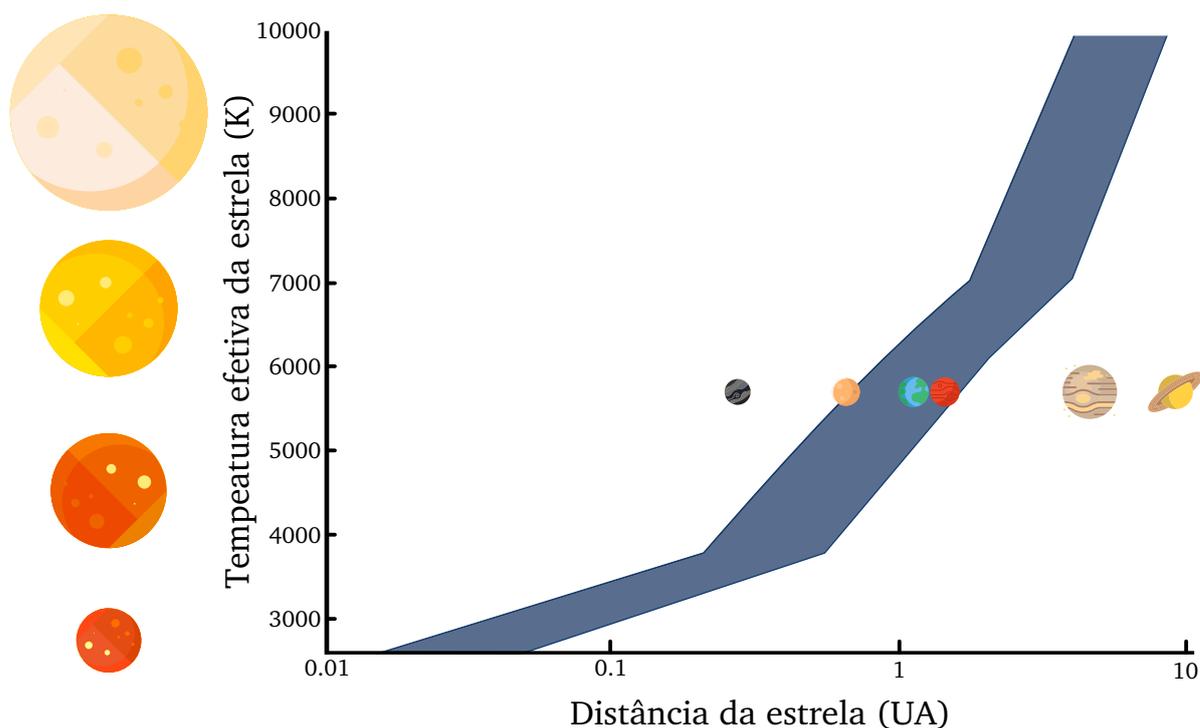


Figura 2.8: Ilustração da zona de habitabilidade estelar. Ilustração autoral.

da zona de habitabilidade estelar para diferentes tipos de estrela e a posição dos planetas do Sistema Solar com relação à sua ZH.

É imprescindível que um planeta possua condições físico-químicas e de temperatura adequadas que permitam um solvente, energia suficiente acessível e um conjunto de elementos requeridos para a vida<sup>[16]</sup>. A água líquida é considerada, até o momento, o único composto usado em todas as reações bioquímicas, sendo um solvente universal. Entretanto, para isso são necessárias condições ambientais de temperatura, pressão e impurezas químicas. A variação dessas condições permite a presença de água líquida abaixo de 273 K, como também acima de seu ponto de ebulição. Isso possibilita que a água líquida e conseqüentemente a vida possam existir em muitas condições ambientais. Em um planeta rochoso, a distribuição de água líquida pode existir de duas formas. Quando o planeta recebe energia o suficiente, permitindo água em sua superfície e interior, como a Terra. E quando o planeta não recebe energia para manter a água líquida na superfície, mas a possui em seu interior, o que é o caso de Europa, um satélite de Júpiter e Encélado, uma lua de Saturno.

Todos os organismos necessitam de energia, seja para se manterem, crescerem ou reproduzirem e a fonte primária de energia em um planeta é a radiação de suas estrelas hospedeiras. Para utilizar essa energia, os organismos vivos a convertem de energia luminosa para energia química. Até o que se sabe, a adenosina trifosfato (ATP) é a molécula que armazena energia nos seres vivos e, quando quebrada, libera essa energia permitindo a ocorrência de reações metabólicas.

Uma alta metalicidade planetária é essencial, visto que alguns elementos são extremamente necessários para a existência de vida, seja pela atuação de elementos pesados na manutenção de uma atividade geológica no planeta, seja por eles serem encontrados em todas as moléculas que formam os organismos. Esses elementos presentes nas macromoléculas biológicas são C, H, N, O, P e S. Toda forma de vida que conhecemos é baseada em carbono, utilizado como um átomo central, formando cadeias ligadas ao hidrogênio em todas as macromoléculas biológicas. O nitrogênio é particularmente encontrado no DNA e RNA, como também em proteínas. O oxigênio é encontrado em uma variedade de moléculas, sendo necessário no processo de respiração para organismos aeróbios. O fósforo faz parte do DNA/RNA, como também do ATP. Já o enxofre aparece em diversas ligações proteicas, como também em muitas moléculas envolvidas na aquisição de energia. Portanto, baseado no que já conhecemos na Terra, para que um planeta seja habitável por uma escala de tempo geológica, ele precisa atender essas três condições.

Como pode ser observado na Figura 2.8, a Terra se situa dentro dos limites da zona de habitabilidade do Sistema Solar, a aproximadamente 150 milhões de km, ou seja, 1 Unidade Astronômica (UA) do Sol. De acordo com Kasting and Catling<sup>[10]</sup>, a ZH solar atualmente se estende entre cerca de 0,9 a 1,5 UA, englobando além da Terra, o planeta Marte. Quando o Sol era mais jovem e menos luminoso, Vênus residia em sua zona de habitabilidade, mas hoje, junto de Mercúrio, habitam uma região tão quente que evaporaria qualquer molécula de água presente. Os outros planetas do Sistema Solar, tais como Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, encontram-se depois do limite externo da ZH, logo são extremamente frios e só comportariam água congelada.

## 2.4.1 Sistema TRAPPIST-1

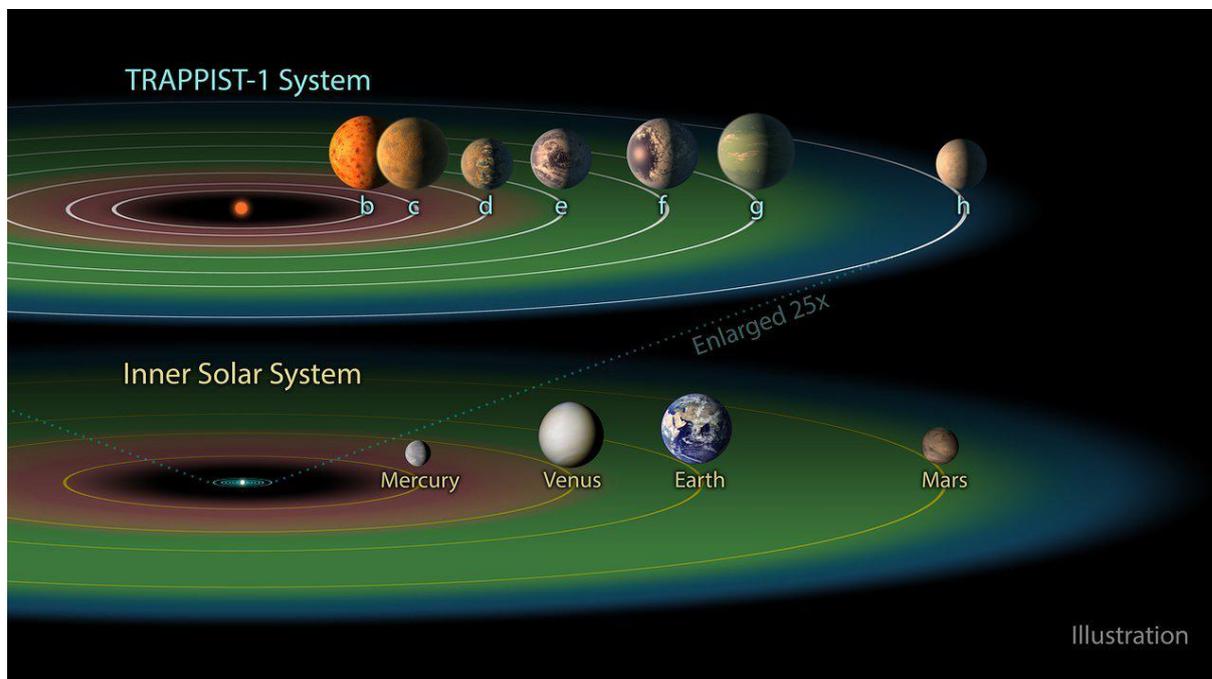


Figura 2.9: Ilustração da zona de habitabilidade (em verde) do sistema TRAPPIST-1, comparada ao Sistema Solar. Fonte: Jet Propulsion Laboratory NASA.

Nos últimos anos, a busca por regiões habitáveis fora do Sistema Solar resultou na descoberta de muitos sistemas planetários promissores. No ano de 2016, um telescópio no Chile, o *Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope* (TRAPPIST), descobriu a existência de três exoplanetas terrestres orbitando uma estrela a apenas 40 anos-luz da Terra<sup>[37]</sup>. Essa estrela, nomeada de *TRAPPIST-1*, foi observada posteriormente pelo telescópio Spitzer e muitos telescópios terrestres, que desvendaram a existência de mais quatro outros mundos rochosos a orbitando<sup>[38]</sup>. A descoberta desse sistema de sete planetas rochosos, em que todos apresentam potencial de água, não necessariamente líquida, em sua superfície, é um grande passo rumo à descoberta por vida em outros mundos. Além do nosso Sistema Solar, *TRAPPIST-1* é o sistema mais estudado e melhor elucidado até o momento.

TRAPPIST-1 é uma estrela muito menor e mais fria que o Sol e, dentre seus sete planetas, três se encontram dentro dos limites da sua ZH (*TRAPPIST-1 e, f e g*, ver

Figura 2.9)<sup>[26]</sup>. Todas as sete órbitas planetárias estão mais próximas da estrela (entre 0,01 UA e 0,06 UA) do que Mercúrio está do nosso Sol, como pode ser visto na Figura 2.9. As densidades dos planetas sugerem que alguns podem ter até 5% de sua massa em forma de água, o que é 250 vezes mais do que os oceanos da Terra. O exoplaneta *TRAPPIST-1 e* é o planeta mais denso dos sete, com alto potencial de hospedar ao menos um pouco de água líquida em sua superfície<sup>[39]</sup>. O telescópio Hubble foi utilizado para obter os primeiros dados espectroscópicos dos planetas d, e, f e g, que se encontram dentro da ZH de TRAPPIST-1, em busca de hidrogênio<sup>[26]</sup>. Como hidrogênio é um gás do efeito estufa, sua presença pode esquentar o planeta ao ponto de torná-lo inóspito à vida, entretanto o gás não foi encontrado na atmosfera dos exoplanetas. O JWST irá investigar com mais profundidade as atmosferas planetárias do sistema TRAPPIST-1, em busca de gases mais pesados como o dióxido de carbono, água, metano e oxigênio. Essas substâncias servem como bioassinaturas, podendo oferecer indícios da presença de vida ou se os planetas são habitáveis<sup>[22]</sup>.

## Capítulo 3 | *Metodologia*

---

Para um planeta ser considerado habitável, é necessário que ele possua uma órbita dentro dos limites da zona de habitabilidade de sua estrela hospedeira. Quando se trata de abrigar água líquida na superfície de um planeta rochoso, um dos fatores mais importantes a serem determinados é sua temperatura de equilíbrio. A maior fonte de calor de um planeta é a radiação de sua estrela hospedeira. De fato, outras fontes como aquecimento de maré e atividades vulcânicas podem contribuir, mas de forma mais sutil. A temperatura de um planeta depende, em grande parte, da sua distância para a estrela. Logo, quanto mais perto da estrela, mais radiação o planeta receberá e maior será sua temperatura; enquanto isso, se o planeta estiver mais longe, o fluxo de energia e conseqüentemente sua temperatura serão menores.

Nos casos de planetas que possuem órbitas circulares, a energia recebida por eles ao longo do ano é constante, se desprezarmos variações na emissão da estrela. Entretanto, em planetas de órbitas mais excêntricas, a temperatura sofre variação, devido à alteração da distância entre o planeta e a estrela ao longo da órbita. Planetas com alta oscilação térmica podem não apresentar características muito promissoras ao surgimento da vida, devido ao clima instável, que pode rapidamente extinguir qualquer eventual forma de vida que comece a surgir. Contudo, a presença de uma atmosfera pode contribuir com a estabilização de sua temperatura ao longo do ano. De fato, nesses casos, a presença de uma atmosfera pode evitar com que o planeta dependa inteiramente da oscilação do fluxo estelar e tenha sua temperatura muito variável.

Dessa forma, temos o objetivo de estudar a variação de temperatura do planeta ao

longo de sua órbita, baseada nos moldes de Pinotti<sup>[1]</sup>. A modelagem foi feita para exoplanetas com diferentes características atmosféricas e excentricidades orbitais. Todas as simulações foram realizadas utilizando a interface de programação Mathematica. Inicialmente, a modelagem também foi desenvolvida de forma concomitante em Python, entretanto decidimos não dar continuidade à essa implementação devido à demora computacional.

### 3.1 MODELAGEM DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

No interior de uma estrela, a energia criada a partir da fusão nuclear é transmitida em forma de radiação, aquecendo os planetas que a orbitam. Parte dessa radiação, ao encontrar a atmosfera ou superfície de um planeta, é refletida de volta para o espaço, enquanto outra parte é absorvida. O resultado do balanço energético entre essa energia absorvida e a energia emitida de volta pelo planeta constitui a temperatura de equilíbrio de um planeta<sup>[40]</sup>:

$$T(t) = \left[ \frac{F(t)(1 - A)}{4\sigma\epsilon} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (3.1)$$

A temperatura de equilíbrio de um planeta  $T(t)$ , expressa pela equação 3.1, depende da variação de  $F(t)$ , que consiste no fluxo radiativo em todo o espectro eletromagnético da estrela hospedeira em função do tempo. O parâmetro  $A$  representa a porcentagem de luz incidente que o planeta reflete de volta para o espaço, sendo chamado de albedo planetário, e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, dada por  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Visto que corpos negros irradiam tudo o que absorvem, eles possuem a maior capacidade de emitir energia térmica. A emissividade de um planeta, representada por  $\epsilon$ , consiste na razão entre a radiação térmica de sua superfície e a radiação de um corpo negro na mesma temperatura.

Nesse trabalho, admitimos que variação da temperatura do planeta é resultado da

oscilação do fluxo da estrela, que ocorre por causa da variação da distância entre o planeta e a estrela ao longo da órbita. Essa variação do fluxo estelar ao longo do tempo pode ser calculada como:

$$F(t) = \frac{L}{4\pi r^2(t)}. \quad (3.2)$$

O fluxo da estrela é, portanto, dependente de sua luminosidade  $L$ , e é inversamente proporcional ao quadrado da distância orbital  $r$  do planeta. Neste trabalho, a luminosidade da estrela, que consiste na energia emitida por unidade de tempo, foi calculada através do raio da estrela  $R_{estrela}$  e de sua temperatura efetiva  $T_{eff}$ :

$$L = 4\pi\sigma R_{estrela}^2 T_{eff}^4. \quad (3.3)$$

A distância orbital  $r$  é dada em função do tempo e pode ser calculada como demonstrado pela equação 3.4, na qual  $a$  representa o semi-eixo maior,  $E$  constitui a anomalia excêntrica e a excentricidade da órbita é representada por  $e$ .

$$r(t) = a[1 - e \cos(E(t))]. \quad (3.4)$$

O significado do semi-eixo maior e da anomalia excêntrica para uma órbita elíptica podem ser vistos na Figura 3.1. Os valores de  $E(t)$  foram obtidos numericamente invertendo a relação:

$$t(E) = \frac{P}{2\pi}[E - e \sin(E)], \quad (3.5)$$

onde  $P$  representa o período orbital do planeta, ou seja, o tempo total em segundos em que o planeta completa uma volta em torno de sua estrela hospedeira. A equação 3.6 mostra o cálculo do período orbital planetário, na qual  $G$  representa a constante gravitacional universal, dada por  $6,67408 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ ,  $M_{estrela}$  representa a massa estelar e

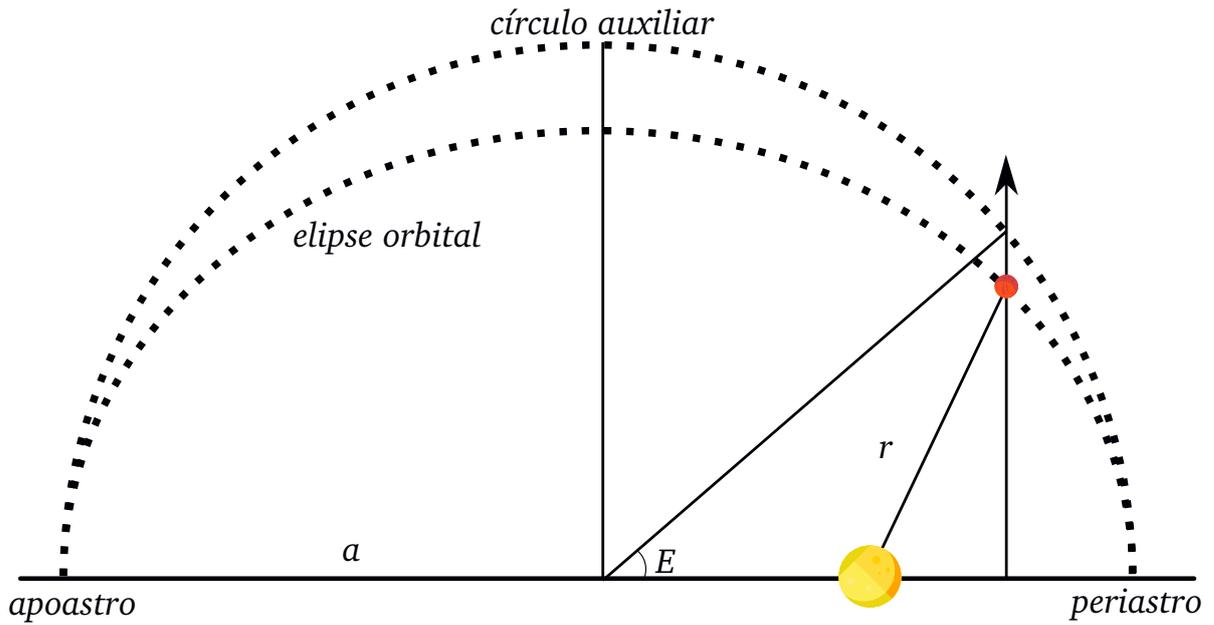


Figura 3.1: Diagrama representando a anomalia excêntrica ( $E$ ), semi-eixo maior ( $a$ ) e a distância orbital ( $r$ ), dependentes da posição de um planeta ao longo de sua órbita. Ilustração autoral.

$M_{planeta}$  a massa do planeta.

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{G(M_{estrela} + M_{planeta})}}. \quad (3.6)$$

Nesse trabalho, modelamos a atmosfera planetária através de sua densidade colunar  $\chi$ , e da capacidade térmica molar de seus componentes  $c_p$ , seguindo Pinotti<sup>[1]</sup>. A capacidade térmica molar é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura em 1 K de uma amostra contendo 1 mol da substância em questão. Logo, a capacidade térmica de uma atmosfera determina sua competência em manter o calor provindo da estrela e depende do conjunto dos gases que a compõem. A densidade colunar de uma atmosfera é o produto entre a densidade molar média de seus gases constituintes e a espessura total atmosférica. A variação da temperatura média do planeta é dada pela equação diferencial ordinária de primeira ordem<sup>[1]</sup>:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F(t)(1 - A)}{4\chi c_p} - \frac{\epsilon \sigma T^4}{\chi c_p}. \quad (3.7)$$

$E(t)$  pode então ser substituída na equação 3.4 para obtermos a dependência da distância orbital com o tempo que, por sua vez, pode ser substituída na equação 3.2, juntamente com a 3.3, para obtermos a dependência do fluxo de radiação da estrela como função do tempo.

## 3.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS LIVRES

Antes de aplicarmos a equação 3.7 em exoplanetas reais, estudamos a influência dos seus parâmetros livres, a partir de um planeta hipotético com características baseadas na Terra. A equação 3.7 é dependente da oscilação do fluxo estelar ao longo do tempo  $F(t)$ , do albedo do planeta  $A$ , da densidade colunar atmosférica  $\chi$ , da capacidade térmica molar atmosférica  $c_p$  e da emissividade  $\epsilon$  do planeta. Uma vez escolhido o planeta, a variação do fluxo com o tempo é determinada pela luminosidade da estrela, o semi-eixo maior e a excentricidade da órbita. Primeiramente, estudamos como a excentricidade pode afetar a temperatura do planeta. Para tal, fixamos os valores dos outros parâmetros livres nos seus valores estimados para a Terra, indicados na Tabela 3.1. Em seguida, estudamos outros parâmetros livres no nosso modelo, observando o efeito da variação de cada um, quando mantínhamos todos os outros fixos, nos valores também indicados na Tabela 3.1, para analisar a influência de cada um na temperatura de uma Terra hipotética.

O primeiro parâmetro variado para ter sua influência analisada foi a excentricidade da órbita planetária. A excentricidade orbital consiste no quanto a órbita de um planeta se desvia de um círculo perfeito, ou seja, o quão elíptica é a órbita. Quando há uma variação significativa da distância entre o planeta e a estrela ao longo da órbita, espera-se verificar uma maior mudança da temperatura de um planeta ao longo do ano. Assim, foram realizadas simulações com excentricidade entre  $e = 0,0167$ , que é a excentricidade

Parâmetros	Valores
$A$	0,3
$\epsilon$	0,9
$e$	0,0167
$c_p$	32 J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\chi$	$3,4 \times 10^5$ mol m <sup>-2</sup>

Tabela 3.1: Valores de albedo, emissividade, excentricidade, capacidade térmica molar e densidade colunar atmosférica da Terra e usados como referência para o estudo da influência dos parâmetros livres<sup>[1]</sup>.

da órbita da Terra, considerada pouco excêntrica, e  $e = 0,3$ , considerada uma órbita excêntrica.

O albedo consiste na razão entre a radiação que incide em um objeto e a radiação que o mesmo reflete de volta. Quando essa razão é igual à 1, significa que o objeto reflete toda a radiação incidente, enquanto que, se a razão é zero, o objeto não reflete nada. Logo, quanto maior o valor do albedo do planeta, maior sua capacidade refletiva. A equação 3.7 foi resolvida utilizando dois valores de albedo planetário,  $A = 0,1$  e  $A = 0,8$ , próximos aos albedos planetários extremos encontrados no sistema solar (de Mercúrio e de Vênus, respectivamente), para avaliar a influência desse parâmetro sobre a variação da temperatura resultante do exoplaneta.

A emissividade de um objeto está relacionada com a eficiência de sua emissão térmica. Todos os objetos que se aquecem emitem radiação, sendo a emissividade a razão entre essa radiação emitida por um objeto numa dada temperatura, quando comparada à radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura. Um corpo negro é, portanto, um objeto que atinge equilíbrio térmico na menor temperatura possível, enquanto todos os outros objetos atingem equilíbrio em temperaturas maiores. Corpos negros possuem emissividade 1, visto que absorvem toda energia incidida neles, aquecendo-os e, portanto, a emitem em forma de radiação. Logo, qualquer objeto, como um planeta, possui emissividade menor que 1 e, portanto, dependerá de uma maior temperatura para emitir a mesma

radiação que um corpo negro emitiria. Assim, resolvemos a equação 3.7 utilizando dois valores de emissividade,  $\epsilon = 0,7$  e  $\epsilon = 0,9$ , para observar sua influência na temperatura de um exoplaneta.

A capacidade térmica molar ou calorífica determina a associação entre a quantidade de calor fornecida a um objeto e a variação de sua temperatura. É uma propriedade dependente do tipo de material, ou seja, das moléculas que compõem a atmosfera, sua temperatura, e pressão. Foram testados dois valores de capacidade térmica, sendo eles  $c_p = 30 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e  $c_p = 90 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , de acordo com valores extremos encontrados em Pinotti<sup>[1]</sup>. Os valores são referentes à capacidade térmica molar de gases como  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$ , a temperatura de 50 K e  $\text{NH}_4$ , a temperatura de 1500 K.

Como já dito, a densidade colunar atmosférica consiste no produto entre a densidade molar média das moléculas existentes e a altura da atmosfera. Acredita-se que a presença de uma atmosfera atenua a variação extrema de temperatura em casos de planetas com órbitas excêntricas. Logo, foram testadas as variações de temperatura para casos com  $\chi = 10^4 \text{ mol m}^{-2}$ , considerada uma atmosfera fina e  $\chi = 10^6 \text{ mol m}^{-2}$ , considerada uma espessura de atmosfera mais grossa.

A variação desses parâmetros gera diferentes modificações nos gráficos de temperatura de um planeta como função do tempo. Utilizamos quatro indicadores para determinar a influência de cada parâmetro na variação da temperatura do planeta ao longo de sua órbita. Na Figura 3.2, apresentamos alguns exemplos ilustrativos de resultados da equação 3.7, a fim de ilustrar a influência da variação de cada indicador sobre as curvas. O primeiro, chamado de atenuação e proposto por Pinotti<sup>[1]</sup>, é uma medida da diferença entre a temperatura máxima atingida por um planeta com atmosfera e aquela que seria atingida por esse mesmo planeta se não houvesse atmosfera (ver Figura 3.2a). O segundo, também proposto por Pinotti<sup>[1]</sup> e denominado *phase lag*, é uma medida da diferença entre os tempos em que as temperaturas máximas são atingidas nesses dois casos (ver Figura 3.2b). Propomos mais dois indicadores, que denominamos *assimetria* e *estreitamento*, para quantificar a influência dos parâmetros estudados, ambos calculados como  $1 - (b \div a)$

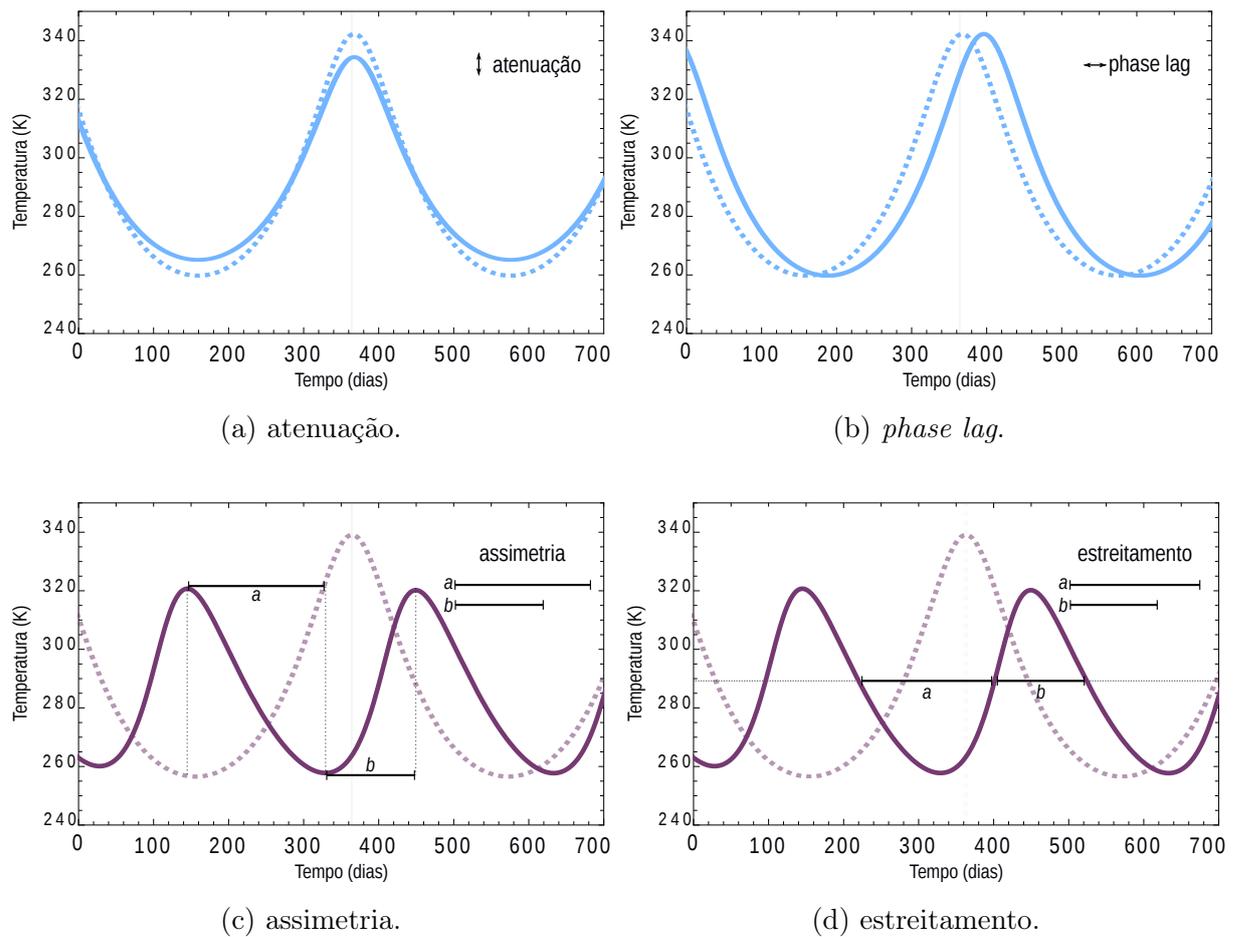


Figura 3.2: Gráficos ilustrando os quatro parâmetros de análise das curvas. As curvas em linha sólida representam a variação da temperatura para um planeta com atmosfera ( $\chi$  e  $c_p$  não nulos), e as curvas pontilhadas representam o resultado para o mesmo planeta, no caso sem atmosfera.

e  $1 - (d \div c)$  nas Figuras 3.2c e 3.2d, respectivamente. A assimetria mede a diferença entre o tempo que leva para o planeta resfriar, quando está se afastando do periastro em direção ao apoastro, em comparação com o tempo que leva para o planeta aquecer, quando sai do apoastro em direção ao periastro, como mostrado na Figura 3.2c. A Figura 3.2d exemplifica uma medida do estreitamento, que quantifica a suavização na variação da temperatura no apoastro, com relação ao periastro, ou seja, quão brusca é a variação de temperatura no periastro, quando comparado ao apoastro. Em casos em que esse efeito é muito intenso, o planeta passa muito mais tempo com temperaturas mais frias próximas às do apoastro, do que com temperaturas mais quentes próximas às do periastro.

### 3.3 INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO INICIAL

Para resolver a equação diferencial 3.7 é necessário configurar uma condição inicial para a temperatura no instante  $t = 0$ , que consideramos como acontecendo no periastro ( $T_0$ ). Para verificar se a condição inicial de temperatura poderia influenciar na estabilização da temperatura de um exoplaneta, analisamos três condições iniciais distintas para uma Terra hipotética sem atmosfera ( $A = 0,3$ ,  $e = 0,0167$ ,  $\epsilon = 0,9$ ) na Figura 3.3a, como também para um planeta com as características do exoplaneta *TRAPPIST-1 f* sem uma atmosfera ( $A = 0,3$ ,  $e = 0,061$ ,  $\epsilon = 0,9$ ), que possui um semi-eixo maior inferior a 0,1 UA, na Figura 3.3b. Para a Terra hipotética, a condição inicial foi calculada através da equação 3.1, que resultou em  $T_0 = 263$  K. Para comparação, analisamos também os casos em que  $T_0$  é 100 K acima e 100 K abaixo desse valor. Para o *TRAPPIST-1 f* o cálculo foi feito da mesma maneira, resultando em  $T_0 = 208$  K, também comparando com os casos em que  $T_0$  é 100 K acima e 100 K abaixo do valor calculado. A Figura 3.3a mostra que o comportamento da temperatura se estabilizou ao mesmo tempo, cerca de 250 dias (menos de um período) após  $t = 0$ , independentemente da condição inicial, enquanto que na 3.3b o comportamento da temperatura se estabilizou antes de 20 dias (menos de dois períodos) após  $t = 0$ . Assim, concluiu-se que a condição inicial escolhida não teria influência significativa no resultado. Logo, para todos os outros exoplanetas, a condição inicial utilizada foi obtida resolvendo a equação 3.1 no periastro. Nota-se que nem sempre diferentes soluções obtidas com diferentes condições iniciais convergem em intervalos de tempo da ordem de 1 período orbital. Veremos na seção 4.2.3 exemplos em que isso não acontece. De fato, verificamos que o tempo necessário para que ocorra a convergência aumenta com a diminuição do fluxo de energia da estrela recebido, ou seja, aumenta para estrelas menos luminosas e também para órbitas mais distantes. Na seção 4.2.3 comentaremos também sobre como a presença de uma atmosfera pode afetar essas conclusões.

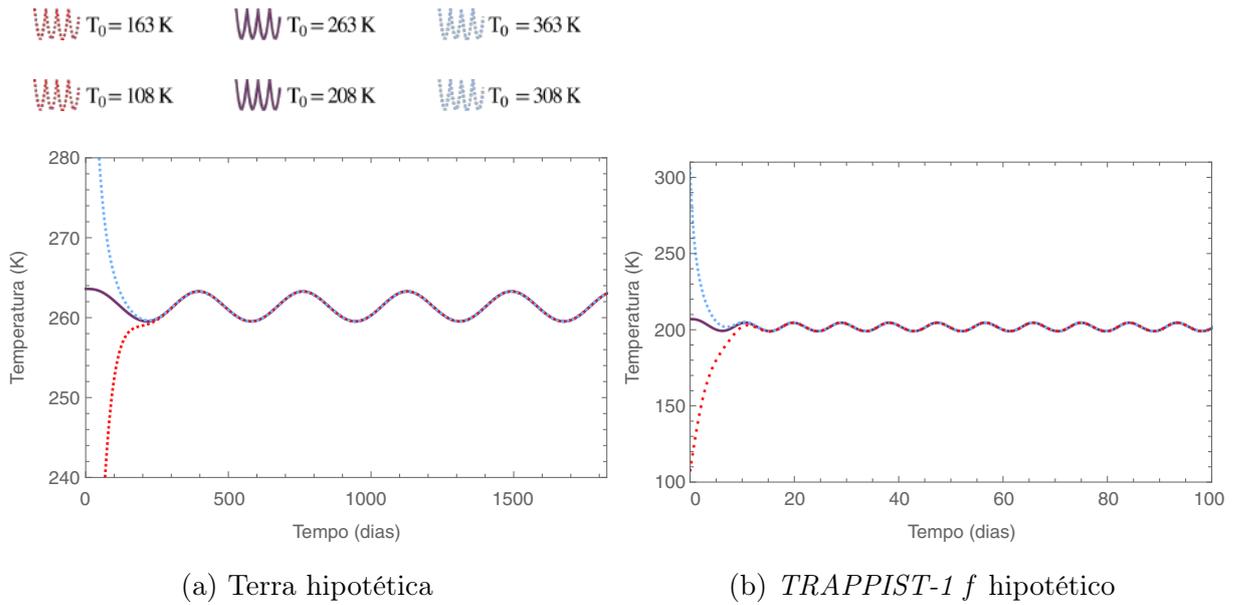


Figura 3.3: Temperatura como função do tempo para seis planetas hipotéticos sem atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os três planetas à esquerda orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA, com a excentricidade orbital da Terra e com três condições iniciais de temperatura diferentes. Os três planetas à direita orbitam uma estrela com luminosidade da TRAPPIST-1, em uma órbita com semi-eixo maior de 0,038 UA, com excentricidade orbital de 0,061 e três condições iniciais de temperatura diferentes.

### 3.4 SELEÇÃO DE EXOPLANETAS

O processo de seleção dos exoplanetas a serem estudados partiu de uma pesquisa minuciosa no banco de dados de acesso livre `exoplanet.eu`. Foram coletados dados referentes às características de cerca dos 4000 exoplanetas confirmados, como exemplificado na Tabela 3.2, tais como massa, raio, semi-eixo maior e excentricidade orbital, como também propriedades de suas estrelas, como temperatura efetiva, massa e raio. Realizamos cálculos para determinar a densidade desses exoplanetas que possuíam raio e massa medidos, selecionando aqueles de tamanhos semelhantes à Terra, ou seja, de raio 2 vezes menor a 3 vezes maior que o da Terra. Todos os sete planetas do sistema planetário *TRAPPIST-1*, a aproximadamente 40 anos-luz da Terra, apresentavam essas características e decidimos usá-lo como foco da pesquisa. Visto que, como já sabido na literatura, três dos sete planetas (*TRAPPIST-1 e, f e g*) estão dentro dos limites da zona de habitabilidade de sua

estrela, os escolhemos para análise.

Parâmetros Físicos	<i>TRAPPIST-1 e</i>	<i>TRAPPIST-1 f</i>	<i>TRAPPIST-1 g</i>
Massa do planeta ( $M_{\oplus}$ )	0,772	0,934	1,148
Raio do planeta ( $R_{\oplus}$ )	0,918	1,045	1,126
Semi-eixo maior (UA)	0,029	0,038	0,047
Excentricidade orbital	0 ( $_{-0}^{+0,085}$ )	0 ( $_{-0}^{+0,063}$ )	0 ( $_{-0}^{+0,061}$ )

Tabela 3.2: Parâmetros Físicos coletados da base de dados exoplanet.eu. O símbolo “ $\oplus$ ” representa quantidades referentes à Terra.

A estrela *TRAPPIST-1* possui uma massa de  $(0,089 \pm 0,006) M_{\odot}$ , raio de  $(0,121 \pm 0,003) R_{\odot}$  e temperatura efetiva de 2560 K (onde o símbolo  $\odot$  representa quantidades referentes às do Sol). Então, os mesmos cálculos numéricos para a Terra hipotética foram realizados para os três exoplanetas, resolvendo a equação 3.7, para estudar a variação da temperatura desses exoplanetas ao longo de suas órbitas, determinando como a excentricidade da órbita, o albedo planetário e a presença de uma atmosfera afetam a habitabilidade para diversos casos hipotéticos e para os três exoplanetas do sistema *TRAPPIST-1* mencionados.

## Capítulo 4 | *Resultados*

---

Nesse capítulo, apresentamos os resultados da resolução da equação 3.7, para estudar o comportamento da temperatura de diferentes planetas. A seção 4.1 apresenta a influência individual de cada parâmetro na variação de temperatura de um planeta, considerado uma Terra hipotética. Depois de entender como cada parâmetro altera o comportamento da temperatura, a equação 3.7 foi aplicada para exoplanetas reais, como mostrado na seção 4.2.

### 4.1 SIMULAÇÕES EM TERRAS HIPOTÉTICAS

Como vimos no capítulo anterior, de acordo com o modelo adotado, se desconsiderarmos variações no fluxo da estrela hospedeira, a temperatura de um planeta vai depender da sua excentricidade orbital  $e$ , do albedo  $A$ , da emissividade  $\epsilon$  e de características atmosféricas, como sua densidade colunar  $\chi$  e capacidade térmica molar  $c_p$ . Para estudarmos como cada parâmetro interfere na variação da temperatura planetária, utilizamos planetas hipotéticos, com características baseadas nas da Terra, orbitando uma estrela com a mesma luminosidade do Sol ( $3,846 \times 10^{26}$  W), em uma órbita com o mesmo valor de semi-eixo maior que o da Terra (1 UA). Logo, para se obter a maneira com que cada parâmetro afeta a temperatura, resolvemos a equação 3.7 variando cada um de forma independente, enquanto mantínhamos os valores dos outros fixos nos valores apresentados na Tabela 3.1.

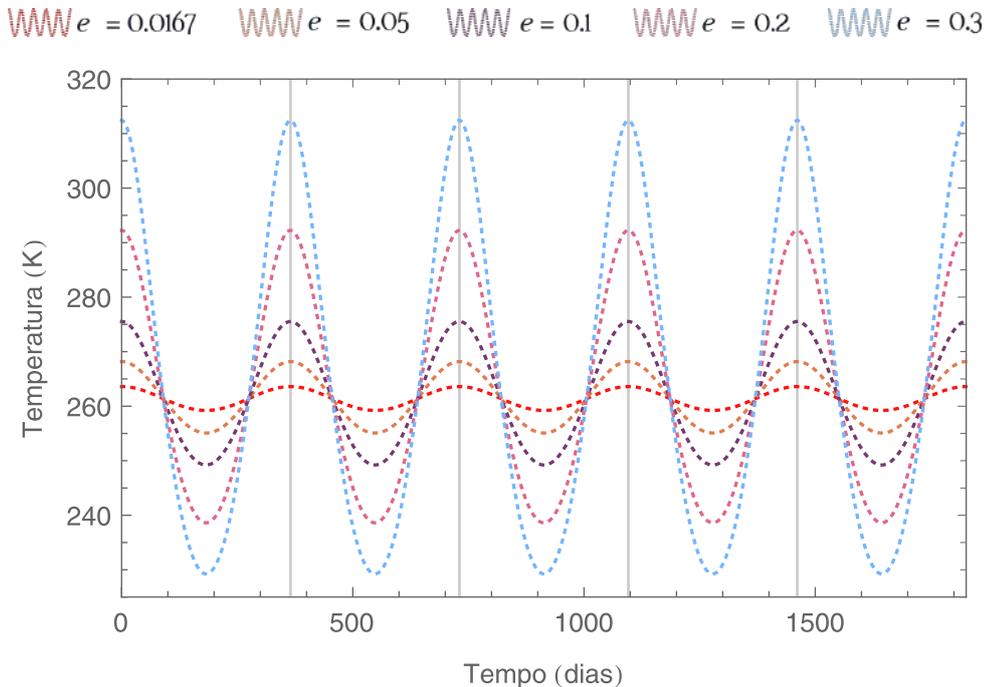
4.1.1 *Influência da Excentricidade*

Figura 4.1: Temperatura como função do tempo para cinco planetas hipotéticos sem atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os cinco planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com valores de excentricidade diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1.

A fim de estudar como a excentricidade orbital influencia o comportamento da temperatura de um planeta, a equação 3.7 foi resolvida para cinco valores de excentricidade distintos, para uma Terra hipotética sem atmosfera, ou seja, com  $\chi = 0$ . O menor valor ( $e = 0,0167$ ) equivale à excentricidade da órbita da Terra, que por ser quase circular, não acarreta alta variação de temperatura ao longo do ano. Como pode ser observado na Figura 4.1, a variação de temperatura aumenta conforme a excentricidade da órbita aumenta, ou seja, quanto maior a excentricidade orbital, maior a variação de temperatura do planeta ao longo do ano. Para a órbita mais excêntrica ( $e = 0,3$ ), a temperatura chega a variar cerca de 80 K ao longo do ano, característica que pode tornar o surgimento e/ou manutenção de vida mais difícil.

Cada curva de excentricidade foi analisada individualmente de acordo com os parâ-

metros propostos de assimetria e estreitamento. A assimetria das curvas foi calculada e, para todos os valores de excentricidade, foi obtida uma assimetria de 0,001, o que significa que todas as curvas são quase perfeitamente simétricas. As medidas de estreitamento das curvas também foram calculadas, como mostrado na Tabela 4.1, que indicam a influência da excentricidade na diferença entre as taxas de variação da temperatura no periastro e apoastro para cada órbita.

<b>Excentricidade</b>	0,0167	0,05	0,1	0,2	0,3
<b>Estreitamento</b>	0,014	0,023	0,077	0,193	0,268

Tabela 4.1: Medida de estreitamento para cada excentricidade orbital.

O resultado acima mostra que a variação da excentricidade da órbita não introduz atraso temporal (*phase lag*) na evolução da temperatura do planeta, ou seja, a temperatura máxima é atingida no periastro e a mínima no apoastro. No entanto, verificamos que o aumento da excentricidade introduz uma assimetria vertical nas curvas, quantificada através do indicador de estreitamento, que aumenta com a excentricidade. Esse efeito pode ser visto na Figura 4.1, como um estreitamento da largura dos máximos de temperatura, com relação aos mínimos, para cada excentricidade considerada e implica em uma variação de temperatura brusca próximo ao periastro da órbita, com relação à variação no apoastro. Como verificamos, a excentricidade da órbita é um parâmetro de extrema relevância no cálculo da temperatura de um planeta e, portanto, vamos considerar sempre dois casos limites de excentricidade quando analisarmos os casos de exoplanetas reais.

#### 4.1.2 *Influência do Albedo e Emissividade*

Outros parâmetros que influenciam a temperatura de um planeta consistem na sua capacidade de lidar com o calor incidente, ou seja, a eficiência com que o planeta consegue refletir e absorver radiação. Assim, a equação 3.7 foi resolvida variando os valores do albedo planetário e de emissividade individualmente, para avaliar os efeitos desses parâmetros na temperatura de uma Terra hipotética sem uma atmosfera, como pode ser visto

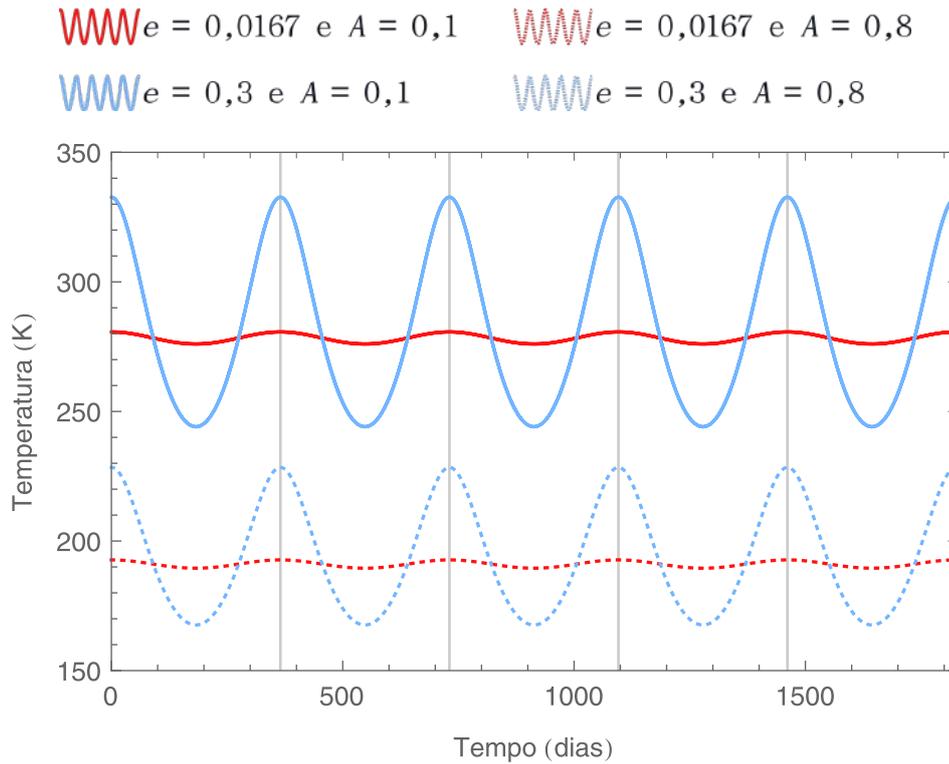


Figura 4.2: Temperatura como função do tempo para quatro planetas hipotéticos sem atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os quatro planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA, com valores de excentricidade orbital e albedo planetário diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1.

nas Figuras 4.2 e 4.3. Tanto a assimetria quanto o estreitamento foram calculados para cada caso para permitir a análise das curvas, como mostrado na Tabela 4.2.

A fim de observar como o albedo do planeta influencia sua temperatura em diferentes excentricidades orbitais, a equação 3.7 foi resolvida utilizando dois valores de albedo encontrados em planetas do Sistema Solar, para duas excentricidades orbitais distintas: a da Terra ( $e = 0,0167$ ) e um valor mais alto ( $e = 0,3$ ), maior do que a órbita de Mercúrio, que é de 0,2, visto que, como já comentado, exoplanetas parecem ter, em média, órbitas mais excêntricas do que as dos planetas do Sistema Solar. Utilizou-se um albedo pequeno ( $A = 0,1$ ), baseado em Mercúrio e um albedo significativo ( $A = 0,8$ ) baseado em Vênus.

Como pode ser verificado na Figura 4.2, o aumento do albedo, representado pelas curvas pontilhadas, provoca uma diminuição da temperatura do planeta. Além disso, podemos verificar que, para o caso de maior excentricidade, o aumento do albedo também

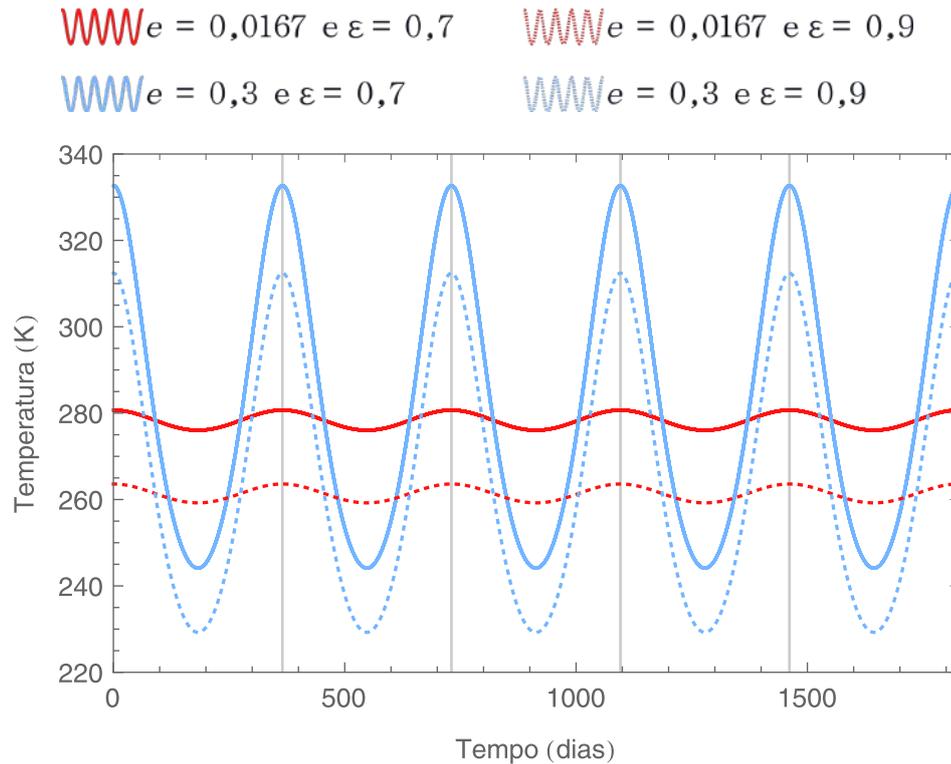


Figura 4.3: Temperatura como função do tempo para quatro planetas hipotéticos sem atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os quatro planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA, com valores de excentricidade orbital e emissividade planetária diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1.

reduziu a variação da temperatura do planeta ao longo do ano, ou seja, a variação do albedo provoca não somente uma alteração global da temperatura média de um planeta, mas também altera a variação da temperatura ao longo do ano. Com relação aos indicadores de assimetria e estreitamento, a Tabela 4.2 mostra que, para um mesmo valor de excentricidade, não houve alteração significativa em nenhum deles (consideramos as alterações apresentadas como dentro das margens de erro qualitativas de medida desses parâmetros), indicando que a variação do albedo não introduz assimetrias nas curvas de temperatura. Logo, vamos estudar sempre dois possíveis albedos quando analisarmos exoplanetas reais.

Com o objetivo de entender como a emissividade planetária afeta sua temperatura em diferentes excentricidades orbitais, a equação 3.7 foi resolvida utilizando duas emissividades distintas, para as duas excentricidades orbitais já citadas. A variação da temperatura

para diferentes valores de emissividade  $\epsilon = 0,7$  e  $\epsilon = 0,9$ , para duas excentricidades orbitais utilizadas na figura anterior, é apresentada na Figura 4.3. Esses resultados mostram que a diminuição da emissividade leva a um aumento global na temperatura do planeta, como esperado. Além disso, a diminuição da emissividade provoca um efeito de estreitamento nos máximos de temperatura, similar ao da excentricidade.

Parâmetro	Albedo $A$				Emissividade $\epsilon$			
	0,0167		0,3		0,0167		0,3	
Valor	A=0,1	A=0,8	A=0,1	A=0,8	$\epsilon=0,7$	$\epsilon=0,9$	$\epsilon=0,7$	$\epsilon=0,9$
Assimetria	0,005	0,016	0,022	0,012	0,011	0,000	0,011	0,005
Estreitamento	0,000	0,011	0,181	0,196	0,157	0,193	0,245	0,269

Tabela 4.2: Medidas de assimetria e estreitamento para os dois valores de albedo e emissividade diferentes para duas excentricidades orbitais distintas.

Como pode ser notado na Figura 4.2, o albedo planetário vai influenciar diretamente na temperatura do planeta, ou seja, um albedo baixo resultará em um planeta de altas temperaturas, enquanto um planeta de albedo alto será muito mais frio. A emissividade também interfere na temperatura, como mostrado na Figura 4.3, mas não tanto quanto o albedo. Como esperado, emissividades mais baixas aumentam a temperatura do planeta. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores dos indicadores para cada caso. Constatase que os valores de assimetria estão bem próximos de 0, tanto para o albedo quanto para a emissividade, logo o indicador de assimetria não muda significativamente para nenhum dos casos. O estreitamento aparenta ser insensível ao albedo planetário, pois a excentricidade que é a responsável pela diferença no valor de estreitamento entre a primeira coluna e a segunda. No entanto, a emissividade do planeta parece influenciar a medida de estreitamento, visto que os valores de estreitamento aumentam junto com a emissividade, para as duas excentricidades orbitais. Isso significa que a variação de temperatura do periastro com relação ao apoastro é mais suave para emissividades menores do que para valores de emissividades maiores.

### 4.1.3 Influência da Atmosfera

Todos os parâmetros até agora foram analisados individualmente sem uma atmosfera. Nesta seção, estudamos como a presença de uma atmosfera, ou seja, como sua densidade colunar  $\chi$  e capacidade térmica molar  $c_p$  afetam a variação de temperatura de uma Terra hipotética.

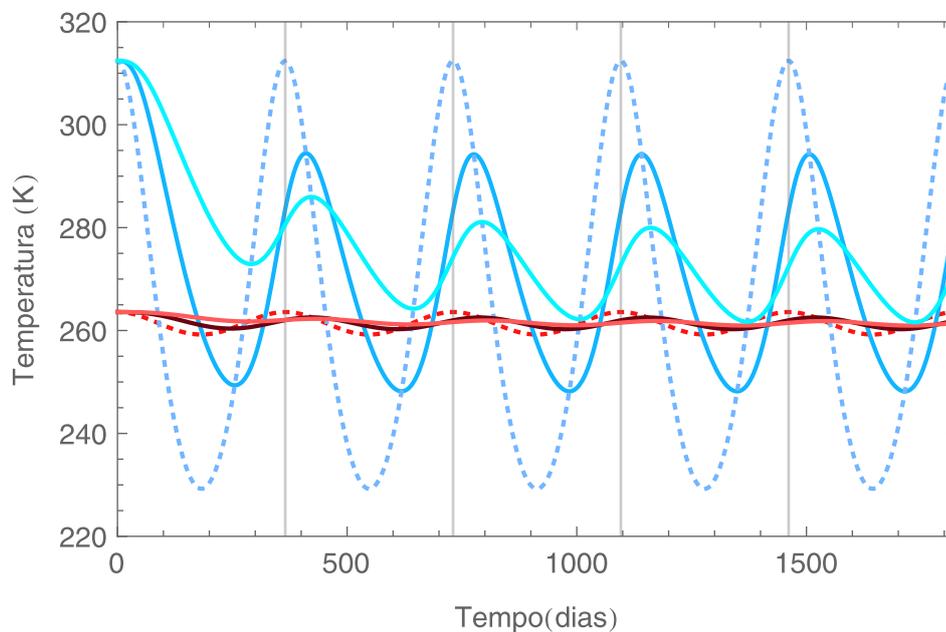


Figura 4.4: Temperatura como função do tempo, para quatro planetas hipotéticos com atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os quatro planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com valores de capacidade térmica molar diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1. Colocamos as curvas tracejadas correspondentes aos casos sem atmosfera, para comparação.

Primeiramente, para observar o efeito da capacidade térmica molar na temperatura, resolvemos a equação 3.7 variando o  $c_p$  para uma atmosfera espessa. Utilizamos duas capacidades térmicas, tiradas de Pinotti<sup>[1]</sup>, bem distintas:  $c_p = 30 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , como uma média de gases que compõem a atmosfera da Terra em temperatura ambiente e  $c_p = 90 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , como uma média dos mesmos gases à temperaturas extremamente altas

( $\approx 1500$  K). Visto que o  $c_p$  multiplica o  $\chi$  na equação 3.7, escolhemos utilizar a maior densidade colunar possível, a fim de maximizar o efeito de  $c_p$ . Foi usada uma atmosfera espessa ( $\chi = 10^6$  mol m $^{-2}$ ) para dois valores de excentricidade orbital,  $e = 0,0167$  e  $e = 0,3$ . Como pode ser visto na Figura 4.4, até com o mesmo valor de  $\chi$ , a variação de temperatura para os dois valores de  $c_p$  é completamente diferente. Como pode ser observado na Tabela 4.3, maiores valores de  $c_p$  atuam aumentando a atenuação e o *phase lag* para as duas excentricidades. Além disso, um valor de  $c_p$  alto faz com que a assimetria aumente, quando comparado com um  $c_p$  baixo, ou seja, o planeta demora mais tempo para esfriar (saindo do periastro em direção ao apoastro), do que demora para aquecer (do apoastro para o periastro). Como já visto anteriormente, a excentricidade orbital influencia na medida de estreitamento mas, como pode ser notado na Tabela 4.3, se o planeta possui baixa capacidade térmica molar, ele passa mais tempo com temperaturas mais frias próximas às do apoastro, do que com temperaturas mais quentes próximas às do periastro, resultando num maior valor de estreitamento.

Excentricidade	0,0167		0,3	
$c_p$ (J mol $^{-1}$ K $^{-1}$ )	<b>30</b>	<b>90</b>	<b>30</b>	<b>90</b>
Atenuação (K)	50,700	50,740	18,353	32,670
<i>Phase lag</i> (dias)	58,910	78,040	45,800	65,240
Assimetria	0,023	0,037	0,243	0,264
Estreitamento	0,000	0,000	0,211	0,106

Tabela 4.3: Medidas de atenuação, *phase lag*, assimetria e estreitamento para os dois valores de capacidade térmica molar atmosférica distintas, para duas excentricidades diferentes.

Nas próximas simulações utilizamos um  $c_p = 32$  J mol $^{-1}$ K $^{-1}$  como fixo, baseado em Pinotti<sup>[1]</sup>, pois ele está mais próximo do valor médio para a faixa de temperatura em que se encontram nossos resultados ( $\approx 100$  K a  $\approx 300$  K).

Em seguida, avaliamos a influência da densidade colunar atmosférica na variação de temperatura de uma Terra hipotética. Resolvemos a equação 3.7 para três densidades

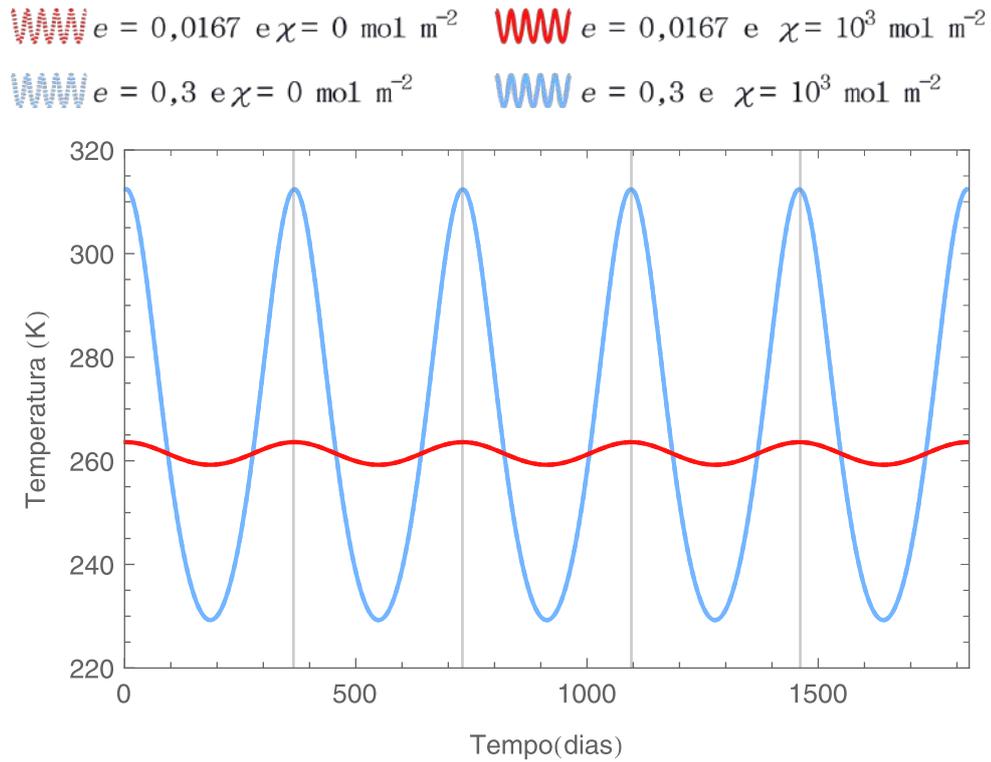


Figura 4.5: Temperatura como função do tempo para dois planetas hipotéticos com a atmosfera fina de Marte, obtida através da equação 3.7, comparadas com os mesmos planetas sem atmosfera. Os dois planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com duas excentricidades orbitais diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1.

colunares diferentes e as duas excentricidades orbitais já utilizadas ( $e = 0,0167$  e  $e = 0,3$ ). Nesse caso, calculamos tanto a atenuação e *phase lag*, comparando as curvas com atmosfera com as sem atmosfera, quanto as medidas de assimetria e estreitamento para cada curva.

A Figura 4.5 mostra a variação de temperatura de um planeta de atmosfera fina como a de Marte ( $\chi = 10^3 \text{ mol m}^{-2}$ ) comparada à variação de temperatura sem atmosfera ( $\chi = 0$ ). A Figura 4.6 apresenta a variação de temperatura de um planeta de atmosfera similar à da Terra ( $\chi = 3,4 \times 10^5 \text{ mol m}^{-2}$ ), comparada à variação de temperatura sem atmosfera ( $\chi = 0$ ). A Figura 4.7 mostra a variação de temperatura de um planeta de atmosfera hipotética mais espessa ( $\chi = 10^6 \text{ mol m}^{-2}$ ), comparada à variação de temperatura sem atmosfera ( $\chi = 0$ ).

  $e = 0,0167$  e  $\chi = 0 \text{ mol m}^{-2}$        $e = 0,0167$  e  $\chi = 3,4 \times 10^5 \text{ mol m}^{-2}$   
  $e = 0,3$  e  $\chi = 0 \text{ mol m}^{-2}$        $e = 0,3$  e  $\chi = 3,4 \times 10^5 \text{ mol m}^{-2}$

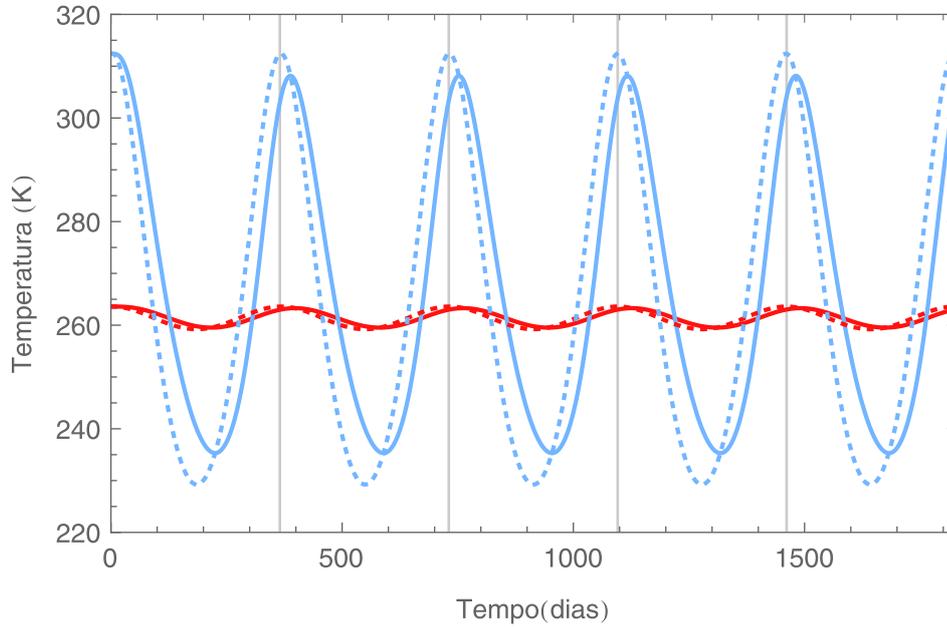


Figura 4.6: Temperatura como função do tempo para dois planetas hipotéticos com densidade colunar similar à da Terra, obtida através da equação 3.7, comparados com os mesmos planetas sem atmosfera. Os dois planetas orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com duas excentricidades orbitais diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1.

$\chi$ (mol m <sup>-2</sup> )	<b>10<sup>3</sup></b>		<b>3,4 × 10<sup>5</sup></b>		<b>10<sup>6</sup></b>	
Excentricidade	0,0167	0,3	0,0167	0,3	0,0167	0,3
Atenuação (K)	0,000	0,000	0,312	4,000	1,110	18,75
<i>Phase lag</i> (dias)	0,000	0,000	31,00	28,00	66,00	56,00
Assimetria	0,000	0,001	0,015	0,190	0,024	0,245
Estreitamento	0,041	0,261	0,009	0,259	0,007	0,174

Tabela 4.4: Medidas de atenuação, *phase lag*, assimetria e estreitamento para cada densidade colunar e excentricidade diferente.

Todas as curvas foram analisadas e comparadas com as respectivas curvas para os mesmos planetas no caso sem atmosfera, para obter a capacidade da densidade colunar  $\chi$  em aumentar a atenuação e de gerar *phase lag* na variação de temperatura. Além

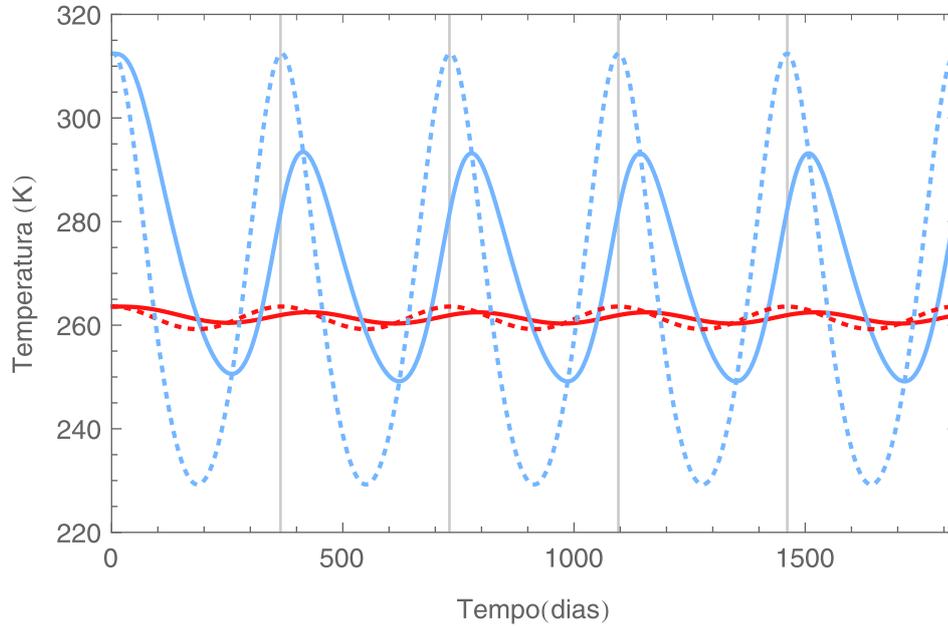
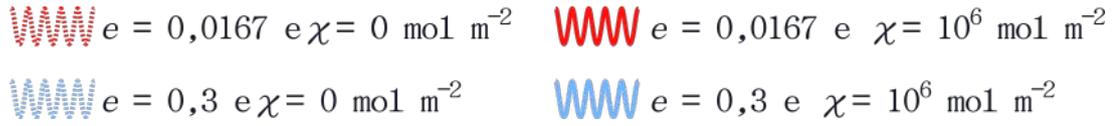


Figura 4.7: Temperatura como função do tempo para dois planetas hipotéticos com uma hipotética atmosfera espessa, obtida através da equação 3.7, comparados com os mesmos planetas sem atmosfera. Os dois planetas com densidade colunar similar à da Terra orbitam uma estrela com a luminosidade do Sol, em uma órbita com semi-eixo maior de 1 UA e com duas excentricidades orbitais diferentes. Os valores dos outros parâmetros da equação 3.7 estão fixados nos valores da Tabela 3.1.

disso, cada curva foi analisada individualmente para se obter suas medidas de assimetria e estreitamento. Todos os resultados das medidas são apresentados na Tabela 4.4.

Como pode ser observado na Tabela 4.4, a presença de uma atmosfera atua fortemente na atenuação da variação de temperatura de um planeta, como também introduz um atraso no momento em que o planeta atingirá a sua temperatura máxima, que seria durante o periastro no caso sem atmosfera. Nota-se que quanto mais espessa a atmosfera, maiores serão seus indicadores de atenuação e *phase lag*, enquanto que para uma atmosfera fina esse efeito não acontece. Além disso, o efeito sobre a atenuação se acentua para maiores valores de excentricidade, porém o efeito da excentricidade sobre o *phase lag* é o oposto. Pode ser observado também que, quanto maior a espessura atmosférica, maiores os valores de assimetria e menores os valores de estreitamento, ou seja, a presença de uma

atmosfera atua retendo mais calor no planeta, o que faz com que ele demore mais tempo para perder calor e, conseqüentemente, não ocorra uma variação brusca de temperatura entre o periastro e apoastro, porém, o *phase lag* adicional (medido pelo indicador de assimetria) aumenta com a espessura da atmosfera.

## 4.2 SIMULAÇÕES EM EXOPLANETAS REAIS

Depois de observar a influência de cada parâmetro na variação da temperatura de um planeta hipotético baseado na Terra, aplicamos a equação 3.7 para exoplanetas reais. Como já dito anteriormente, todos os sete exoplanetas do sistema planetário *TRAPPIST-1* são rochosos similares à Terra, com três destes orbitando dentro dos limites da zona de habitabilidade da estrela (*TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*). Nessa seção, modelamos a variação de temperatura desses três exoplanetas, para entender qual seria a influência da excentricidade  $e$ , do albedo planetário  $A$  e da densidade colunar atmosférica  $\chi$  em cada caso. As simulações foram feitas com base nas características mostradas na Tabela 3.2 da estrela hospedeira *TRAPPIST-1 e* de seus exoplanetas. Logo, resolvemos a equação 3.7 variando cada parâmetro individualmente e mantendo fixos os outros valores mostrados na Tabela 3.1.

### 4.2.1 *Influência da Excentricidade*

A fim de entender como a excentricidade orbital afeta a variação de temperatura dos exoplanetas, a equação 3.7 foi resolvida para dois valores de excentricidade distintos, para os três exoplanetas. As excentricidades orbitais utilizadas foram a da Terra ( $e = 0,0167$ ) e a menor incerteza das medidas dos três exoplanetas ( $e = 0,061$ ), considerando um albedo planetário  $A = 0,3$  e densidade colunar atmosférica  $\chi = 0$  (sem atmosfera) como fixos, visto que não existe ainda informação disponível sobre essas duas grandezas para esses exoplanetas. A variação da temperatura dos três exoplanetas (*TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*) com as duas excentricidades diferentes é mostrada

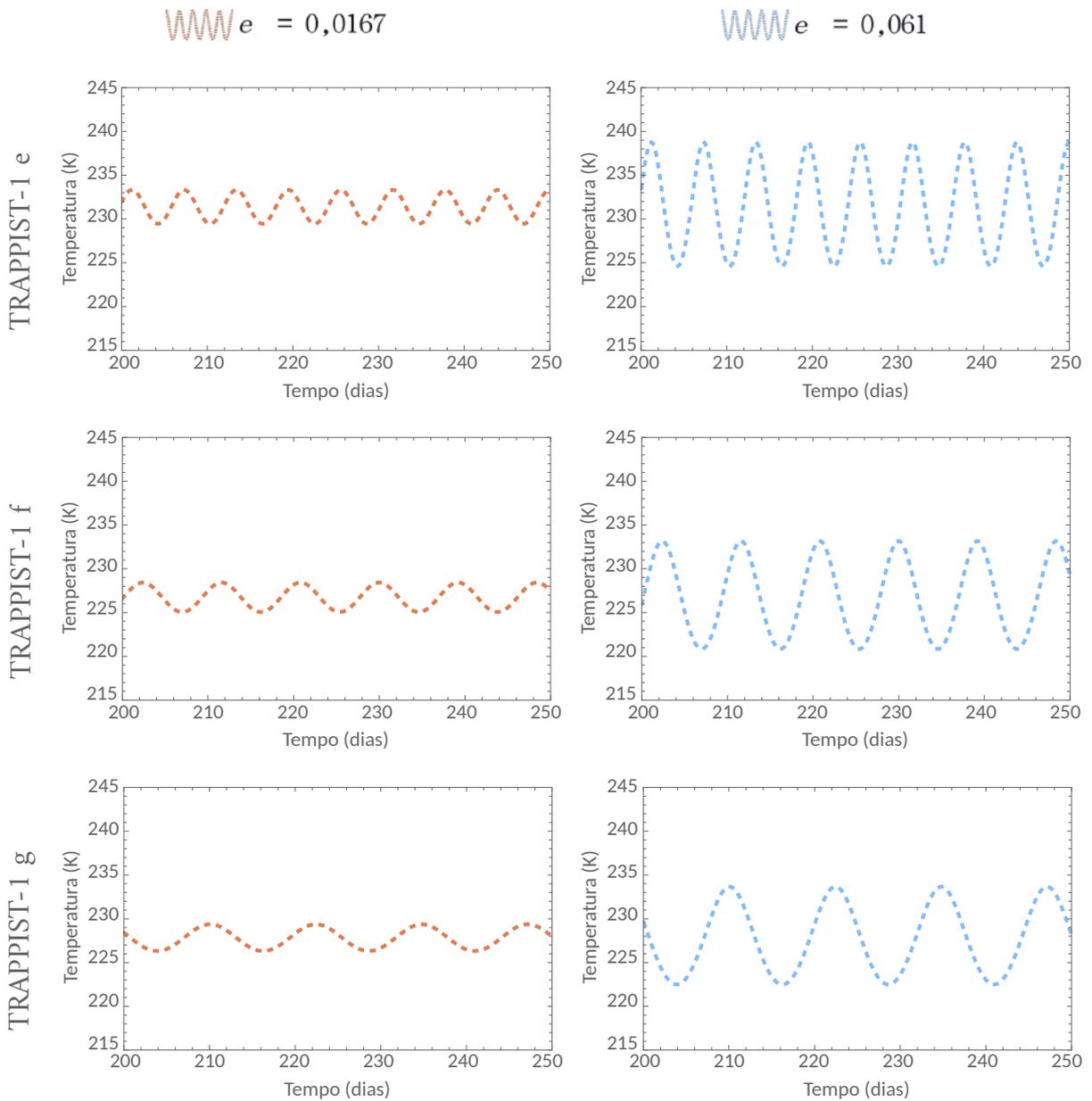


Figura 4.8: Temperatura como função do tempo para os exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*, sem a presença de uma atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os planetas orbitam a estrela com os semi-eixos maiores mostrados na Tabela 3.2, para duas excentricidades orbitais diferentes.

na Figura 4.8.

Observamos que para os casos estudados, a temperatura dos três exoplanetas varia entre  $\approx 220$  K e  $\approx 240$  K e, como esperado, as maiores variações de temperatura são encontradas nos casos com as maiores excentricidades. Como previsto, a temperatura média do exoplaneta *TRAPPIST-1 e* é a mais alta, visto que ele está mais próximo de

sua estrela, e a de *TRAPPIST-1 g* é a mais baixa, pois está em uma órbita mais afastada. Notando que o intervalo de temperatura na escala vertical dos três gráficos é o mesmo, verificamos que as variações de temperaturas são ligeiramente maiores em *TRAPPIST-1 e* (variações de  $\approx 15$  K para  $e = 0,061$ ) do que em *TRAPPIST-1 g* (variações de  $\approx 12$  K para  $e = 0,061$ ).

Exoplanetas	<i>TRAPPIST-1 e</i>		<i>TRAPPIST-1 f</i>		<i>TRAPPIST-1 g</i>	
Excentricidade	0,0167	0,061	0,0167	0,061	0,0167	0,061
Assimetria	0,014	0,000	0,027	0,007	0,015	0,009
Estreitamento	0,091	0,135	0,086	0,126	0,065	0,116

Tabela 4.5: Indicadores de assimetria e estreitamento para as duas excentricidades orbitais para o *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*.

Podemos observar também na Tabela 4.5 que o estreitamento aumenta com o aumento da excentricidade, mas diminui conforme os exoplanetas estão mais distantes. Além disso, o indicador de assimetria diminui suavemente com o aumento da excentricidade orbital.

#### 4.2.2 *Influência do Albedo*

Para compreender como o albedo planetário influencia a variação de temperatura dos exoplanetas, a equação 3.7 foi resolvida para dois valores de albedo diferentes, para os três exoplanetas. Os albedos utilizados correspondem ao de Mercúrio ( $A = 0,1$ ) e o ao de Vênus ( $A = 0,8$ ), considerando uma excentricidade orbital  $e = 0,061$  e densidade colunar atmosférica  $\chi = 0$  (sem atmosfera) como fixos. Escolhemos esse valor de excentricidade orbital pois, como vimos na Seção 4.1.2, a influência do albedo no estreitamento das curvas de temperatura é mais visível para maiores valores de excentricidade. A variação da temperatura dos três exoplanetas (*TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*) com os dois albedos diferentes pode ser observada na Figura 4.9.

Vemos que a variação do albedo nessa faixa pode provocar uma variação de temperatura significativa nesses exoplanetas. Como pode ser visto na linha  $T_{\text{média}}$  da Tabela

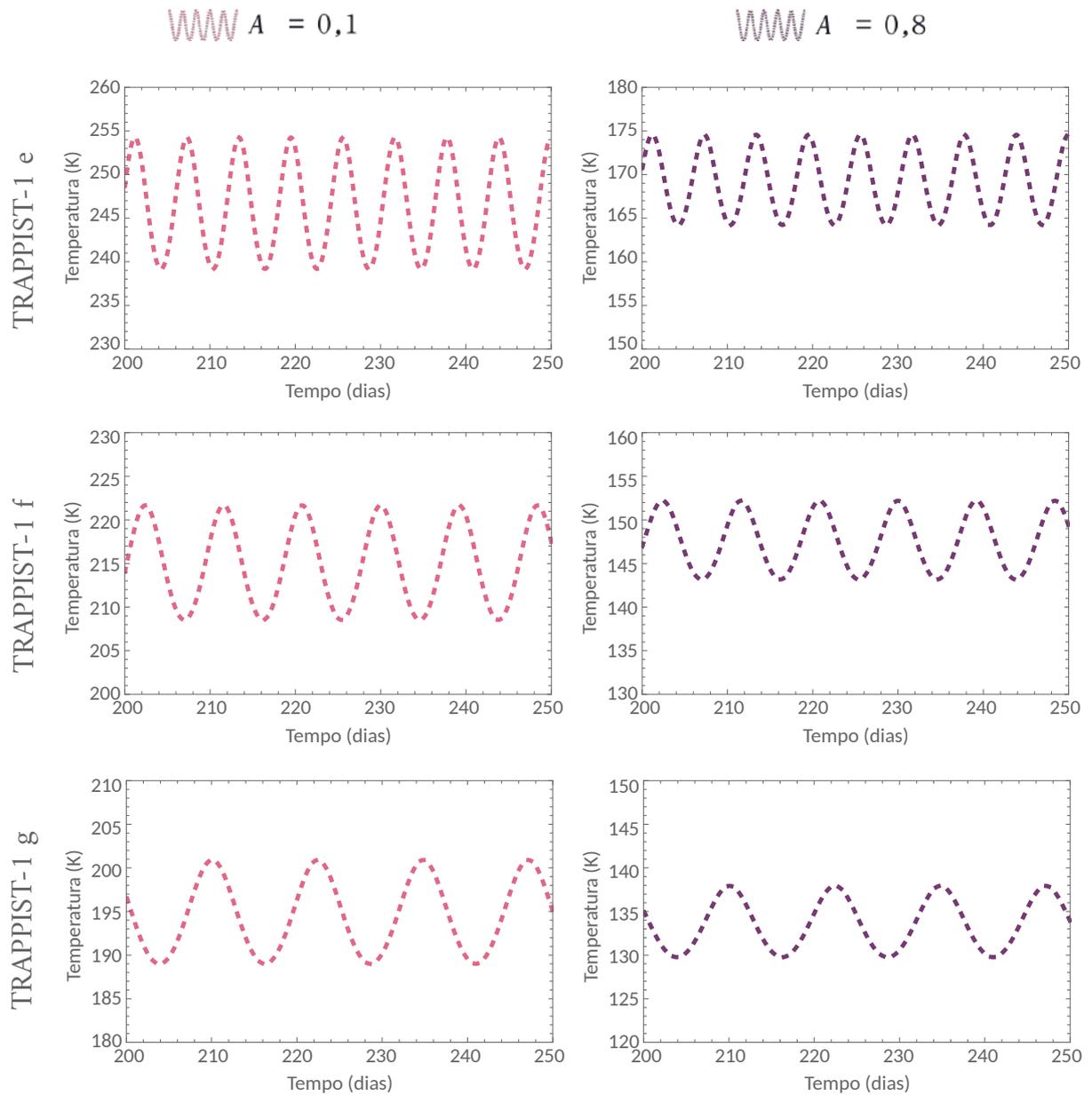


Figura 4.9: Temperatura como função do tempo para os exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*, sem a presença de uma atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os planetas orbitam a estrela com os semi-eixos maiores mostrados na Tabela 3.2, para dois valores de albedo planetário diferentes, assumindo uma excentricidade de 0,061.

4.6, a diferença da temperatura média pode chegar a 77,25 K para os dois valores de albedo estudados.  $\Delta T$  indica a diferença entre a temperatura máxima e mínima para cada caso, e vemos que o aumento do albedo também diminui as variações de temperatura ao longo do ano para um determinado planeta. Além disso, medimos os indicadores, como

Exoplanetas	<i>TRAPPIST-1 e</i>		<i>TRAPPIST-1 f</i>		<i>TRAPPIST-1 g</i>	
Valor	A = 0,1	A = 0,8	A = 0,1	A = 0,8	A = 0,1	A = 0,8
$T_{\text{média}}$ (K)	246,75	169,50	215,00	147,75	194,75	133,75
$\Delta T$ (K)	15,5	11,0	14,0	9,5	12,5	8,5

Tabela 4.6: Variação de temperatura dos exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*, causados pela variação no valor de albedo planetário.  $T_{\text{média}}$  representa a temperatura média da variação de cada parâmetro e  $\Delta T$  consiste na variação total de temperatura ao longo da órbita (diferença entre temperatura máxima e mínima atingida).

mostrado na Tabela 4.7 e observa-se que quase não há alteração dos indicadores, tanto de assimetria quanto de estreitamento, com o segundo provavelmente obtendo esse resultado devido à excentricidade escolhida e a distância do planeta para com a estrela.

Exoplanetas	<i>TRAPPIST-1 e</i>		<i>TRAPPIST-1 f</i>		<i>TRAPPIST-1 g</i>	
Valor	A = 0,1	A = 0,8	A = 0,1	A = 0,8	A = 0,1	A = 0,8
Assimetria	0,022	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000
Estreitamento	0,104	0,102	0,119	0,117	0,120	0,119

Tabela 4.7: Indicadores de assimetria e estreitamento para cada valor de albedo planetário diferente, para os exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f*, *TRAPPIST-1 g*.

### 4.2.3 *Influência da Atmosfera*

Com o intuito de entender como a densidade colunar atmosférica afeta na variação de temperatura dos exoplanetas, a equação 3.7 foi resolvida para três valores de densidade colunar  $\chi$  distintos, para os três exoplanetas. Escolhemos um valor de densidade colunar que representa uma atmosfera fina ( $\chi = 10^4 \text{ mol m}^{-2}$ ), um semelhante à da Terra ( $\chi = 3,4 \times 10^5 \text{ mol m}^{-2}$ ) e uma mais espessa ( $\chi = 10^6 \text{ mol m}^{-2}$ ), considerando uma excentricidade orbital  $e = 0,061$  e um albedo planetário  $A = 0,3$  similar ao da Terra como fixos. Nota-se que os extremos dos valores de  $\chi$  escolhidos representam exoplanetas reais. Marte, por exemplo, tem uma atmosfera de aproximadamente 1% da atmosfera terrestre, o que

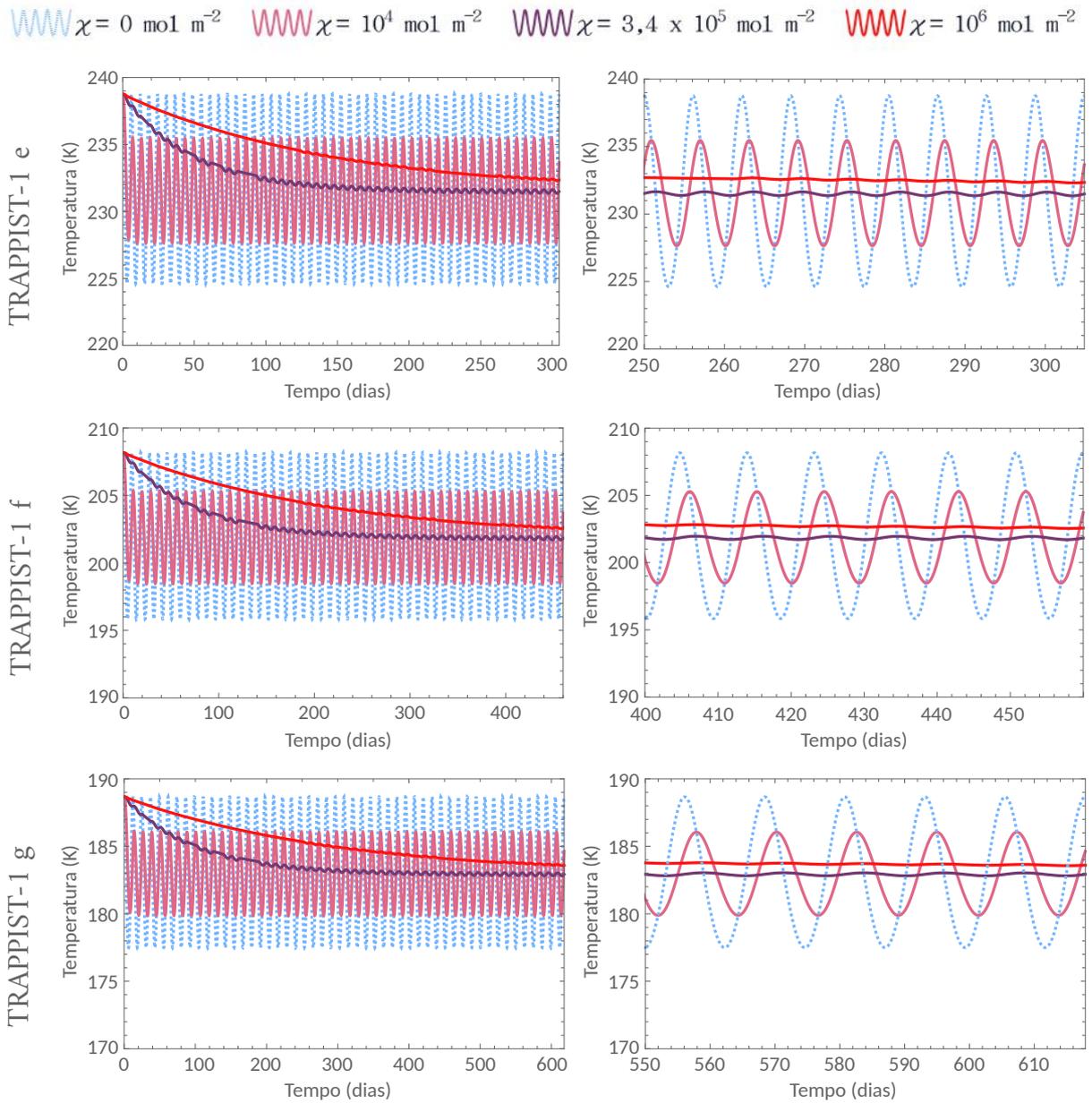


Figura 4.10: Temperatura como função do tempo para os os exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*, com a presença de uma atmosfera, obtida através da equação 3.7. Os planetas orbitam a estrela com os semi-eixos maiores mostrados na Tabela 3.2, para três valores de densidade colunar diferentes, comparados ao caso sem atmosfera. Os gráficos a esquerda correspondem à variação de temperatura ao longo de 50 períodos de cada exoplaneta, enquanto os da direita correspondem ao momento em que a variação da temperatura se estabiliza.

corresponde a  $\chi = 10^3 \text{ mol m}^{-2}$ . Escolhemos um valor de  $\chi = 10^4 \text{ mol m}^{-2}$  como valor inferior, pois os resultados para  $\chi = 10^3 \text{ mol m}^{-2}$  são indistinguíveis dos respectivos casos sem uma atmosfera. A variação da temperatura dos três exoplanetas (*TRAPPIST-1 e*,

*TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*) com as três densidades colunares diferentes comparadas ao mesmo exoplaneta sem uma atmosfera é apresentada na Figura 4.10. Nessa figura, cada linha representa um planeta diferente, com os gráficos da esquerda correspondendo à variação da temperatura ao longo de 50 períodos de cada exoplaneta, enquanto os gráficos da direita são um *zoom* de cada caso apresentado ao lado, depois da convergência devido à condição inicial, no momento em que a variação de temperatura se estabiliza.

Nota-se na Figura 4.10 que, para os três exoplanetas do Sistema *TRAPPIST-1*, a presença de uma atmosfera atua efetivamente na diminuição da variação da temperatura. Para as duas densidades colunares mais espessas, a variação de temperatura é quase imperceptível (variam menos de 1 K ao longo da órbita). Foram realizadas as análises dos indicadores de atenuação, *phase lag*, assimetria e estreitamento (ver Tabela 4.8) apenas para as duas primeiras densidades colunares, devido à dificuldade de observar máximos e mínimos para a atmosfera mais espessa ( $\chi = 10^6 \text{ mol m}^{-2}$ ), impossibilitando os cálculos.

Exoplaneta	<i>TRAPPIST-1 e</i>		<i>TRAPPIST-1 f</i>		<i>TRAPPIST-1 g</i>	
$\chi$ (mol m <sup>-2</sup> )	10 <sup>4</sup>	3,4×10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	3,4×10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	3,4×10 <sup>5</sup>
Atenuação ( <i>T</i> )	3,300	7,100	2,896	6,192	2,596	5,614
<i>Phase lag</i> (dias)	0,998	1,577	1,296	2,174	1,778	2,816
Assimetria	0,096	0,110	0,082	0,102	0,079	0,099
Estreitamento	0,069	0,014	0,068	0,007	0,060	0,000

Tabela 4.8: Indicadores de atenuação, *phase lag*, assimetria e estreitamento para cada densidade colunar diferente, para os exoplanetas *TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f*, *TRAPPIST-1 g*.

Como podemos ver na Tabela 4.8, a presença de uma atmosfera provoca uma atenuação na variação de temperatura de um planeta, ou seja, atua para estabilizar a temperatura do planeta ao longo da órbita. A existência de uma atmosfera também introduz um atraso temporal dos máximos e mínimos de temperatura, com relação ao periastro e apoastro da órbita, respectivamente. Esses efeitos se tornam cada vez maiores, para atmosferas cada vez mais espessas. Além disso, pode ser observado que, para todos os três exoplanetas, a

---

presença de uma atmosfera mais espessa introduz um menor estreitamento e uma maior assimetria, quando comparada à uma atmosfera mais fina. Isso significa que atmosferas mais espessas retêm mais calor no planeta, resultando em uma demora para resfriar, e assim atuam diminuindo a variação súbita de temperatura entre o periastro e apoastro. Nota-se que a presença de uma atmosfera espessa estabiliza mais lentamente a variação da temperatura, a partir do valor escolhido de condição inicial. Pois, nesse caso, a própria variação anual da temperatura se torna menor, sendo necessárias várias órbitas completas até que a temperatura média final seja atingida.

## Capítulo 5 | *Discussão e Conclusão*

---

A astrobiologia é um domínio da ciência relativamente novo e interdisciplinar, que procura entender como a vida opera na Terra e extrapolar esse conhecimento para ambientes extraterrestres. A busca por outros mundos com condições que sustentem a vida nos moldes conhecidos é o foco deste trabalho. A partir da descoberta do primeiro planeta fora do Sistema Solar, o ramo voltado para detecção e estudo de exoplanetas despontou, o que levou à confirmação de mais de 4000 exoplanetas só na Via Láctea. Para determinar se um planeta tem condições favoráveis para abrigar vida como a nossa, é necessário saber se ele se encontra dentro dos limites da zona de habitabilidade estelar. A zona de habitabilidade consiste na região em torno da estrela cuja temperatura permita a existência de água líquida na superfície de um planeta rochoso. Além da sua presença na zona de habitabilidade, outras características planetárias podem afetar sua temperatura e, conseqüentemente, sua habitabilidade em uma escala de tempo geológica.

Nesse projeto, implementamos em Mathematica a Equação 3.7, descrita em Pinotti<sup>[1]</sup>, que modela a variação da temperatura de um planeta ao longo da órbita. A temperatura planetária dependerá da excentricidade orbital, do albedo e emissividade do planeta, como também de suas propriedades atmosféricas, como a capacidade térmica molar e densidade colunar. Investigamos o papel de cada parâmetro individual na variação da temperatura de planetas hipotéticos baseados em características da Terra. Uma vez que, os fatores que mais influem sobre a temperatura do planeta são a excentricidade orbital, o albedo e a presença de uma considerável densidade colunar atmosférica, focamos os estudos para exoplanetas reais neles. Logo, investigamos o papel da excentricidade da órbita

e do albedo planetário na variação da temperatura do planeta e investigamos como a presença de uma atmosfera pode atuar na estabilização dessa temperatura. Especificamente, resolvemos a Equação 3.7 variando os valores de excentricidade orbital, albedo e de densidade colunar atmosférica, aplicando-a para exoplanetas reais do sistema *TRAPPIST-1*. Utilizamos quatro indicadores para quantificar a influência de cada parâmetro sobre a temperatura: atenuação e *phase lag* (já anteriormente utilizados em Pinotti<sup>[1]</sup>), como também estreitamento e assimetria, propostos no presente trabalho.

*TRAPPIST-1* é uma estrela anã vermelha ultrafria (com temperatura efetiva menor que 2700 K) a aproximadamente 40 anos-luz da Terra, sendo orbitada por ao menos sete planetas rochosos a uma distância menor que 0,07 UA<sup>[37]</sup>. Anãs M são as estrelas mais comuns na Via Láctea, logo a descoberta de exoplanetas ao redor delas é um passo importante rumo à descoberta de outras formas de vida iguais à nossa<sup>[36]</sup>. Utilizando dois modelos climáticos, estudos demonstraram que os planetas mais internos (*TRAPPIST-1 b-d*) apresentam um efeito estufa descontrolado, evaporando qualquer molécula de água da superfície, enquanto os planetas externos (*TRAPPIST-1 e-g*) poderiam abrigar oceanos de água superficial, assumindo uma atmosfera semelhante à da Terra<sup>[38]</sup>. Calcula-se que a zona de habitabilidade da estrela se estenda entre 0,024 UA e 0,049 UA, englobando três dos sete exoplanetas (*TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*), o que torna possível com que eles abriguem água líquida na superfície.

O sistema *TRAPPIST-1*, apesar de ser o mais estudado depois do Sistema Solar, está longe de ter suas características bem elucidadas e, portanto, devem ser realizadas muitas simulações hipotéticas para prever todos os possíveis cenários planetários. Por todos os planetas estarem muito próximos à estrela, eles podem estar sujeitos à interações de força de maré muito fortes e apresentarem apenas uma mesma face voltada para a estrela, resultando em uma diferença extrema de temperatura entre as duas faces e uma possível perda da atmosfera<sup>[36]</sup>. Acredita-se que, caso os planetas possuam órbitas ressonantes, a possível presença de uma atmosfera espessa, dependendo das moléculas voláteis que a compõem<sup>[41]</sup>, possa atuar retendo calor e o dissipando da parte quente (virada para a

estrela) para a parte fria, resultando em uma homogeneização da temperatura do planeta. Entretanto, estudos demonstram que a natureza compacta do sistema pode resultar em órbitas não ressonantes, devido às interações mútuas entre os sete planetas<sup>[42]</sup> e, conseqüentemente, podem apresentar características mais favoráveis à vida.

Além do nosso, existem outros estudos a fim de modelar a atmosfera dos exoplanetas do sistema *TRAPPIST-1*. Por exemplo, em 2017,<sup>[41]</sup> utilizou o modelo 3D *Global Climate Model*, simulando possíveis configurações que impeçam o colapso da atmosfera e perda de voláteis e<sup>[43]</sup> usou o modelo em 3D *Community Atmosphere Model* para estudar como a pressão atmosférica pode possibilitar a presença de água líquida, considerando uma atmosfera terrestre. Com o lançamento do JWST em 2021, acredita-se que os conhecimentos acerca da atmosfera dos exoplanetas do sistema *TRAPPIST-1* serão muito mais esclarecedores e já existem trabalhos, como o de Lustig-Yaeger et al.<sup>[44]</sup>, simulando possíveis espectros que podem ser detectados pelo telescópio.

De acordo com os nossos resultados, para um planeta hipotético semelhante à Terra, a 1 UA de distância de uma estrela com luminosidade igual a do Sol, a excentricidade orbital é o fator mais responsável pela variação da temperatura ao longo do ano, como também o que possui mais influência sobre o indicador de estreitamento, logo, quanto mais excêntrica for a órbita, mais brusca é a variação de temperatura do periastro em comparação ao apoastro. O albedo altera globalmente a variação de temperatura de um planeta, mas não introduz nem assimetria nem estreitamento significativos, ou seja, um planeta de baixo albedo possui temperaturas muito mais altas se comparadas às do mesmo planeta se tivesse um albedo alto, mas essa alteração global não influencia significativamente o tempo que a temperatura leva para variar ao longo da órbita. A emissividade do planeta também altera globalmente a temperatura de um planeta, mas não tanto quanto o albedo, entretanto uma emissividade maior influencia o indicador de estreitamento nos máximos de temperatura, resultando em uma variação mais brusca de temperatura do periastro em comparação com o apoastro. A presença de uma atmosfera leva em consideração dois fatores, a capacidade térmica molar dos gases que a compõem, como também sua densidade colunar, que atuam

juntos na estabilização da variação de temperatura do planeta. A capacidade térmica molar, se alta, atua aumentando a atenuação, o *phase lag* e a assimetria, mas diminui o estreitamento, ou seja, age melhorando a competência do planeta em reter calor, o que faz com que o planeta demore mais tempo para resfriar saindo do periastro e suaviza a variação de temperatura nesse ponto quando comparado ao do apoastro. A densidade colunar de uma atmosfera é eficaz em atenuar a variação de temperatura de um planeta e em gerar um atraso no ponto em que o planeta atinge a temperatura máxima (que seria no periastro se não houvesse atmosfera), como também é responsável por aumentar a assimetria e diminuir o estreitamento, devido à sua capacidade em reter calor, retardando o resfriamento do planeta e suavizando a variação de temperatura entre o periastro e apoastro.

Ainda não se sabe muito sobre as características individuais dos exoplanetas do sistema *TRAPPIST-1*, logo foram feitas simulações para modelar a variação de temperatura a partir de possíveis configurações dos três que orbitam a zona de habitabilidade da estrela (*TRAPPIST-1 e*, *TRAPPIST-1 f* e *TRAPPIST-1 g*). Mesmo para planetas com semi-eixo maior muito inferior ao da Terra, a excentricidade orbital ainda é a condição responsável pelas maiores variações de temperatura para os três exoplanetas, como também atua aumentando o estreitamento, o que intensifica a variação de temperatura do periastro em relação ao apoastro. O albedo planetário influencia consideravelmente a temperatura média do planeta, entretanto não altera significativamente os indicadores de assimetria e estreitamento, como já verificado no caso de um planeta hipotético como a Terra. A variação de temperatura ao longo do ano também aumenta com a diminuição do albedo, mas essa variação não difere entre o periastro e apoastro, visto que a assimetria é muito próxima de 0. A densidade colunar atmosférica atua efetivamente na diminuição e estabilização da variação de temperatura, ao ponto em que, se muito espessa a atmosfera, essa variação é quase imperceptível. Logo, atmosferas mais espessas atuam fortemente atenuando e atrasando a variação de temperatura, além de diminuírem o estreitamento e aumentarem a assimetria, ou seja, elas retêm mais calor, causando uma demora no res-

friamento do planeta e suavizam a variação de temperatura entre o periastro e apoastro. Para todos os casos estudados, o exoplaneta *TRAPPIST-1* possuiu uma maior variação de temperatura, pois planetas com órbitas excêntricas mais próximos à estrela estão mais sujeitos à variação de temperatura que planetas mais distantes.

Logo, é possível concluir, a partir dos resultados desse projeto e dos dados obtidos na literatura, que:

- De acordo com Pinotti<sup>[1]</sup>, planetas com órbitas excêntricas têm uma enorme variação de temperatura;
- Além disso, o presente trabalho demonstra que a excentricidade orbital  $e$  é o parâmetro que mais influencia o indicador de estreitamento;
- Demonstramos também que os indicadores de atenuação, *phase lag* e assimetria são principalmente influenciados pelo valor do fator que multiplica o termo  $dT/dt$  na Equação 3.7 ( $\chi$  e  $c_p$ );
- Os resultados confirmam o importante papel da atmosfera na estabilização da temperatura dos exoplanetas que possuem valores consideráveis de excentricidade;

Uma perspectiva para o projeto é considerar como o efeito estufa, a pressão atmosférica e a rotação de um planeta podem atuar na manutenção da temperatura do planeta.

## Referências Bibliográficas

---

- [1] R Pinotti. The most common habitable planets—atmospheric characterization of the subgroup of fast rotators. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429(4):3619–3626, 2013.
- [2] Norio Kitadai and Shigenori Maruyama. Origins of building blocks of life: A review. *Geoscience Frontiers*, 9(4):1117–1153, 2018.
- [3] Stanley L Miller et al. A production of amino acids under possible primitive earth conditions. *Science*, 117(3046):528–529, 1953.
- [4] Baruch S Blumberg. The NASA Astrobiology Institution: early history and organization. *Astrobiology*, 3(3):463–470, 2003.
- [5] Danielle Briot. Evolution of the problem ‘search for life in the universe’ from some examples. *Observatoire de Paris*, 2012.
- [6] Aleksander Wolszczan and Dail A Frail. A planetary system around the millisecond pulsar psr1257+ 12. *Nature*, 355(6356):145, 1992.
- [7] Michel Mayor and Didier Queloz. A jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555):355, 1995.
- [8] William J Borucki et al. The Kepler mission: a wide-field-of-view photometer designed to determine the frequency of earth-size planets around solar-like stars. In *Future EUV/UV and Visible Space Astrophysics Missions and Instrumentation*, volume 4854, pages 129–140. International Society for Optics and Photonics, 2003.
- [9] Sara Seager. Exoplanet habitability. *Science*, 340(6132):577–581, 2013.
- [10] James F Kasting and David Catling. Evolution of a habitable planet. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1):429–463, 2003.
- [11] David J Des Marais, Joseph A Nuth III, Louis J Allamandola, Alan P Boss, Jack D Farmer, Tori M Hoehler, Bruce M Jakosky, Victoria S Meadows, Andrew Pohorille, Bruce Runnegar, et al. The NASA astrobiology roadmap. *Astrobiology*, 8(4):715–730, 2008.
- [12] Mary K Johnson, Emmett J Johnson, Robert D MacElroy, Henry L Speer, and Barbara S Bruff. Effects of salts on the halophilic alga *Dunaliella viridis*. *Journal of Bacteriology*, 95(4):1461–1468, 1968.

- [13] Flavio Augusto Pereira. *Introdução à astrobiologia*, volume 1. Livraria J. Olympio, 1958.
- [14] Bruce Weber. Life. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, summer 2018 edition, 2018.
- [15] Jean Gayon. Defining life: synthesis and conclusions. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 40(2):231–244, 2010.
- [16] Charles S Cockell, T Bush, C Bryce, S Direito, M Fox-Powell, JP Harrison, H Lammer, H Landenmark, Javier Martin-Torres, N Nicholson, et al. Habitability: a review. *Astrobiology*, 16(1):89–117, 2016.
- [17] AI Oparin. Origin of life, 1938 transl, 1936.
- [18] Barbara Ryden. *Introduction to cosmology*. Cambridge University Press, 2017.
- [19] S Singh and Big Bang. *The Origin of the Universe*. Harper Perennial, 2005.
- [20] Fabio Rodrigues, Douglas Galante, and Marcio Guilherme Bronzato de Avellar. *Astrobiologia: estudando a vida no universo*, page 390. Tikinet, 2016.
- [21] Michael Perryman. *The exoplanet handbook*. Cambridge University Press, 2018.
- [22] NASA Exoplanet Exploration. Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System, 2019. URL <https://exoplanets.nasa.gov/>.
- [23] Luander Bernardes. *Exoplanetas, Extremófilos e Habitabilidade*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2013.
- [24] Sara Seager, Margaret Turnbull, William Sparks, Mark Thomson, Stuart B Shaklan, Aki Roberge, Marc Kuchner, N Jeremy Kasdin, Shawn Domagal-Goldman, Webster Cash, et al. The exo-s probe class starshade mission. In *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VII*, volume 9605, page 96050W. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [25] Timothy M Brown, David Charbonneau, Ronald L Gilliland, Robert W Noyes, and Adam Burrows. Hubble space telescope time-series photometry of the transiting planet of HD 209458. *The Astrophysical Journal*, 552(2):699, 2001.
- [26] Julien de Wit, Hannah R Wakeford, Nikole K Lewis, Laetitia Delrez, Michaël Gilon, Frank Selsis, Jérémy Leconte, Brice-Olivier Demory, Emeline Bolmont, Vincent Bourrier, et al. Atmospheric reconnaissance of the habitable-zone earth-sized planets orbiting TRAPPIST-1. *Nature astronomy*, 2(3):214, 2018.
- [27] Angelos Tsiaras, Ingo P Waldmann, Giovanna Tinetti, Jonathan Tennyson, and Sergey N Yurchenko. Water vapour in the atmosphere of the habitable-zone eight-earth-mass planet k2-18 b. *Nature Astronomy*, 3(12):1086–1091, 2019.
- [28] Drake Deming, Sara Seager, L Jeremy Richardson, and Joseph Harrington. Infrared radiation from an extrasolar planet. *Nature*, 434(7034):740, 2005.

- [29] David Charbonneau, Lori E Allen, S Thomas Megeath, Guillermo Torres, Roi Alonso, Timothy M Brown, Ronald L Gilliland, David W Latham, Georgi Mandushev, Francis T O'Donovan, et al. Detection of thermal emission from an extrasolar planet. *The Astrophysical Journal*, 626(1):523, 2005.
- [30] P Barge, A Baglin, M Auvergne, H Rauer, A Léger, Jodi Schneider, F Pont, Suzanne Aigrain, J-M Almenara, R Alonso, et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission-i. CoRoT-Exo-1b: a low-density short-period planet around a G0V star. *Astronomy & Astrophysics*, 482(3):L17–L20, 2008.
- [31] Natalie M Batalha, William J Borucki, Stephen T Bryson, Lars A Buchhave, Douglas A Caldwell, Jørgen Christensen-Dalsgaard, David Ciardi, Edward W Dunham, Francois Fressin, Thomas N Gautier III, et al. Kepler's first rocky planet: Kepler-10b. *The Astrophysical Journal*, 729(1):27, 2011.
- [32] Francesco Pepe, Andrew Collier Cameron, David W Latham, Emilio Molinari, Stéphane Udry, Aldo S Bonomo, Lars A Buchhave, David Charbonneau, Rosario Cosentino, Courtney D Dressing, et al. An earth-sized planet with an earth-like density. *Nature*, 503(7476):377, 2013.
- [33] George R Ricker, Joshua N Winn, Roland Vanderspek, David W Latham, Gáspár Á Bakos, Jacob L Bean, Zachory K Berta-Thompson, Timothy M Brown, Lars Buchhave, Nathaniel R Butler, et al. Transiting exoplanet survey satellite. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1(1):014003, 2014.
- [34] Jonathan P Gardner, John C Mather, Mark Clampin, Rene Doyon, Matthew A Greenhouse, Heidi B Hammel, John B Hutchings, Peter Jakobsen, Simon J Lilly, Knox S Long, et al. The James Webb Space Telescope. *Space Science Reviews*, 123(4):485–606, 2006.
- [35] Paris astronomical data centre l'Observatoire de Paris, Centre national de la recherche scientifique and International virtual observatory alliance. The extrasolar planets encyclopaedia, 2019. URL <https://exoplanets.eu/>.
- [36] J Horner and BW Jones. Determining habitability: which exoEarths should we search for life? *International Journal of Astrobiology*, 9(4):273–291, 2010.
- [37] Michaël Gillon, Emmanuël Jehin, Susan M Lederer, Laetitia Delrez, Julien de Wit, Artem Burdanov, Valérie Van Grootel, Adam J Burgasser, Amaury HMJ Triaud, Cyrielle Opitom, et al. Temperate earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star. *Nature*, 533(7602):221, 2016.
- [38] Michaël Gillon, Amaury HMJ Triaud, Brice-Olivier Demory, Emmanuël Jehin, Eric Agol, Katherine M Deck, Susan M Lederer, Julien De Wit, Artem Burdanov, James G Ingalls, et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, 542(7642):456, 2017.
- [39] Simon L Grimm, Brice-Olivier Demory, Michaël Gillon, Caroline Dorn, Eric Agol, Artem Burdanov, Laetitia Delrez, Marko Sestovic, Amaury HMJ Triaud, Martin

- Turbet, et al. The nature of the TRAPPIST-1 exoplanets. *Astronomy & Astrophysics*, 613:A68, 2018.
- [40] I de Pater and JJ Lissauer. Planetary sciences. 2001. *Cambridge Ed*, 2001.
- [41] Martin Turbet, Emeline Bolmont, Jeremy Leconte, François Forget, Franck Selsis, Gabriel Tobie, Anthony Caldas, Joseph Naar, and Michaël Gillon. Modeling climate diversity, tidal dynamics and the fate of volatiles on TRAPPIST-1 planets. *Astronomy & Astrophysics*, 612:A86, 2018.
- [42] Alec M Vinson, Daniel Tamayo, and Brad Hansen. The chaotic nature of TRAPPIST-1 planetary spin states. *arXiv preprint arXiv:1905.11419*, 2019.
- [43] Eric T Wolf. Assessing the habitability of the TRAPPIST-1 system using a 3d climate model. *The Astrophysical Journal Letters*, 839(1):L1, 2017.
- [44] Jacob Lustig-Yaeger, Victoria S Meadows, and Andrew P Lincowski. The detectability and characterization of the TRAPPIST-1 exoplanet atmospheres with CoRotT. *The Astronomical Journal*, 158(1):27, 2019.