



Observatório
Nacional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EXOPLANETAS ROCHOSOS
ASTROBIOLOGICAMENTE INTERESSANTES

FÁBIO CALABRIO EVANGELISTA DA SILVA

RIO DE JANEIRO

2026

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Observatório Nacional

Programa de Pós-Graduação

Dissertação de Mestrado

IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EXOPLANETAS ROCHOSOS
ASTROBIOLOGICAMENTE INTERESSANTES

por

Fábio Calabrio Evangelista da Silva

Dissertação submetida ao Corpo Docente do
Programa de Pós-graduação em Astronomia
do Observatório Nacional, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Grau
de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. Marcelo Borges Fernandes

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2026

C586

Calabrio Evangelista da Silva, Fábio

Identificação e Caracterização de Exoplanetas Rochosos
Astrobiologicamente Interessantes [Rio de Janeiro] 2026.
xxxviii, 208 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Dissertação (mestrado) - Observatório Nacional - Rio de
Janeiro, 2026.

1. Exoplanetas. 2. Astrobiologia. 3. Atmosferas
Planetárias. 4. Zona de Habitabilidade. I. Observatório
Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EXOPLANETAS ROCHOSOS
ASTROBIOLOGICAMENTE INTERESSANTES”

FÁBIO CALABRIO EVANGELISTA DA SILVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

Dr. Marcelo Borges Fernandes – Observatório Nacional
(Orientador)

Dra. Beatriz Blanco Siffert – UFRJ

Dra. Marília Gabriela Cardoso Corrêa Carlos – ON

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

13 DE AGOSTO DE 2026

Agradecimentos

Agradeço à mim mesmo.

Agradeço à CAPES pelo financiamento ao longo do mestrado, ao Rio de Janeiro e ao ON por me receberem de portas abertas para que eu pudesse realizar meu trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Marcelo Borges Fernandes, que me ensinou muito sobre astrobiologia para que eu pudesse realizar uma boa pesquisa.

Agradeço ao meu pai, à minha mãe e ao meu irmão por me motivarem a continuar nessa carreira acadêmica, mesmo estando longe sinto eles me apoiando diariamente.

Agradeço à minha namorada, Bruna, que está sempre ao meu lado, seja nos momentos felizes seja nos momentos tristes, que aceitou uma grande mudança de vida para poder me apoiar de pertinho.

Agradeço aos meus amigos e amigas que fiz durante o curso, e também aqueles que estão distantes, eles me mantêm são nos momentos de estudo e ajudam a relaxar nos momentos de descontração.

IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EXOPLANETAS ROCHOSOS
ASTROBIOLOGICAMENTE INTERESSANTES

RESUMO

O objetivo principal desta dissertação é a busca de exoplanetas rochosos astrobiologicamente interessantes, por meio da caracterização de parâmetros físicos e orbitais, e suas posições dentro da Zona de Habitabilidade (ZH) de suas estrelas hospedeiras. Foram calculados parâmetros e a ZH de uma amostra de mais de 6000 exoplanetas disponíveis na base de dados da NASA (*NASA Exoplanet Archive*). Para os cálculos foram utilizados códigos desenvolvidos pelo autor desse trabalho, assim como um modelo climático radiativo-convectivo (ATMOS). Utilizando o código climático em conjunto com a distância orbital dos planetas, é possível assumir um tipo de atmosfera para estes planetas, assim como supor temperatura e pressão superficial. Com estes parâmetros é possível organizar hierarquicamente os exoplanetas de acordo com a sua similaridade à Terra (ESI). Encontra-se diante dos cálculos duas amostras com parâmetros físicos limitantes distintos: Planetas Rochosos Incluindo Super-Terras/Hiceânicos e Planetas Rochosos Pequenos.

Foram compilados 1447 Exoplanetas Rochosos Pequenos ($0,1M_{\oplus} < M_P < 4,37M_{\oplus}$ ou $0,1R_{\oplus} < R_P < 1,64R_{\oplus}$). Destes, 44 estão dentro da Zona Habitável Otimista e 26 estão dentro da Zona Habitável Conservadora. Ao utilizar o ATMOS, classificamos 25 destes exoplanetas dentro da Zona Habitável Conservadora, dos quais 20 são de possível atmosfera análoga à Terra e 15 possuindo $ESI > 0,8$.

Ademais, foram compilados 1161 Exoplanetas Rochosos Super-Terras/Hiceânicos ($4,37M_{\oplus} < M_P < 10M_{\oplus}$ ou $1,64R_{\oplus} < R_P < 2,5R_{\oplus}$). Destes, 31 estão dentro da Zona Habitável Otimista e 14 estão dentro da Zona Habitável Conservadora. Ao utilizar o ATMOS, classificamos 14 destes exoplanetas dentro da Zona Habitável Conservadora, dos quais 13 são de possível atmosfera análoga à Terra e 9 possuindo $ESI > 0,8$.

A análise aponta 8 exoplanetas com temperatura superficial capaz de manter água líquida: GJ 1002b, GJ 180c, GJ 433d, Kepler-1652b, Kepler-22b, Kepler-442b, Kepler-443b, TOI-700d. Somente 2 deles são super-Terras/Hiceânicos: Kepler-22b e Kepler-443b. Quase todos possuem $ESI > 0,8$ (única exceção é Kepler-443b). Com destaque ao exoplaneta GJ 1002 b, sendo este o candidato mais promissor, dadas suas semelhanças nos quatro parâmetros envolvidos no cálculo da similaridade geral.

Os resultados reforçam o potencial de planetas rochosos em zonas habitáveis como alvos prioritários para observações futuras com instrumentos como JWST (*James Webb Space Telescope*) e espectrógrafos de alta resolução, ao mesmo tempo aponta-se limitações metodológicas a serem superadas, como a necessidade de modelos atmosféricos mais

diversificados e relações massa-raio mais precisas.

Palavras Chaves: Exoplanetas; Astrobiologia; Atmosferas Planetárias; Zona de Habitabilidade.

IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF ASTROBIOLOGICALLY
INTERESTING ROCKY EXOPLANETS

ABSTRACT

The primary objective of this dissertation is the search for astrobiologically interesting rocky exoplanets through the characterization of their physical and orbital parameters, as well as their positions within the Habitable Zone (HZ) of their host stars. Physical parameters and the HZ were calculated for a sample of more than 6,000 exoplanets available in the NASA database (*NASA Exoplanet Archive*). The calculations were performed using codes developed by the author of this research together with a one-dimensional radiative-convective climate model (ATMOS). By combining the climate model with the orbital distances of the planets, it is possible to infer their likely atmospheric composition, as well as assume their surface temperature and surface pressure. These parameters make it possible to rank exoplanets according to their Earth Similarity Index (ESI). Two samples with distinct limiting physical parameters were analyzed: Rocky Planets Including Super-Earths/Hycean Planets and Small Rocky Planets.

A total of 1,447 Small Rocky Exoplanets ($0.1M_{\oplus} < M_P < 4.37M_{\oplus}$ or $0.1R_{\oplus} < R_P < 1.64R_{\oplus}$) were compiled. Of these, 44 are located within the Optimistic Habitable Zone, and 26 within the Conservative Habitable Zone. By following the ATMOS model, 25 of these exoplanets were classified within the Conservative Habitable Zone, of which 20 are consistent with a possible Earth-like atmosphere and 15 exhibit an $ESI > 0.8$.

Further, a total of 1,161 Rocky Super-Earth/Hycean Exoplanets ($4.37M_{\oplus} < M_P < 10M_{\oplus}$ or $1.64R_{\oplus} < R_P < 2.5R_{\oplus}$) were compiled. Of these, 31 are located within the Optimistic Habitable Zone, and 14 within the Conservative Habitable Zone. By following the ATMOS model, 14 of these exoplanets were classified within the Conservative Habitable Zone, of which 15 are consistent with a possible Earth-like atmosphere and 9 exhibit an $ESI > 0.8$.

The analysis identifies eight exoplanets with surface temperatures capable of sustaining liquid water: GJ 1002b, GJ 180c, GJ 433d, Kepler-1652b, Kepler-22b, Kepler-442b, Kepler-443b, and TOI-700d. Only two of these are classified as Super-Earth/Hycean planets: Kepler-22b and Kepler-443b. Nearly all exhibit an $ESI > 0.8$, with the sole exception of Kepler-443b. Among them, GJ 1002b stands out as the most promising candidate because of its strong similarity to Earth across the four parameters used in the ESI calculation.

The results reinforce the potential of rocky planets located within habitable zones as priority targets for future observations with instruments such as the JWST (*James Webb*

Space Telescope) and high-resolution spectrographs. At the same time, they highlight methodological limitations that should be addressed, including the need for a broader range of atmospheric models and more accurate mass-radius relationships.

Key-words: Exoplanets; Astrobiology; Planetary Atmospheres; Habitable Zone.

Lista de Figuras

1.1	Órbita elíptica em três dimensões. i é a inclinação da órbita. Ω define a longitude do nodo ascendente, medida no plano de referência. ω é o ângulo fixo que define o argumento do pericentro do objeto em relação a Ω . $v(t)$ é a anomalia verdadeira, ângulo dependente do tempo que caracteriza a posição do objeto ao longo da órbita. Figura extraída de (PERRYMAN, 2018).	3
1.2	Exemplos de como a variação de e e ω influencia na curva de velocidade radial. Figura extraída de (PERRYMAN, 2018).	5
1.3	Curva de velocidades radiais por fase da estrela 51 Peg, utilizando o espectrógrafo ELODIE. Extraído de MAYOR e QUELOZ (1995).	5
1.4	Diagrama representativo do trânsito. Círculos indicam os pontos de primeiro ao quarto contato (1 à 4), aqueles com parâmetro de impacto ($bR_{\star} = a \cos i$) menor (pontilhados) estão mais próximos temporalmente e aqueles com parâmetro de impacto maior (tracejados) estão mais afastados temporalmente. ΔF é a profundidade de trânsito, ou seja, o quanto o brilho diminui no trânsito primário. A duração total do trânsito, t_T , compreende o intervalo entre o primeiro e o quarto contato (1 e 4), enquanto t_F corresponde ao intervalo entre o segundo e o terceiro contato (2 e 3). No trânsito secundário a descrição é feita de modo análogo. Figura extraída de (PERRYMAN, 2018).	6
1.5	Diferentes trânsitos do planeta KOI-872 em que é possível observar a variação de tempo de trânsito, possibilitando a detecção de outros planetas em órbita. Figura extraída de NESVORNÝ <i>et al.</i> (2012)	8
1.6	Evolução temporal do tempo de pulsação do pulsar PSR 1257+12. Fica evidente a evolução temporal do período de pulsação devido a perturbação planetária. Figura extraída de WOLSZCZAN e FRAIL (1992)	9
1.7	Diagrama mostrando a curva de luz durante o Microlenteamento Gravitacional para a descoberta do exoplaneta OGLE-2019-BLG-0960. O pico principal descreve a amplificação do brilho pelo efeito de lenteamento da estrela, e o pico secundário indica o lenteamento por conta de um planeta. Figura extraída de YEE <i>et al.</i> (2021).	10

1.8	Imagens de HR 8799 na banda L mostrando claramente os quatro planetas em torno da estrela central. Fonte: MAROIS <i>et al.</i> (2010).	11
1.9	Infográfico de telescópios da NASA, missões parceiras e telescópios terrestres usados na exploração de exoplanetas. Fonte: NASA.	12
1.10	Histograma dos raios planetários de exoplanetas com período orbital menor que 100 dias. Evidenciando uma ausência de planetas na região de aproximadamente $1.7 R_{\oplus}$. Figura extraída de FULTON <i>et al.</i> (2017). . . .	13
1.11	Relações de massa-raio para planetas rochosos. Cada cor e tipo de linha corresponde a uma estrutura interna distinta (proporções descritas no trabalho original). Figura extraída de SEAGER <i>et al.</i> (2007).	15
1.12	Espectros de transmissão de planetas rochosos feitos pelo JWST. O tamanho do símbolo indica o raio do planeta e a cor a temperatura de equilíbrio do planeta. Símbolos vazados são dados do NIRISS e preenchidos são do NIRSpec ou NIRCам. A linha azul é o modelo terrestre. Figura extraída de (KREIDBERG e STEVENSON, 2025)	17
1.13	Representação de ambas Zonas de Habitabilidade, Conservadora (verde claro) e Otimista (verde claro e escuro combinados). Fonte: HILL <i>et al.</i> (2023)	19
2.1	Diagrama dos gradientes de temperatura utilizados no cálculo da ZHI. No diagrama da esquerda (a) o perfil é para uma temperatura superficial abaixo de 647 K, assim o perfil é úmido na troposfera. No diagrama da direita (b) o perfil é para uma temperatura superficial acima de 647 K, assim o perfil é seco na troposfera. Figura adaptada de KASTING (1988).	26
2.2	Diagrama do gradiente de temperatura para o caso de $P_S = 0,35$ bar. A troposfera é modelada como um gradiente adiabático úmido (linha cheia) até o "cold trap", altitude com temperatura suficiente para congelar voláteis, a partir desse ponto a estratosfera é modelada por uma isoterma a 167 K (linha tracejada). Figura extraída de KASTING (1991).	27
2.3	Diagramas referentes aos resultados obtidos para o limite interno da ZH no caso solar. À esquerda fluxo solar incidente (F_{SOL}) e fluxo infravermelho reemitido (F_{IR}) em função da temperatura superficial. À direita fluxo solar efetivo (S_{eff}) em função da temperatura superficial. Figuras extraídas de KOPPARAPU <i>et al.</i> (2014).	28
2.4	Diagramas referentes aos resultados obtidos para o limite externo da ZH no caso solar. À esquerda fluxo solar incidente (F_{SOL}) e fluxo infravermelho reemitido (F_{IR}) em função da pressão parcial de CO_2 . À direita fluxo solar efetivo (S_{eff}) em função da pressão parcial de CO_2 . Figuras extraídas de KOPPARAPU <i>et al.</i> (2014).	30

2.5	Diagramas referentes a determinação dos limites da ZH em outras estrelas. À esquerda fluxo solar efetivo S_{eff} em função da temperatura superficial para estrelas de 2600 a 7200 K. À direita fluxo solar efetivo (S_{eff}) em função da pressão parcial de CO_2 para estrelas de 2600 a 7200 K. Figuras extraídas de KOPPARAPU <i>et al.</i> (2014).	31
2.6	Diagrama que apresenta o fluxo incidente estelar para um planeta orbitando uma estrela do tipo F2, Solar e K2. O planeta recebe a mesma quantidade de luz que a Terra. O painel à esquerda mostra o espectro estelar em comprimento de onda (0 a 3000 nm). O painel à direita mostra a porção ultravioleta (175 a 350 nm) do espectro estelar em comprimento de onda. Figura adaptada de SEGURA <i>et al.</i> (2003).	32
2.7	Influência da variação de pN_2 sobre a temperatura superficial e pCO_2 , utilizando OLR, albedo planetário e S_{eff} . À esquerda a análise para ZHI e à direita para ZHE. Figura adaptada de KOPPARAPU <i>et al.</i> (2014). . .	34
2.8	Influência da variação de massa sobre a temperatura superficial e pCO_2 , utilizando OLR, albedo planetário e S_{eff} . À esquerda a análise para ZHI e à direita para ZHE. Figura adaptada de KOPPARAPU <i>et al.</i> (2014). . .	34
3.1	Diagrama de fase da água representado em um gráfico log-linear, com pressão de 1 Pa a 1 TPa e temperatura de 0 K a 650 K. Linhas pretas são os limites de fase enquanto as linhas vermelhas apresentam os limites de fusão e ebulição em 1 atm. Figura de Cmglee.	41
3.2	Diagrama massa-raio apresentando os planetas do catálogo PlanetS em roxo. A curva ajustada em preto se refere a Equação 3.14. As linhas tracejadas são os limites de planetas rochosos pequenos e Super-Terras/Hiceânicos. Figura extraída de MÜLLER <i>et al.</i> (2024).	42
3.3	Diagrama da temperatura superficial T_s [K] pela temperatura de equilíbrio (T_e) [K] dos planetas do Sistema Solar (pontos pretos). A regressão linear é apresentada como uma linha vermelha. O ponto vermelho é Vênus, excluído da análise por não obedecer a relação linear. Figura extraída de JAGADEESH (2017).	43
3.4	Diagrama da temperatura superficial, T_{surf} (°C), pela temperatura de equilíbrio, T_{eq} (°C), dos planetas orbitando estrelas do tipo G (pontos azuis) e estrelas do tipo M (pontos vermelhos). Linha pontilhada representa a regressão linear encontrada. Figura extraída de DEL GENIO <i>et al.</i> (2019).	44
4.1	Diagrama representando as diferentes amostras encontradas na metodologia e resultados deste trabalho, cada seta numerada apresenta uma filtração realizada a fim de refinar a amostra de exoplanetas astrobiologicamente interessantes.	46

- 4.2 Relação de Massa por Raio dos planetas rochosos da amostra, os planetas em verde são os Rochosos Pequenos e em azul são as Super-Terras/Hiceânicos. A linha tracejada laranja é a densidade média da Terra ($5,51 \text{ g/cm}^3$) Fonte: autoria própria. 49
- 4.3 Diagrama de fluxo efetivo (S_{eff}) por temperatura efetiva estelar [K], considerando exoplanetas rochosos dentro da ZH da sua estrela hospedeira. As linhas cheias delimitam a Zona Habitável Otimista (sombreada verde+verde-claro), de Vênus Recente (vermelho) à Marte Primitivo (laranja). As linhas pontilhadas delimitam a Zona Habitável Conservadora (sombreada verde-claro), do Efeito Estufa Irreversível ($0,1 M_{\oplus}$ (azul), $1 M_{\oplus}$ (verde), $5 M_{\oplus}$ (roxo)) à Efeito Estufa Máximo (cinza). No diagrama os quadrados representam os planetas rochosos pequenos e os círculos representam as super-Terras/hiceânicos. O tamanho do ponto é relativo ao raio planetário e a escala de cor (azul para vermelho) é relativo à massa planetária. A Terra é representada por uma estrela vermelha. Fonte: autoria própria. 51
- 4.4 Diagramas distância [UA] por distância [UA] de sistemas com múltiplos planetas na ZH de sua estrela hospedeira, o sistema GJ 667 C à esquerda e o sistema Trappist-1 à direita. As linhas tracejadas delimitam a Zona Habitável Otimista, de Vênus Recente (azul) à Marte Primitivo (laranja). As linhas pontilhadas delimitam a Zona Habitável Conservadora, do Efeito Estufa Irreversível (cinza claro) ao Efeito Estufa Máximo (cinza escuro). A estrela é representada por um círculo amarelo, planetas dos sistema dentro da zona habitável são círculos verdes e planetas do sistema fora da zona habitável são círculos cinzas. Fonte: autoria própria. 52
- 4.5 Diagrama de fluxo efetivo (S_{eff}) por temperatura efetiva estelar [K], considerando exoplanetas rochosos pequenos dentro da ZH da sua estrela hospedeira. As linhas cheias delimitam a Zona Habitável Otimista (sombreada verde+verde-claro), de Vênus Recente (vermelho) à Marte Primitivo (laranja). As linhas pontilhadas delimitam a Zona Habitável Conservadora (sombreada verde-claro), do Efeito Estufa Irreversível ($0,1 M_{\oplus}$ (azul), $1 M_{\oplus}$ (verde), $5 M_{\oplus}$ (roxo)) à Efeito Estufa Máximo (cinza). No diagrama os quadrados representam os planetas rochosos pequenos. O tamanho do ponto é relativo ao raio planetário e a escala de cor (azul para vermelho) é relativo à massa planetária. A Terra é representada por uma estrela vermelha. 55

4.6	Diagrama de fluxo efetivo (S_{eff}) por temperatura efetiva estelar [K], considerando super-Terras/hiceânicos dentro da ZH da sua estrela hospedeira. As linhas cheias delimitam a Zona Habitável Otimista (sombreada verde+verde-claro), de Vênus Recente (vermelho) à Marte Primitivo (laranja). As linhas pontilhadas delimitam a Zona Habitável Conservadora (sombreada verde-claro), do Efeito Estufa Irreversível ($0,1 M_{\oplus}$ (azul), $1 M_{\oplus}$ (verde), $5 M_{\oplus}$ (roxo)) à Efeito Estufa Máximo (cinza). No diagrama os círculos representam as super-Terras/hiceânicos. O tamanho do ponto é relativo ao raio planetário e a escala de cor (azul para vermelho) é relativo à massa planetária. A Terra é representada por uma estrela vermelha.	56
4.7	Diagrama distância [UA] por distância [UA] do exoplaneta LP 890-9 c. As linhas cheias azuis delimitam a ZH Conservadora pela Equação 2.7 e as linhas tracejadas vermelhas delimitam a ZH Conservadora pelo ATMOS.	57
4.8	Ajuste linear relacionando a temperatura de equilíbrio e temperatura superficial na amostra de exoplanetas na ZH Conservadora pelo ATMOS com atmosfera análoga à Terra. O painel superior apresenta o diagrama de temperatura de equilíbrio [K] por temperatura superficial [K], com o ajuste linear (linha vermelha) e região de intervalo de 95% (região sombreada em vermelho). O painel inferior esquerdo apresenta os resíduos. O painel inferior direito apresenta a distribuição da diferença entre temperatura superficial pela temperatura de equilíbrio por frequência.	59
4.9	Diagrama ESI Superficial por ESI Interior com escala de cor para similaridade com a Terra (roxo para amarelo), a linha tracejada é o limite de $ESI = 0,8$, exoplanetas mais ao topo-direita apresentam maior similaridade com a Terra (representada por uma estrela vermelha).	62
D.1	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta 55 Cnc B c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	94
D.2	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta 55 Cnc B c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	95
D.3	Análise atmosférica de 55 Cnc B c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	95
D.4	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1002 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	96

D.5	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1002 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	97
D.6	Análise atmosférica de GJ 1002 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	97
D.7	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1002 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	98
D.8	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1002 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	99
D.9	Análise atmosférica de GJ 1002 c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	99
D.10	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1061 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	100
D.11	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1061 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	101
D.12	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1061 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	102
D.13	Análise atmosférica de GJ 1061 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	102
D.14	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 180 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	103
D.15	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 180 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	104

D.16	Análise atmosférica de GJ 180 c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	104
D.17	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 251 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	105
D.18	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 251 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	106
D.19	Análise atmosférica de GJ 251 c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	106
D.20	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 273 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	107
D.21	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 3293 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	108
D.22	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 3293 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	109
D.23	Análise atmosférica de GJ 3293 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	109
D.24	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 357 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	110
D.25	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 357 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	111
D.26	Análise atmosférica de GJ 357 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	111

D.27 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 367 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	112
D.28 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 3998 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	113
D.29 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 433 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	114
D.30 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 3998 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	115
D.31 Análise atmosférica de GJ 433 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	115
D.32 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 514 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	116
D.33 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	117
D.34 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	118
D.35 Análise atmosférica de GJ 667 C c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	118
D.36 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	119
D.37 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	120
D.38 Análise atmosférica de GJ 667 C e por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	120

D.39 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	121
D.40 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	122
D.41 Análise atmosférica de GJ 667 C f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	122
D.42 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 682 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	123
D.43 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 682 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	124
D.44 Análise atmosférica de GJ 682 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	124
D.45 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 887 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	125
D.46 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 887 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	126
D.47 Análise atmosférica de GJ 887 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	126
D.48 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 20794 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	127
D.49 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 20794 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	128

D.50	Análise atmosférica de HD 20794 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	128
D.51	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 216520 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	129
D.52	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 40307 g com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	130
D.53	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 40307 g com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	131
D.54	Análise atmosférica de HD 40307 g por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	131
D.55	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HN Lib b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	132
D.56	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HN Lib b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	133
D.57	Análise atmosférica de HN Lib b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	133
D.58	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-18 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	134
D.59	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-288 B b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	135
D.60	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-288 B b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	136

D.61	Análise atmosférica de K2-288 B b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	136
D.62	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-3 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde. .	137
D.63	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-332 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	138
D.64	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-72 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde. .	139
D.65	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-9 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde. .	140
D.66	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1229 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	141
D.67	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1229 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	142
D.68	Análise atmosférica de Kepler-1229 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	142
D.69	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1410 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	143
D.70	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1512 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	144
D.71	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1544 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	145

D.72 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1544 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	146
D.73 Análise atmosférica de Kepler-1544 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	146
D.74 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1606 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	147
D.75 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1649 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	148
D.76 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1652 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	149
D.77 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1652 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	150
D.78 Análise atmosférica de Kepler-1652 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	150
D.79 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1653 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	151
D.80 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1701 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	152
D.81 Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-174 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	153

D.82	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-174 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	154
D.83	Análise atmosférica de Kepler-174 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	154
D.84	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-186 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	155
D.85	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-186 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	156
D.86	Análise atmosférica de Kepler-186 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	156
D.87	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-22 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	157
D.88	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-22 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	158
D.89	Análise atmosférica de Kepler-22 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	158
D.90	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-283 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	159
D.91	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-296 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	160
D.92	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-296 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	161
D.93	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-296 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	162

D.94	Análise atmosférica de Kepler-296 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	162
D.95	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-440 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	163
D.96	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-442 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	164
D.97	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-442 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	165
D.98	Análise atmosférica de Kepler-442 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	165
D.99	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-443 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	166
D.100	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-443 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	167
D.101	Análise atmosférica Kepler-443 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	167
D.102	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-452 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	168
D.103	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-51 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	169

D.104	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-62 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	170
D.105	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-62 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	171
D.106	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-62 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	172
D.107	Análise atmosférica de Kepler-62 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	172
D.108	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-705 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	173
D.109	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-725 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	174
D.110	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta L 98-59 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	175
D.111	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta LHS 1140 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	176
D.112	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta LHS 1140 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	177
D.113	Análise atmosférica de LHS 1140 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	177
D.114	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta LP 890-9 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	178
D.115	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta LP 890-9 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	179

D.116	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Proxima Cen b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	180
D.117	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Proxima Cen b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	181
D.118	Análise atmosférica de Proxima Cen b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	181
D.119	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Ross 128 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	182
D.120	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Ross 508 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	183
D.121	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-1266 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	184
D.122	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-2094 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	185
D.123	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-2257 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	186
D.124	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-2257 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	187
D.125	Análise atmosférica de TOI 2257 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	187
D.126	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-700 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	188
D.127	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-700 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	189

D.128	Análise atmosférica de TOI 700 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	189
D.129	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-700 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	190
D.130	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-715 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	191
D.131	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-715 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	192
D.132	Análise atmosférica de TOI-715 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	192
D.133	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-7166 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	193
D.134	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-904 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	194
D.135	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-904 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha. . .	195
D.136	Análise atmosférica TOI-904 c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	195
D.137	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	196
D.138	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	197

D.13	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	198
D.14	Análise atmosférica de TRAPPIST-1 e por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	198
D.14	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	199
D.14	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	200
D.14	Análise atmosférica de TRAPPIST-1 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	200
D.14	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 g com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	201
D.14	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 g com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	202
D.14	Análise atmosférica de TRAPPIST-1 g por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	202
D.14	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Teegarden's Star b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	203
D.14	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Teegarden's Star c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	204

D.14	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Teegarden's Star c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	205
D.15	Análise atmosférica Teegarden's Star c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	205
D.15	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Wolf 1061 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	206
D.15	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Wolf 1069 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.	207
D.15	Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Wolf 1069 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.	208
D.15	Análise atmosférica de Wolf 1069 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).	208

Lista de Tabelas

2.1	Composição Atmosférica de Vênus, Terra e Marte	25
2.2	Coeficientes da Equação 2.7, considerando os diferentes limites da ZH para outras estrelas da sequência principal. Tabela adaptada de KOPPARAPU <i>et al.</i> (2013).	31
2.3	Coeficientes da Equação 2.7, considerando diferentes limites da ZH para outras estrelas da sequência principal e para diferentes massas planetárias. Tabela adaptada de KOPPARAPU <i>et al.</i> (2014).	35
3.1	Tabela de parâmetros de referência e expoente peso para Equação 3.10. . .	40
4.1	Número de exoplanetas detectados até o momento por método de detecção até 16/07/2026. Dados extraídos de: exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html	45
4.2	Amostras de exoplanetas rochosos com o total de exoplanetas de cada amostra dentro de cada limite da ZH, otimista ou conservadora.	50
4.3	Tabela dos planetas rochosos na ZH Conservadora pelo ATMOS com a estimativa de pressão e temperatura superficial, atmosfera análoga esperada pela distância orbital e a fase da água superficial estimada.	58
4.4	Tabela dos planetas rochosos na ZH Conservadora pelo ATMOS com atmosfera tipo Terra, seus respectivos ESIs ordenados por maior similaridade com a Terra.	61
5.1	Tabela apresentando os exoplanetas resultantes de cada filtragem.	63
5.2	Tabela dos exoplanetas apontados pela análise como tendo atmosfera similar à Terra e também com temperatura superficial capaz de manter água líquida em sua superfície.	64
A.1	Parâmetros físicos e orbitais dos planetas rochosos na ZH Otimista de suas estrelas hospedeiras	83
B.1	Parâmetros Estelares de hospedeiras de planetas em sua ZH Otimista . . .	87

C.1	Tabela de planetas rochosos na ZH da sua estrela hospedeira com os limites das ZHO e ZHC	89
-----	---	----

Sumário

Lista de Figuras	xiii
------------------	------

Lista de Tabelas	xxxiii
------------------	--------

1	Introdução	1
1.1	Métodos de detecção	2
1.1.1	Variação de Velocidade Radial	2
1.1.2	Trânsito Planetário	5
1.1.3	Variação de Tempo de Trânsito	8
1.1.4	Variação de Tempo de Pulsar	8
1.1.5	Microlenteamento Gravitacional	9
1.1.6	Imageamento Direto	10
1.2	Missões de busca por exoplanetas	10
1.3	Definição da Astrobiologia	12
1.3.1	Relação Massa-Raio e as Composições Planetárias	13
1.3.2	Atmosferas Planetárias	14
1.3.3	A Zona de Habitabilidade	18
2	Código Radiativo-Convectivo Unidimensional (ATMOS)	23
2.1	Descrição numérica	23
2.2	Determinação dos limites da zona de habitabilidade	26
2.2.1	Limite interno da zona de habitabilidade (ZHI) para uma estrela tipo solar	27
2.2.2	Limite externo da zona de habitabilidade (ZHE) para uma estrela tipo solar	29
2.2.3	Limites da zona de habitabilidade para estrelas F, G, K e M	30
2.2.4	Limites da zona de habitabilidade para pressões e massas diferentes	33
3	Quantificação da Habitabilidade	37
3.1	<i>Earth Similarity Index</i> (ESI)	38
3.2	Determinação da Pressão e Temperatura Superficial	40
3.2.1	Pressão Superficial	41

3.2.2	Temperatura Superficial	42
4	Metodologia e Resultados	45
4.1	Introdução	45
4.2	Seleção da Amostra	47
4.3	Cálculo da zona de habitabilidade	50
4.3.1	Parâmetros de entrada e saída do ATMOS	52
4.3.2	Resultados para Zona Habitável pela Equação 2.7	55
4.3.3	Resultados para Zona Habitável pelo ATMOS	56
4.4	Temperatura Superficial e Pressão Superficial	57
4.5	Cálculo do <i>Earth Similarity Index</i> (ESI)	60
5	Conclusões e Perspectivas futuras	63
	Referências Bibliográficas	67
A	Tabela dos planetas rochosos na ZH Otimista	83
B	Tabela das estrelas hospedeiras dos planetas rochosos na ZH Otimista	87
C	Tabela de planetas rochosos na ZH da sua estrela hospedeira com os limites das ZHO e ZHC	89
D	Tabelas e Diagramas dos planetas rochosos na ZH da sua estrelas hospedeiras	93
D.1	55 Cnc B c	94
D.2	GJ 1002 b	96
D.3	GJ 1002 c	98
D.4	GJ 1061 c	100
D.5	GJ 1061 d	101
D.6	GJ 180 c	103
D.7	GJ 251 c	105
D.8	GJ 273 b	107
D.9	GJ 3293 d	108
D.10	GJ 357 d	110
D.11	GJ 367 d	112
D.12	GJ 3998 d	113
D.13	GJ 433 d	114
D.14	GJ 514 b	116
D.15	GJ 667 C c	117
D.16	GJ 667 C e	119

D.17 GJ 667 C f	121
D.18 GJ 682 b	123
D.19 GJ 887 d	125
D.20 HD 20794 f	127
D.21 HD 216520 c	129
D.22 HD 40307 g	130
D.23 HN Lib b	132
D.24 K2-18 b	134
D.25 K2-288 B b	135
D.26 K2-3 d	137
D.27 K2-332 b	138
D.28 K2-72 e	139
D.29 K2-9 b	140
D.30 Kepler-1229 b	141
D.31 Kepler-1410 b	143
D.32 Kepler-1512 b	144
D.33 Kepler-1544 b	145
D.34 Kepler-1606 b	147
D.35 Kepler-1649 c	148
D.36 Kepler-1652 b	149
D.37 Kepler-1653 b	151
D.38 Kepler-1701 b	152
D.39 Kepler-174 d	153
D.40 Kepler-186 f	155
D.41 Kepler-22 b	157
D.42 Kepler-283 c	159
D.43 Kepler-296 e	160
D.44 Kepler-296 f	161
D.45 Kepler-440 b	163
D.46 Kepler-442 b	164
D.47 Kepler-443 b	166
D.48 Kepler-452 b	168
D.49 Kepler-51 e	169
D.50 Kepler-62 e	170
D.51 Kepler-62 f	171
D.52 Kepler-705 b	173
D.53 Kepler-725 c	174
D.54 L 98-59 f	175
D.55 LHS 1140 b	176

D.56 LP 890-9 c	178
D.57 Proxima Cen b	180
D.58 Ross 128 b	182
D.59 Ross 508 b	183
D.60 TOI-1266 d	184
D.61 TOI-2094 b	185
D.62 TOI-2257 b	186
D.63 TOI-700 d	188
D.64 TOI-700 e	190
D.65 TOI-715 b	191
D.66 TOI-7166 b	193
D.67 TOI-904 c	194
D.68 TRAPPIST-1 d	196
D.69 TRAPPIST-1 e	197
D.70 TRAPPIST-1 f	199
D.71 TRAPPIST-1 g	201
D.72 Teegarden's Star b	203
D.73 Teegarden's Star c	204
D.74 Wolf 1061 c	206
D.75 Wolf 1069 b	207

Capítulo 1

Introdução

Exoplanetas são definidos como planetas encontrados fora do Sistema Solar. Sua detecção teve início na década de 90, primeiramente com a detecção de dois exoplanetas orbitando o pulsar PSL 1257+12 (WOLSZCZAN e FRAIL, 1992) e posteriormente com a descoberta de um planeta orbitando uma estrela do tipo solar, 51 Pegasi-b (MAYOR e QUELOZ, 1995). Até o final do milênio já tinham sido descobertos 36 planetas e ao final da década de 2010 cerca de 500 planetas extrassolares haviam sido descobertos, desde então, o número encontra-se superior a 6000 exoplanetas confirmados (CHRISTIANSEN *et al.*, 2025).

Estes exoplanetas detectados apresentam uma grande variação em seus parâmetros. Existem aqueles que orbitam suas estrelas com distâncias que variam entre 0,005 UA e 7500 UA (SRIVASTAVA *et al.*, 2026; ZHANG *et al.*, 2021) e possuem massas entre 0,1 $M_{\oplus}$ e 5000 $M_{\oplus}$ (HADDEN e LITHWICK, 2017; LEE *et al.*, 2023), confirmando a grande diversidade de corpos existentes em outros sistemas planetários.

Os primeiros exoplanetas detectados foram os *Hot Jupiters* (Jupíteres Quentes), que são planetas com tamanho e massa próximos aos de Júpiter (317 $M_{\oplus}$ e 11 $R_{\oplus}$), mas com órbitas curtas e muito próximas à estrela hospedeira. Eles são mais facilmente detectáveis (por técnicas como trânsito e variação da velocidade radial) do que planetas menores como os *Mini Neptunes* (Pequenos Netunos) e *Super Earths* (Super-Terras) (ambos podendo ter massas entre 4,37 e 10 $M_{\oplus}$) (MADHUSUDHAN *et al.*, 2023; SEAGER *et al.*, 2007). Existem ainda planetas bem menores, os ditos *Earth-like planets* (planetas similares à Terra) que possuem uma taxa de detecção menor.

Diferentes missões foram lançadas com o intuito de detectar exoplanetas e melhor caracterizar exoplanetas, especialmente em busca de planetas similares à Terra em tamanho e composição. O primeiro telescópio espacial com intuito principal de detectar exoplanetas foi o CoRoT (*CO*nvection, *RO*tation and *planetary Transits*) (AUVERGNE *et al.*, 2009), lançado em 2006 pela agência francesa CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) em colaboração com a ESA (*European Space Agency*) e outros diversos países (incluindo o Brasil). Este tinha como objetivo o estudo de sismologia de estrelas e detecção pela técnica de trânsito planetário, confirmando 34 exoplanetas (DELEUIL *et al.*, 2010).

O telescópio espacial Kepler foi a missão para detecção de exoplanetas de maior sucesso até hoje. Possui o maior número de exoplanetas confirmados dentre todos os seus antecessores e sucessores até o momento. Este também utiliza-se do método de trânsito planetário, porém com uma sensibilidade maior que seu antecessor CoRoT, permitindo a detecção de exoplanetas de tamanho terrestre na Zona de Habitabilidade (ZH) (KOCH *et al.*, 1998). Lançada em 2009, a missão Kepler detectou 4762 exoplanetas (2784 já confirmados) durante os primeiros 4 anos de operação (NASA EXOPLANET SCIENCE INSTITUTE, 2026)¹. Após falhas nos giroscópios, a missão original foi transformada na missão K2, funcionando por mais 5 anos observando regiões da eclíptica, com 1525 planetas detectados (549 já confirmados) (SULLIVAN *et al.*, 2025).

A missão que se sucede é a missão espacial TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*), que foi lançada em 2018 e ainda está em operação (RICKER *et al.*, 2014). Utiliza-se também da técnica de trânsito planetário para suas descobertas, porém cobre uma área 400 vezes maior que seu antecessor. O telescópio possui até agora 891 exoplanetas confirmados, e mais de 4000 aguardando confirmação.

Estes telescópios utilizam-se da mesmo método de detecção, porém as detecções não são exclusivas de telescópios espaciais e nem mesmo da técnica de trânsito planetário. Há também instrumentos terrestres como o HARPS (*High Accuracy Radial velocity Planet Searcher*) instalado em 2002 no telescópio de 3.6-m de diâmetro do observatório La Silla no Chile (PEPE *et al.*, 2000). Ele se baseia na detecção de variações de velocidade radial das estrelas para a identificação de exoplanetas. A seguir, serão explicadas em detalhes as principais técnicas de detecção exoplanetária, assim como mais detalhes das missões passadas e futuras.

1.1 Métodos de detecção

Nesta seção serão descritos alguns métodos de detecção de exoplanetas, apresentando métodos com altos números de detecções exoplanetárias e também aqueles que tem valor histórico por descobertas significativas à área.

1.1.1 Variação de Velocidade Radial

A técnica mais proeminente no início da busca por exoplanetas era a de variação de velocidade radial. Essa técnica consiste na identificação da perturbação causada pelo planeta no movimento de sua estrela hospedeira. O movimento do planeta causa um distúrbio periódico na velocidade radial (STEFFEN *et al.*, 2007).

Em um problema geral de dois corpos, ambas órbitas são elipses com focos no seu comum baricentro. Considerando uma estrela que orbita o baricentro do sistema (Figura

¹exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html

$$v_r = \left[\frac{2\pi a_\star (1 + e \cos v) \cos(v + \omega)}{P\sqrt{1 - e^2}} + \frac{2\pi a_\star e \sin v \sin(v + \omega)}{P\sqrt{1 - e^2}} \right] \sin i. \quad (1.5)$$

Podendo ser simplificada em:

$$v_r = K[\cos(\omega + v)] + e \cos \omega, \text{ onde: } K \equiv \frac{2\pi}{P} \frac{a_\star \sin i}{(1 - e^2)^{1/2}}. \quad (1.6)$$

Nota-se que a velocidade radial varia entre os limites de $K(1 + e \cos \omega)$ e $K(-1 + e \cos \omega)$. A curva de velocidade radial é determinada pela excentricidade (e) e ω (alguns exemplos são dados na Figura 1.2). Em conjunto com o período P , a combinação destas variáveis permite a obtenção do produto do semi-eixo maior da órbita estelar em relação ao baricentro e a inclinação da órbita ($a_\star \sin i$). Porém a e i não podem ser encontrados separadamente.

Sabendo pelas leis de Kepler que:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM'} a_\star^3, \text{ onde } M' \equiv \frac{M_P^3}{(M_\star + M_P)^2}, \quad (1.7)$$

onde $M_\star$ é a massa estelar e M_P é a massa planetária. Substituindo na Equação 1.6, temos:

$$K^2 = \frac{G}{(1 - e^2)} \frac{1}{a_\star \sin i} \frac{M_P^3 \sin^3 i}{(M_\star + M_P)^2}. \quad (1.8)$$

No caso do planeta ter massa muito menor que a estrela $M_P \ll M_\star$ a equação pode ser reduzir a:

$$K^2 = \frac{G}{(1 - e^2)} \frac{1}{a_\star \sin i} \frac{M_P^3 \sin^3 i}{M_\star^2}, \quad (1.9)$$

ou também pela formulação proposta por CUMMING *et al.* (1999) sem a dependência explícita de $a_\star \sin i$:

$$K^2 = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_P \sin i}{M_\star^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}. \quad (1.10)$$

Desta forma, tendo a massa estelar ($M_\star$) conhecida ou ao menos estimada pelo tipo espectral e luminosidade, é possível determinar a massa planetária em relação a inclinação da órbita ($M_P \sin i$).

No trabalho de MAYOR e QUELOZ (1995), os autores apresentam uma curva de velocidades radiais por fase (Figura 1.3) da estrela 51 Pegasi, onde os pontos pretos são as velocidades radiais e a linha é o ajuste, este ajuste que possui uma característica senoidal evidenciando a presença de um planeta perturbando a velocidade radial da estrela.

Através do ajuste desta curva de velocidades radiais pode-se determinar o semi-eixo maior da órbita e a massa do exoplaneta, ambos em função da inclinação do plano orbi-

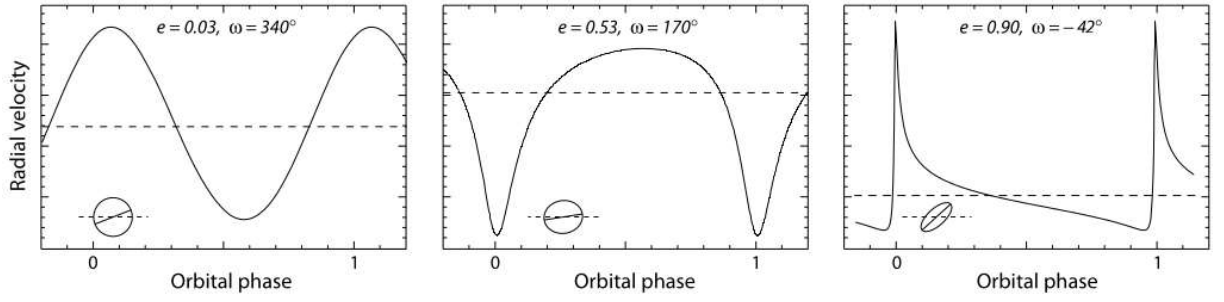


Figura 1.2: Exemplos de como a variação de e e ω influencia na curva de velocidade radial. Figura extraída de (PERRYMAN, 2018).

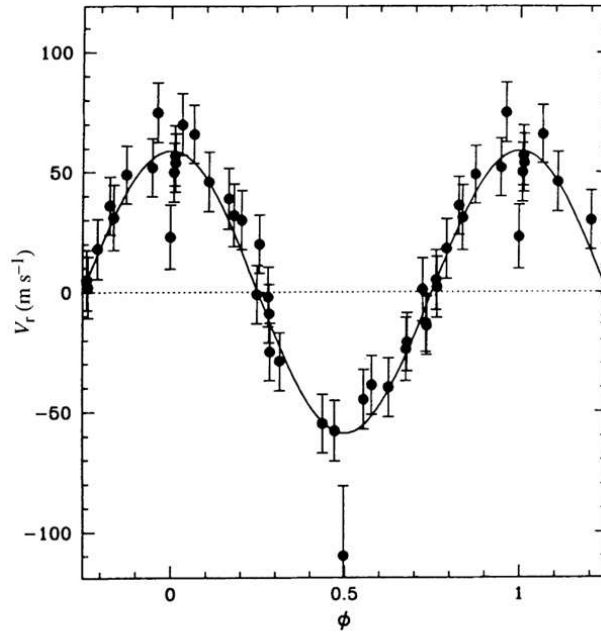


Figura 1.3: Curva de velocidades radiais por fase da estrela 51 Peg, utilizando o espectrógrafo ELODIE. Extraído de MAYOR e QUELOZ (1995).

tal, $a_* \sin i$ e $M_P \sin i$, respectivamente. Vale ressaltar que esta técnica coloca um limite mínimo na massa planetária por haver a degenerescência da inclinação da órbita.

O método de velocidade radial é mais aplicado em estrelas do tipo solar ou mais quentes, uma vez que, é mais facilmente evidenciado o movimento da estrela por meio do espectro. Também favorece à detecção de planetas do tamanho de Júpiter ou maiores e próximos da estrela, uma vez que este tipo de sistema maximiza a perturbação orbital e a variação da velocidade radial. Atualmente, é o segundo método mais eficaz, acumulando 1158 identificações positivas de exoplanetas.

1.1.2 Trânsito Planetário

A técnica mais proeminente, com cerca de 3/4 do total de descobertas², é a de trânsito planetário, a qual consiste em encontrar planetas que possuem planos orbitais aproxima-

²até 16/07/2026.

damente alinhados com a linha de visada (Figura 1.4). Ao passar à frente da estrela o planeta diminuirá o fluxo recebido pelo observador configurando um primeiro eclipse.

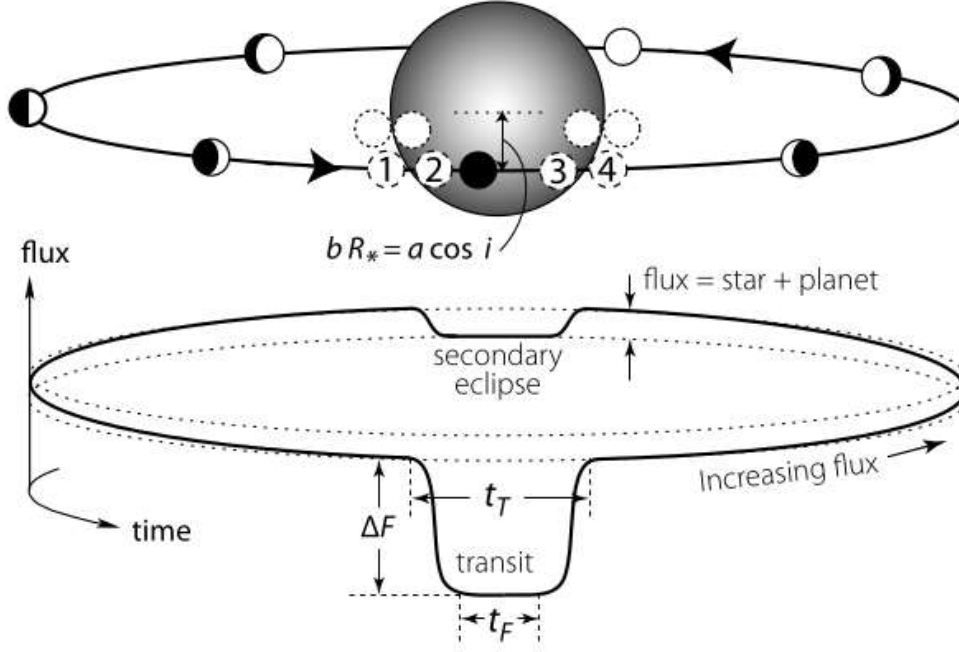


Figura 1.4: Diagrama representativo do trânsito. Círculos indicam os pontos de primeiro ao quarto contato (1 à 4), aqueles com parâmetro de impacto ($bR_* = a \cos i$) menor (pontilhados) estão mais próximos temporalmente e aqueles com parâmetro de impacto maior (tracejados) estão mais afastados temporalmente. ΔF é a profundidade de trânsito, ou seja, o quanto o brilho diminui no trânsito primário. A duração total do trânsito, t_T , compreende o intervalo entre o primeiro e o quarto contato (1 e 4), enquanto t_F corresponde ao intervalo entre o segundo e o terceiro contato (2 e 3). No trânsito secundário a descrição é feita de modo análogo. Figura extraída de (PERRYMAN, 2018).

São quatro principais observáveis que caracterizam a duração e perfil do trânsito primário: o período P , a profundidade de trânsito ΔF , o intervalo entre o primeiro e quarto contato t_T e o intervalo entre o segundo e terceiro contato t_F , R_* é o raio estelar e R_P é o raio planetário. São obtidas três equações geométricas que descrevem a curva de luz de um trânsito (SEAGER e MALLÉN-ORNELAS, 2003):

$$\Delta F \propto \left(\frac{R_P}{R_*} \right)^2 ; \quad (1.11)$$

$$\sin(t_T \pi / P) = \frac{R_*}{a} \left(\frac{[1 + (R_P/R_*)]^2 - [(a/R_*) \cos i]^2}{1 - \cos^2 i} \right)^{1/2} ; \quad (1.12)$$

$$\frac{\sin(t_F \pi / P)}{\sin(t_T \pi / P)} = \frac{[[1 - (R_P/R_*)]^2 - [(a/R_*) \cos i]^2]^{1/2}}{[[1 + (R_P/R_*)]^2 - [(a/R_*) \cos i]^2]^{1/2}}. \quad (1.13)$$

A primeira equação nos apresenta que a profundidade de trânsito (ΔF) é proporcional somente a razão das áreas dos discos projetados do planeta e da estrela. As duas outras

equações são razões trigonométricas dos tempos de transito t_T e t_F . Destas relações, e considerando uma órbita circular, é possível extrair três outros parâmetros adimensionais. O primeiro é a relação de raios entre o planeta e a estrela, na órbita circular a proporcionalidade se torna igualdade, extraída diretamente da Equação 1.11:

$$\frac{R_P}{R_\star} = \sqrt{\Delta F}. \quad (1.14)$$

O segundo é o parâmetro de impacto (b) em produto com o raio estelar ($R_\star$), que é a distância projetada entre o planeta e o centro estelar durante o meio de trânsito:

$$bR_\star \equiv a \cos i = \left(\frac{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - \frac{\sin^2(t_F \pi/P)}{\sin^2(t_T \pi/P)} (1 + \sqrt{\Delta F})^2}{1 - [\sin^2(t_F \pi/P)/\sin^2(t_T \pi/P)]} \right)^{1/2}. \quad (1.15)$$

E a razão $a/R_\star$:

$$\frac{a}{R_\star} = \left(\frac{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - b^2(1 - \sin^2(t_T \pi/P))}{\sin^2(t_T \pi/P)} \right)^{1/2}. \quad (1.16)$$

Utilizando a terceira lei de Kepler (e assumindo $M_P \ll M_\star$), pode-se derivar uma expressão para a densidade estelar $\rho_\star$:

$$\rho_\star \equiv \frac{M_\star}{R_\star^3} = \left(\frac{4\pi^2}{P^2 G} \right) \left(\frac{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - b^2(1 - \sin^2(t_T \pi/P))}{\sin^2(t_T \pi/P)} \right)^{3/2}. \quad (1.17)$$

SEAGER e MALLIN-ORNELAS (2003) supõe ainda uma solução única utilizando a relação massa-raio estelar $R_\star = kM_\star^x$, onde k e x são distintos para estrelas da sequência principal e gigantes. Assim, considerando órbitas circulares, podemos obter os parâmetros i , a e R_P a partir de medidas do trânsito primário:

$$a = \left(\frac{P^2 G M_\star}{4\pi^2} \right)^{1/3}; \quad (1.18)$$

$$i = \cos^{-1} \left(b \frac{R_\star}{a} \right); \quad (1.19)$$

$$R_P = R_\star \sqrt{\Delta F} = (k^{1/x} \rho_\star)^{x/(1-3x)}. \quad (1.20)$$

A técnica de trânsito planetário determinará o raio planetário e a inclinação da órbita. Sendo está técnica mais aplicável a planetas grandes com órbitas curtas ao redor da sua estrela hospedeira. A técnica progrediu muito ao longo das últimas décadas, de modo que a observação e interpretação do trânsito já não se limitam à simples detecção fotométrica de exoplanetas. É possível utilizar a técnica de fotometria multicolor e espectroscopia durante o trânsito primário e secundário, na busca de linhas espectrais provenientes da

atmosfera planetária. Atualmente são 4478 planetas confirmados por trânsito.

1.1.3 Variação de Tempo de Trânsito

O método de variação de tempo de trânsito se utiliza do fato de os planetas em sistemas múltiplos se perturbarem mutuamente, fazendo com que os planetas possuam uma órbita quasi-periódica. Assim existe a possibilidade de detecção indireta de um outro planeta usando a variação de tempo de trânsito de um planeta já conhecido. Na Figura 1.5 é possível ver o deslocamento do diagrama de trânsito primário do planeta conhecido, o que indica um outro corpo perturbando sua órbita.

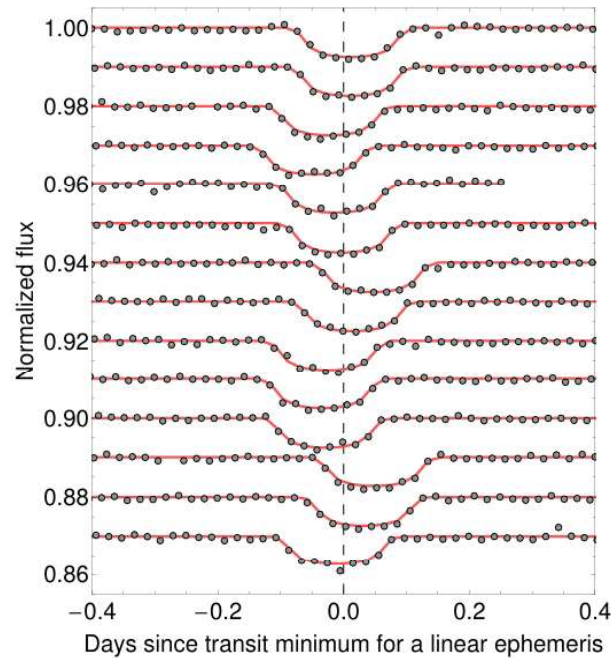


Figura 1.5: Diferentes trânsitos do planeta KOI-872 em que é possível observar a variação de tempo de trânsito, possibilitando a detecção de outros planetas em órbita. Figura extraída de NESVORNÝ *et al.* (2012)

1.1.4 Variação de Tempo de Pulsar

Um pulsar possui emissão síncrotron na direção de seu eixo magnético com extrema regularidade. Entretanto, a presença de um planeta em sua órbita causará uma perturbação nesta emissão. É justamente este método que foi utilizado por WOLSZCZAN e FRAIL (1992) para a descoberta dos dois planetas que orbitam o pulsar PSR 1257+12. Esta variação foi observada ao longo de anos, como visto na Figura 1.6.

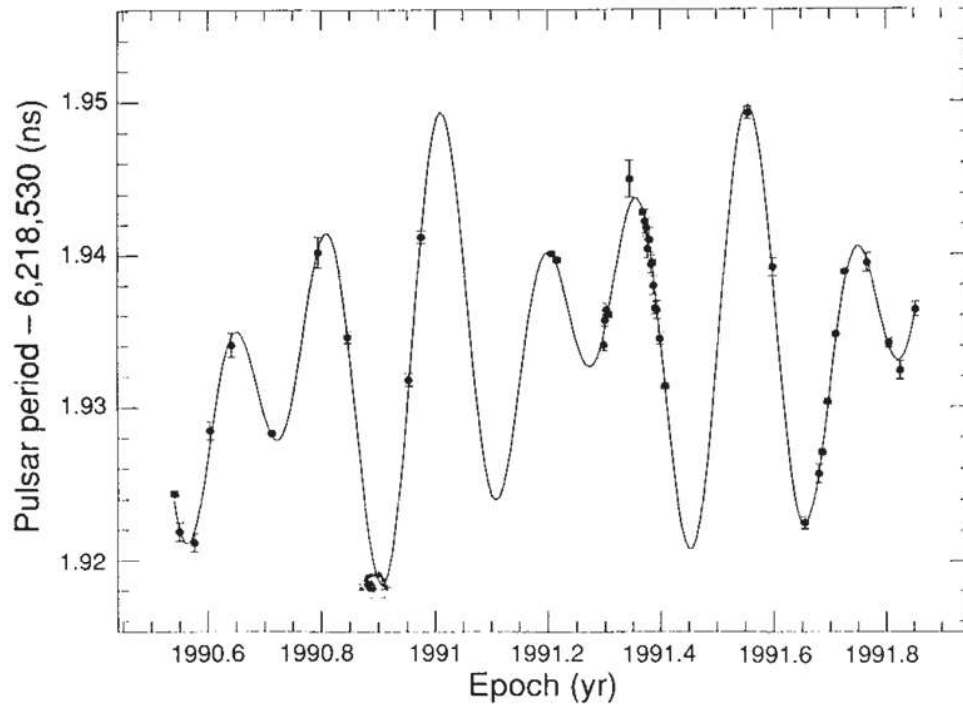


Figura 1.6: Evolução temporal do tempo de pulsação do pulsar PSR 1257+12. Fica evidente a evolução temporal do período de pulsação devido a perturbação planetária. Figura extraída de WOLSZCZAN e FRAIL (1992)

1.1.5 Microlenteamento Gravitacional

A técnica de microlenteamento gravitacional consiste na utilização do campo gravitacional de um objeto massivo (objeto lente) para amplificar a luz de um objeto mais distante (objeto foco). No momento que uma estrela passa na frente de outra, o campo gravitacional do objeto lente amplifica a luz do objeto foco, porém caso a estrela lente possua um planeta, este causará uma amplificação secundária no lenteamento.

Esta técnica permite a detecção de planetas com órbitas pequenas (1-5 UA) e pequenas massas, entretanto uma grande limitação desta técnica é o fato de que o alinhamento do objeto lente e objeto foco deve ser quase que perfeito na direção da linha de visada. Mesmo quando este alinhamento ocorre o tempo para coleta de dados é pequeno, supondo que o evento de lenteamento dure um mês, o desvio causado por um planeta pode ter a duração de somente algumas horas, limitando assim a aplicação da técnica (BATISTA, 2018).

Como exemplo da utilização desta técnica temos o planeta OGLE-2019-BLG-0960 Lb que possui uma massa de apenas 1,4 a 3,1 $M_{\oplus}$, confirmado em 2021 por YEE *et al.* (2021). A Figura 1.7 mostra o processo de lenteamento, a curva de luz da estrela é amplificada pela estrela como lente (pico principal) e levemente amplificada com o planeta (pico secundário).

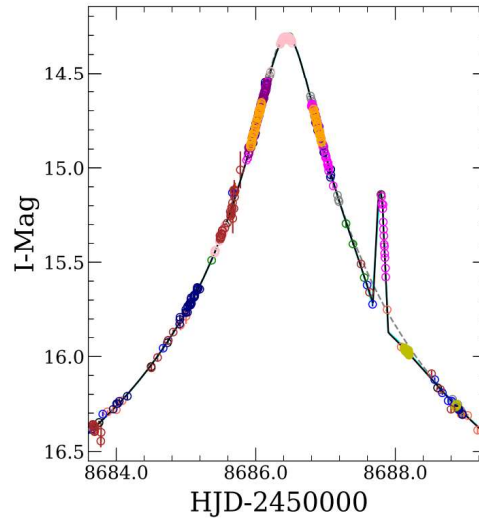


Figura 1.7: Diagrama mostrando a crua de luz durante o Microlenteamento Gravitacional para a descoberta do exoplaneta OGLE-2019-BLG-0960. O pico principal descreve a amplificação do brilho pelo efeito de lenteamento da estrela, e o pico secundário indica o lenteamento por conta de um planeta. Figura extraída de YEE *et al.* (2021).

1.1.6 Imageamento Direto

Como o nome sugere, o imageamento direto busca realizar imagens de exoplanetas realizando órbitas em torno da estrela hospedeira. A técnica pode ser realizada utilizando a luz refletida da estrela no planeta (no visível), ou então utilizando a própria emissão térmica do planeta (no infra-vermelho).

Apesar de ser um método muito eficiente na busca por exoplanetas a técnica possui limitações, como o fato do planeta estar limitado a grande órbitas, massa, brilho e dimensões para uma detecção simples. No exemplo da estrela HR 8799 mostrado na Figura 1.8 podemos ver os planetas claramente em torno da estrela, entretanto os planetas são todos definidos como gigantes (emitindo grande energia no infra-vermelho), os quais orbitam sua estrela em órbitas de 68, 38, 24 e 16 UA respectivamente (b, c, d, e), para referência Netuno se encontra a 30 UA do Sol (MAROIS *et al.*, 2010).

1.2 Missões de busca por exoplanetas

Com todas as técnicas existentes a possibilidade da descoberta de um planeta de tamanho, massa e composição semelhante à Terra é grande. É somente uma questão de tempo até possuímos um catálogo vasto com planetas similares à Terra. Com o intuito de buscar por exoplanetas são organizadas missões de busca, com focos distintos e resultados abundantes.

Em dezembro de 2006 foi lançado o telescópio CoRoT (AUVERGNE *et al.*, 2009), que tinha como objetivo principal a busca por exoplanetas do tipo Super-Terra e astrossismo-

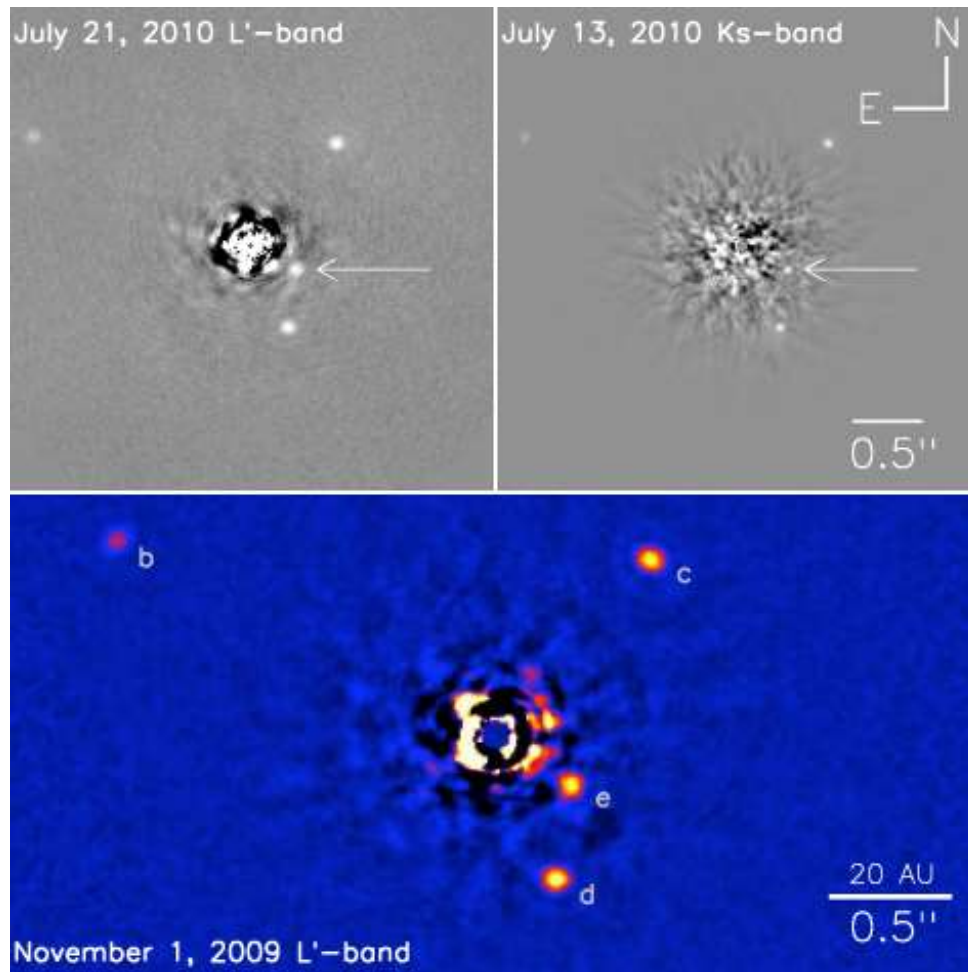


Figura 1.8: Imagens de HR 8799 na banda L mostrando claramente os quatro planetas em torno da estrela central. Fonte: MAROIS *et al.* (2010).

logia, o satélite ficou em operação até o fim de 2012, em seus quase 6 anos de operação a missão foi bem sucedida, com a descoberta de 34 exoplanetas, incluso o primeiro planeta do tipo Super-Terra a ser observado (LÉGER *et al.*, 2009). O telescópio possuía uma lente de 27 cm de diâmetro e 4 câmeras CCD sensíveis a pequenas variações de luz, favorecendo a detecção por trânsito planetário.

Em março de 2009 foi lançada a missão Kepler (BORUCKI *et al.*, 2010) (posteriormente K2), que utilizou a técnica de trânsito planetário na busca de exoplanetas com tamanho similar a Terra. O telescópio durante sua longa vida de quase 10 anos (sendo aposentado em outubro de 2018) confirmou cerca de 3330 exoplanetas, e cerca 2950 planetas candidatos ainda em análise.

Existe ainda uma missão em curso, o telescópio TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*, RICKER *et al.* (2014)) lançado em abril de 2018 que está alcançando um grande avanço científico com 929 exoplanetas confirmados e 4840 aguardando confirmação (NASA EXOPLANET SCIENCE INSTITUTE, 2026). Logo em seu segundo ano de operação encontrou o primeiro planeta de tamanho comparável à Terra na zona habitável de sua



Figura 1.9: Infográfico de telescópios da NASA, missões parceiras e telescópios terrestres usados na exploração de exoplanetas. Fonte: NASA.

estrela hospedeira da missão. Espera-se que o telescópio PLATO (*PLANetary Transits and Oscillations of stars*) seja lançado no início de 2027. O telescópio será equipado com 26 câmeras, sendo capaz de obter curvas de luz e detectar variações pequenas de movimento em estrelas. A missão tem como objetivo a determinação de massas e raios planetários, e a busca por um planeta gêmeo terrestre (RAUER *et al.*, 2025). O telescópio espacial Nancy Grace Roman, deve ser lançado também no ano de 2027 e utilizará a técnica de microlenteamento gravitacional em um campo de visão 100 vezes maior que o telescópio espacial Hubble (SCHLIEDER *et al.*, 2024). Missões passadas e futuras são apresentadas na Figura 1.9, sendo estas divididas em missões espaciais da NASA, da ESA, pequenos satélites e também missões com telescópios terrestres com participação da NASA.

1.3 Definição da Astrobiologia

Diante da descoberta de diversos exoplanetas, tem-se como objetivo a identificação de seus parâmetros físicos (como raio e massa), seus parâmetros orbitais (como semieixo maior, período e excentricidade orbital) e de sua estrela hospedeira (como temperatura efetiva, raio estelar e fluxo recebido pelo planeta).

A pesquisa culmina na busca por novos mundos que puderam, podem ou poderão abrigar vida. Essa nova área de pesquisa ganhou o nome de Astrobiologia, uma ciência

multidisciplinar que tange a astronomia, biologia, química, meteorologia, filosofia, entre diversas outras, e é definida pela NASA como *o estudo da origem, evolução, distribuição e futuro da vida no universo* CATLING (2015).

Este estudo entende como vida aquela que se encontra na Terra nos dias atuais, ou seja, depende de água líquida. Sendo assim, o presente trabalho se caracteriza em encontrar planetas que possuam uma superfície rochosa, dentro da zona de habitabilidade de suas estrelas hospedeiras, com condições físicas (temperatura, pressão e composição química) suficientes para que haja água líquida em suas superfícies (MÉNDEZ *et al.*, 2020).

1.3.1 Relação Massa-Raio e as Composições Planetárias

No catálogo da NASA cerca de 4700 exoplanetas têm raio definido e 2130 têm massa definida. Apenas cerca de 1500 exoplanetas apresentam ambos os parâmetros conhecidos, que permitem a obtenção da densidade interna diretamente. A caracterização geofísica de exoplanetas fundamenta-se na análise das relações de massa-raio e densidade, cujos limites propõem selecionar populações planetárias. Observa-se uma superposição na densidade de duas populações, "Super-Terras" e os "Mini-Netunos" devido a presença do "Vale do Raio"³, um número mais baixo que o esperado de planetas com raios entre 1,5 e 2 $R_{\oplus}$ (CLOUTIER e MENOUE, 2020), apresentado na Figura 1.10.

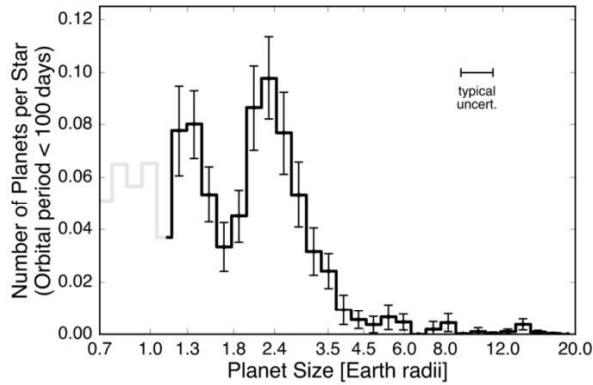


Figura 1.10: Histograma dos raios planetários de exoplanetas com período orbital menor que 100 dias. Evidenciando uma ausência de planetas na região de aproximadamente 1.7 $R_{\oplus}$. Figura extraída de FULTON *et al.* (2017).

Dentre os modelos teóricos, VALENCIA *et al.* (2006) estudaram planetas de 1 a 10 $M_{\oplus}$ obtiveram uma relação de $R_P \propto M_P^{0.27 \pm 0.03}$ concluindo que estes planetas possuem interiores compostos por misturas de ferro, magnésio e oxigênio. Já em CHEN e KIPPING (2016) os autores propuseram uma transição entre planetas pequenos e intermediários em $M_P = 2.04 \pm 0.62 M_{\oplus}$, assim propondo duas relações de massa-raio $R_P = 1.01 \pm 0.05 M_P^{0.28 \pm 0.01}$

³As principais hipóteses para sua origem envolvem perda de massa atmosférica em planetas jovens, por fotoevaporação (radiação estelar intensa) ou pelo calor residual do núcleo (CHEN *et al.*, 2026), além de contribuições de instabilidades dinâmicas e impactos (SHIBATA e IZIDORO, 2025).

e $R_P = 0,81 \pm 0,05 M_P^{0,59 \pm 0,03}$ (R_P e M_P tem unidades de $R_\oplus$ e $M_\oplus$, respectivamente). Em OTEGI *et al.* (2020) foi refinada uma transição entre planetas rochosos e ricos em voláteis em $R_P = 2,5 \pm 0,5 R_\oplus$. As duas relações de massa-raio são $R_P = 1,03 \pm 0,02 M_P^{0,29 \pm 0,01}$ e $R_P = 0,70 \pm 0,11 M_P^{0,63 \pm 0,04}$ (R_P e M_P tem unidades de $R_\oplus$ e $M_\oplus$, respectivamente).

Essa dissertação se utiliza da relação dada por MÜLLER *et al.* (2024), os autores apresentam uma relação massa-raio para uma amostra atualizada de exoplanetas. Sendo a transição em $R = 1,64 \pm 0,05 R_\oplus$ e as relações são: $R_P = 1,02 \pm 0,03 M_P^{0,27 \pm 0,04}$ para planetas pequenos e $R_P = 0,56 \pm 0,03 M_P^{0,67 \pm 0,05}$ para planetas intermediários (R_P e M_P tem unidades de $R_\oplus$ e $M_\oplus$, respectivamente).

SEAGER *et al.* (2007) fazem um trabalho detalhado analisando diferentes composições utilizando equações de estado para caracterizar interiores planetários com diferentes composições incluindo ferro, silicatos, água e compostos de carbono, analisando planetas com até $20 M_\oplus$. Os autores apresentam o conceito de "Super-Terra" como um planeta sólido sem um envelope de gás significativo de até $10 M_\oplus$.

Utilizando das relações de densidade apresentadas por SEAGER *et al.* (2007) (Figura 1.11), essa dissertação de mestrado entende como planetas rochosos aqueles que possuem densidade entre $3 < \rho < 10 \text{ g/cm}^3$. O valor mínimo supõe um planeta diferenciado com 25% da massa de gelo de água à pressão superficial, 52.5% da massa de silicatos no manto e 22.5% da massa de ferro no núcleo (linha tracejada azul escura da Figura 1.11). O valor máximo supõe um planeta diferenciado de 30% da massa de silicatos no manto e 70% da massa de ferro no núcleo (linha pontilhada vermelha da Figura 1.11).

O presente trabalho utiliza dos limites de densidade de SEAGER *et al.* (2007) para confirmar que um planeta é rochoso e impõe um limite superior de massa e raio ($R < 2,5 R_\oplus$ ou $M_P < 10 M_\oplus$).

Entre todos estes trabalhos uma conclusão importante e já evidenciada anteriormente é que há uma transição entre planetas rochosos pequenos e intermediários. Assim a relação massa-raio não permite uma caracterização certa como rochoso ou como gasoso, levando assim a necessidade de uma análise mais detalhada por meio de outros parâmetros físico-químicos de sua composição.

1.3.2 Atmosferas Planetárias

Tendo a estrutura interna planetária definida, é importante também a caracterização atmosférica. A retenção atmosférica tem relação com a gravidade superficial planetária, que tem relação com a velocidade de escape planetária, v_{esc} , (HILL *et al.*, 2026) porém também da energia recebida pelo planeta (I) (ZAHNLE e CATLING, 2017). O limite desta retenção é conhecido como *Cosmic Shoreline* ("Linha Costeira Cósmica" em tradução livre) que divide planetas com e sem atmosfera no Sistema Solar por meio da relação $I \propto v_{esc}^4$. Através de observações fotométricas e de espectroscopia, em conjunto com mode-

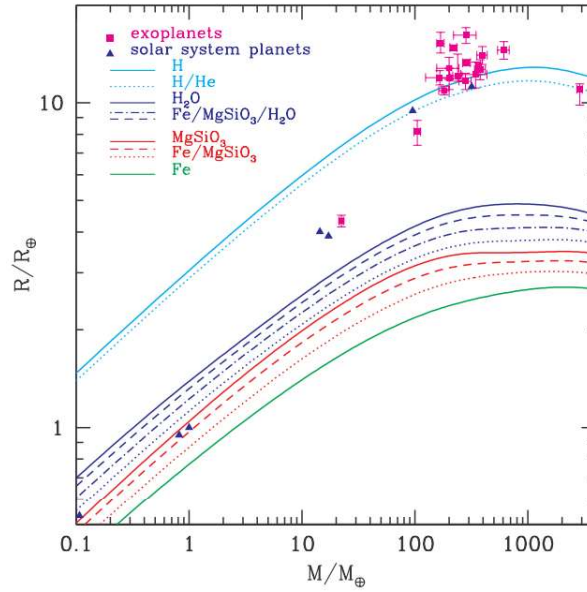


Figura 1.11: Relações de massa-raio para planetas rochosos. Cada cor e tipo de linha corresponde a uma estrutura interna distinta (proporções descritas no trabalho original). Figura extraída de SEAGER *et al.* (2007).

los é possível compreender a retenção atmosférica e sua evolução em exoplanetas.

Uma investigação inicial leva à uma análise das atmosferas existentes no Sistema Solar. Os quatro planetas internos do Sistema Solar apresentam composição rochosa (com até $1 M_{\oplus}$), já os dois de massa intermediária são majoritariamente compostos de gelo (~ 15 e $17 M_{\oplus}$) e os dois gigantes gasosos são majoritariamente compostos de Hidrogênio e Hélio (~ 95 e $318 M_{\oplus}$). Com avanços de técnicas de detecção e caracterização a diversidade de atmosferas se expande. Ainda assim ao encontrar planetas com tamanho, massa e/ou densidade comparáveis à Terra/Marte/Vênus é de maior benefício usar os planetas do Sistema Solar como referência.

Para que se consiga um melhor entendimento da formação e manutenção atmosféricas é necessário o entendimento dos possíveis tipos de atmosferas. Expressa-se a quantidade de um gás na atmosfera como a razão de mistura f_i . Definida como a fração molar de um gás em uma mistura. Pela lei de Avogadro, a fração molar é a simples razão do número de moléculas (N_i) do gás pelo número total de moléculas (N):

$$f_i = \frac{N_i}{N}. \quad (1.21)$$

Pode-se definir também a razão de mistura por massa molecular (μ_i), que é a razão de mistura da massa molecular de um gás (m_i) pela massa molecular média total da mistura ($\bar{m}$):

$$\mu_i = \frac{N_i m_i}{N \bar{m}} = \frac{m_i}{\bar{m}} f_i. \quad (1.22)$$

É possível categorizar atmosferas do Sistema Solar como: i) Atmosferas de N_2 (Terra, Titã, Tritão e Plutão); ii) Atmosferas de CO_2 (Vênus e Marte); iii) Planetas gigantes ricos em H_2 (Júpiter e Saturno); e iv) Atmosferas extremamente tênues (Mercúrio) (SEAGER e DEMING, 2010).

Porém para uma caracterização mais quimicamente relevante de atmosferas suficientemente espessas, as classificamos como redutoras e oxidantes. Essa classificação indica a característica química da atmosfera e a forma dos elementos presentes (CH_4 ou CO_2 , em referência ao carbono por exemplo). Desta forma os planetas do Sistema Solar são agrupados em: i) Atmosferas Redutoras (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno), com pressão superficial (P_S) de 1,5 bar; e ii) Atmosferas Oxidantes (Terra, Marte e Vênus), com P_S de 1, $6 \cdot 10^{-3}$ e 95,6 bar, respectivamente.

Atmosferas redutoras são ricas em gases redutores, ou seja que tipicamente contém hidrogênio (ex: metano, hidrogênio molecular e amônia). Uma atmosfera com CO também é redutora e Júpiteres quentes podem ter carbono na forma de CO ao invés de CH_4 em suas atmosferas (MOSES *et al.*, 2011). As atmosferas da Terra e Marte Jovens provavelmente eram redutoras e evoluíram para oxidantes.

Atmosferas oxidantes são pobres em elementos que contém hidrogênio e incluem atmosferas ricas em O_2 , como a Terra rica em O_2 e Marte rica em CO_2 com $\sim 0,1\%$ de O_2 e apenas 15 ± 5 ppmv de H_2 (KRASNOPOLSKY e FELDMAN, 2001). Vênus é um caso mais complexo. Sua atmosfera superior é oxidante, e possui uma tênue camada de ozônio (O_3) a 90-105 km de altitude no lado noturno (MONTMESSIN *et al.*, 2011). Porém na atmosfera baixa (abaixo de ~ 20 km de altitude), enxofre pode existir em vários estados reduzidos (KRASNOPOLSKY e POLLACK, 1994), podendo ser classificado como levemente redutor. Em Vênus, O_2 é ausente na atmosfera ($< 0,3$ ppmv), diferentemente da Terra e Marte.

Ao classificar atmosferas como redutoras e oxidantes é possível indicar a química dos aerossóis (pequenas partículas suspensas na atmosfera). Em particular, atmosferas oxidantes com gases de enxofre tendem a produzir aerossóis de sulfato em alta altitude (MCGOULDRIK *et al.*, 2011). Em Vênus, encontramos nuvens de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e analogamente na Terra uma fina camada de sulfato é encontrada na estratosfera (~ 20 -25 km de altitude), chamada de "camada de Junge" (CRUTZEN, 1976; ROBOCK, 2000).

Existem ainda corpos no Sistema Solar com atmosferas tênues, com gases bem rarefeitos. Atmosferas tênues podem ser agrupadas como: i) Atmosferas ricas em N_2 com superfícies cobertas por gelo de N_2 : Tritão ($P_S \sim 14-20 \cdot 10^{-6}$ bar) e Plutão ($P_S \sim 15 \cdot 10^{-6}$ bar); ii) Atmosferas ricas em O_2 sobre superfícies cobertas por gelo de água: Europa ($P_S \sim 10^{-12}$ bar), Ganimedes ($P_S \sim 10^{-12}$ bar), Reia ($P_S \sim 10^{-12}$ bar) e Dione ($P_S \sim 10^{-12}$ bar). O O_2 vem da decomposição do gelo de água da superfície por radiólise (alteração química de gelos por partículas carregadas) e espalhamento (colisão de partículas carregadas e ejeção de átomos e moléculas) (SAUR *et al.*, 1998, 2015; TOKAR *et al.*, 2012); iii) Atmosferas

vulcanogênicas: Io ($P_S \sim 10^{-7} - 10^{-9}$ bar) rico em SO_2 ; e iv) Exosferas, atmosferas muito rarefeitas, sobre superfícies rochosas: Mercúrio ($P_S \sim 10^{-15}$ bar) e a Lua ($P_S \sim 3 \cdot 10^{-15}$ bar).

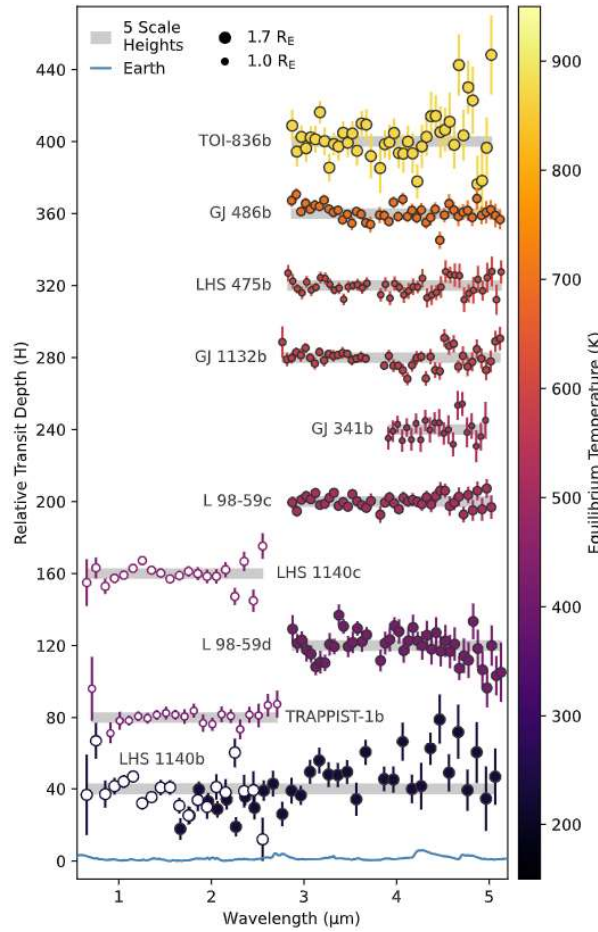


Figura 1.12: Espectros de transmissão de planetas rochosos feitos pelo JWST. O tamanho do símbolo indica o raio do planeta e a cor a temperatura de equilíbrio do planeta. Símbolos vazados são dados do NIRISS e preenchidos são do NIRSpec ou NIRCam. A linha azul é o modelo terrestre. Figura extraída de (KREIDBERG e STEVENSON, 2025)

Diversas atmosferas de planetas rochosos já foram estudadas até agora e o trabalho de KREIDBERG e STEVENSON (2025) apresenta uma revisão dos resultados. Nos primeiros dois ciclos de observação do JWST (*James Webb Space Telescope*), foram realizados mais de 60 observações de trânsitos de exoplanetas rochosos. Os mais observados são os sistemas L98-59 e Trappist-1. Os planetas apresentados na Figura 1.12 variam de $T_{eq} = 170$ a 870 K. Até agora nenhum destes planetas tem a precisão necessária para detectar uma atmosfera do tipo Terra (linha azul).

Quatro planetas (TOI-836b, LHS 475b, GJ 341b e L98-59c) têm espectros de transmissão consistentes com uma linha reta. A ausência de assinaturas no espectro, pode indicar ser um planeta com nuvens refletoras na alta atmosfera ou com alto teor molecular (como a Terra, Marte e Vênus) ou ainda um planeta sem atmosfera espessa (como Mercúrio). Mais observações são necessárias para distinguir os três diferentes cenários. Porém todos

os 4 planetas são descartados como planetas ricos em hidrogênio (ALDERSON *et al.*, 2024; KIRK *et al.*, 2024; LUSTIG-YAEGER *et al.*, 2023; SCARSDALE *et al.*, 2024).

Os espectros de GJ 486b e GJ 1132b mostram evidências de vapor d'água. Estrelas do tipo anãs M podem apresentar assinaturas no espectro devido a frias manchas solares, que são confundidas com assinatura do vapor d'água. Observações estão planejadas para GJ 486b para a resolução da degenerescência (MAY *et al.*, 2023; MORAN *et al.*, 2023).

O espectro de Trappist-1b, um dos mais promissores sistemas devido a razão planeta-estrela, mostra contaminação estelar. Porém o espectro corrigido presente na figura é consistente a um corpo sem atmosfera (BARCLAY *et al.*, 2021). A evidência espectral mais proeminente é presente na Super-Terra L 98-59d. O espectro indica a presença das moléculas H_2S e SO_2 nas linhas atmosféricas de hidrogênio e hélio (DEMANGEON *et al.*, 2021). A observação do planeta LHS 1140 b também foi realizada. É um planeta do vale do raio com temperatura com possivelmente adequada para suportar água líquida na superfície, ou pode ser um planeta hiceânico com uma grande atmosfera. Tendo sido observado tanto pelo NIRISS e NIRSpec, espectrógrafos que operam no infravermelho próximo, é possível tentar inferir o cenário mais provável. Pelo NIRISS é possível verificar contaminação estelar, porém os dados apontam tentativamente para uma atmosfera rica em N_2 . Usando o NIRSpec também favorece-se uma atmosfera rica em N_2 . CHERUBIM *et al.* (2026) utilizando o espectrógrafo WINERED no Observatório de Las Campanas, notam que há escape atmosférico de He dependente do tempo (observado em 2024 e 2026). O escape indica uma estratosfera dominada por He e pobre em H , e uma troposfera rica em voláteis. É necessário mais observações para uma resposta definitiva (CADIEUX *et al.*, 2024; DAMIANO *et al.*, 2024).

1.3.3 A Zona de Habitabilidade

A Zona de Habitabilidade (ZH) é definida como a distância ao redor de uma estrela onde água líquida pode existir na superfície de um planeta. Também conhecida como "*Goldilocks Zones*"⁴ onde as condições são ideais - nem tão quente, nem tão frio. O termo na realidade começa a ser utilizado no século XIX, como explicita LINGAM (2021), para descrever uma faixa na própria Terra onde a civilização ocidental se desenvolveu (significado geográfico).

O termo com conotação de habitabilidade planetária ganhou proeminência com SHAPLEY (1953), posteriormente outros autores o utilizaram fazendo referência à planetas que podem suportar a vida a base de água assim como a Terra (HUANG, 1960; SHKLOVSKII e SAGAN, 1966). Os limites da ZH variam de acordo com o autor. A quantificação mais aceita atualmente é aquela trazida por KOPPARAPU *et al.* (2013), que se utiliza de um código radiativo-convectivo unidimensional para modelagem climática. A ZH é um

⁴Nome em inglês em referência a história britânica do século XIX da *Cachinhos Dourados e os Três Ursos*.



Figura 1.13: Representação de ambas Zonas de Habitabilidade, Conservadora (verde claro) e Otimista (verde claro e escuro combinados). Fonte: HILL *et al.* (2023)

conceito mais amplo dividido em duas regiões: A Zona de Habitabilidade Conservadora (ZHC) e a Zona de Habitabilidade Otimista (ZHO), como na Figura 1.13.

O limite interno da ZHC é o *Runaway Greenhouse* (RG) (traduzido livremente como Efeito Estufa Irreversível). Este fenômeno ocorre com a evaporação completa dos oceanos e a saturação da atmosfera com vapor d'água, não permitindo que a radiação térmica planetária escape, prevenindo o resfriamento e levando à perda de água por fotodissociação no topo da atmosfera. Como o vapor d'água é um potente gás para o efeito estufa, o sistema se torna um ciclo retroalimentado positivamente, que intensifica continuamente o aquecimento.

O limite externo da ZHC é o *Maximum Greenhouse* (MG) (traduzido livremente como Efeito Estufa Máximo). Nesse cenário, o aumento da concentração atmosférica de CO_2 eleva a temperatura superficial por conta do efeito estufa. A formação de nuvens de CO_2 favorece o aquecimento da superfície planetária, tornando-o capaz de manter água líquida em sua superfície.

O limite interno da ZHO é o *Recent Venus* (RV) (traduzido como Vênus Recente), é baseado na hipótese de que apesar de Vênus ser seco por ao menos um bilhão de anos, ele poderia ter tido condições de suportar água líquida na sua superfície no passado. O limite externo da ZHO é o *Early Mars* (EM) (traduzido como Marte Primitivo) baseado também em hipótese de que Marte tenha tido água líquida há 3,8 bilhões de anos.

Zona de Habitabilidade no Sistema Solar

A ZH no Sistema Solar pode ser calculada com apenas duas variáveis: a energia do Sol recebida pela Terra e a energia irradiada pela Terra. A energia recebida pela Terra por unidade de área vinda do Sol é definida como a constante solar ($S_{\oplus}$), e possui valor numérico de 1361 W/m^2 (MAMAJEK *et al.*, 2026). Ela é calculada por meio da seguinte equação, onde $L_{\odot}$ é a luminosidade solar e $d_{\oplus}^2$ é a distância orbital da Terra:

$$S_{\oplus} = \frac{L_{\odot}}{4\pi d_{\oplus}^2}. \quad (1.23)$$

A temperatura do planeta se dá pelo balanço de energia recebida (E_{abs}) e energia irradiada (E_{irr}) pelo planeta. No caso da Terra podemos fazer uma estimativa simples para calcular a energia distribuída em um hemisfério pelas expressões a seguir, onde $R_{\oplus}$ é o raio terrestre, σ é a constante de Stephan-Boltzmann e $T_{eq\oplus}$ é a temperatura de equilíbrio da Terra:

$$E_{abs} = \pi R_{\oplus} S_{\oplus}; \quad (1.24)$$

$$E_{irr} = 4\pi R_{\oplus} \sigma T_{eq\oplus}. \quad (1.25)$$

Considerando um balanço energético, ou seja, a energia recebida e irradiada sendo iguais, podemos obter a distância da ZH para o Sistema Solar com a seguinte equação:

$$d_{\oplus} = \sqrt{\frac{L_{\odot}}{16\pi\sigma T_{eq\oplus}}} \quad [UA]. \quad (1.26)$$

Para podermos estender essa noção para estrelas com uma temperatura distinta do Sol, consideramos o fluxo recebido pelo exoplaneta da sua estrela hospedeira (S_*) normalizada ao fluxo recebido pela Terra ($S_{\oplus}$), tem-se o fluxo efetivo estelar (S_{eff}):

$$S_{eff} = \frac{S_*}{S_{\oplus}}. \quad (1.27)$$

Assim podemos estender a noção adquirida pela Equação 1.26 para calcular a distância da ZH para estrelas distintas do Sol, utilizando:

$$d_{ZH} = \sqrt{\frac{L_*/L_{\oplus}}{S_{eff}}} \quad [UA], \quad (1.28)$$

onde o valor de S_{eff} vai depender dos parâmetros livres de cada modelo, como a composição química do planeta, presença de nuvens, tipo estelar, entre outros fatores.

Este trabalho tem como objetivo principal a identificação e caracterização de exoplanetas astrobiologicamente interessantes. Estes são planetas rochosos que orbitam em torno de sua respectiva estrela hospedeira na ZH. Utilizando como amostra a base de da-

dos pública de exoplanetas da NASA⁵. Os parâmetros faltantes da amostra são inferidos por meio de equações empíricas. Para cálculo das ZH, foi utilizado o modelo climático radiativo-convectivo desenvolvido primeiramente por KASTING (1991) e posteriormente atualizado por KOPPARAPU *et al.* (2013). Foi realizado também um estudo da similaridade com a Terra por meio da utilização do parâmetro de ESI (*Earth Similarity-Index*) desenvolvido por SCHULZE-MAKUCH *et al.* (2011). O conjunto e a soma dos resultados levanta um refinamento ainda maior para esta área de pesquisa, promovendo um melhor direcionamento para futuras observações e apreciações científicas.

O trabalho é dividido da seguinte forma: no capítulo 2 é descrito o modelo climático radiativo-convectivo (ATMOS) e os resultados obtidos por meio dele. O capítulo 3 descreve o parâmetro de similaridade com a Terra (ESI) e como ele é aplicado. O capítulo 4 descreve a metodologia para a seleção da amostra de exoplanetas e os resultados obtidos a partir dela. No capítulo 5 apresenta-se as conclusões deste trabalho e as perspectivas futuras.

⁵Nasa Exoplanet Archive. Disponível em: exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

Capítulo 2

Código Radiativo-Convectivo Unidimensional (ATMOS)

2.1 Descrição numérica

Com o intuito de determinar com precisão os limites da ZH para diferentes estrelas decidimos utilizar o código climático radiativo-convectivo utilizado por KOPPARAPU *et al.* (2014) (ATMOS), baseia-se no código primariamente desenvolvido por KASTING *et al.* (1984) e KASTING (1988) para determinar o limite interno da ZH e de KASTING (1991) para determinação do limite externo da ZH. Ambos modelos, assim como todos modelos unidimensionais (HELLING, 2019), não consideram nuvens, mas seu efeito porém é implementado pelo albedo superficial (A_s).

Modelos deste tipo foram utilizados primeiramente por MANABE e WETHERALD (1967), para entender como a temperatura global do planeta se altera com a distribuição de energia incidente e refletida. Numericamente, um modelo climático unidimensional é descrito basicamente por uma equação de conservação de energia:

$$\rho c_p \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial F(z)}{\partial z}, \quad (2.1)$$

onde ρ é a densidade, c_p é a capacidade térmica a pressão constante, $T(z, t)$ é o perfil vertical de temperatura da atmosfera, z é a altitude, e $F(z)$ é a média global de fluxo radiativo em cada altitude (normalmente definido positivamente para baixo). $F(z)$ é dividido em duas componentes:

$$F(z) = F_{\text{SOL}}(z) + F_{\text{IR}}(z). \quad (2.2)$$

Onde $F_{\text{SOL}}(z)$ é o fluxo estelar incidente, incluindo o fluxo estelar direto e fluxo espalhado. $F_{\text{IR}}(z)$ é o fluxo térmico re-emitido pela superfície e pela atmosfera no infravermelho, inteiramente espalhado.

No código ATMOS, a atmosfera de estudo é subdividida em duas componentes com um número definido de camadas: estratosfera e troposfera. Enquanto a estratosfera encontra-se em equilíbrio radiativo, a troposfera é uma camada convectiva com um gradiente térmico adiabático. O cálculo é realizado por meio de um perfil de temperatura padrão definido *a priori* e os fluxos referentes são calculados por todas as camadas da atmosfera. Na etapa seguinte, um novo perfil de temperatura é definido de forma que os fluxos incidentes e refletidos sejam condizentes com o perfil pre-estabelecido (esse processo é repetido de maneira sequencial até a convergência).

A atmosfera (estratosfera e troposfera) é sub-dividida em 101 camadas plano-paralelas e a equação de transferência radiativa é resolvida em cada uma. O código se utiliza dos coeficientes de absorção de H_2O e do CO_2 obtidos na base de dados HITRAN 2008 (ROTHMAN *et al.*, 2009) e HITEMP 2010 (ROTHMAN *et al.*, 2010).

É mais conveniente trabalhar na coordenada de pressão (p), ao invés de altitude, assim é possível entender como a mudança de temperatura expande ou contrai a atmosfera (como cada camada das 101 se movem). Assim dividimos a Equação 2.1 por ρc_p e usamos a lei barométrica $dp = -\rho g dz$, temos:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = -\frac{g}{c_p} \frac{dF(z)}{dp}. \quad (2.3)$$

A equação é um diferencial de primeira ordem em t e p . O perfil de temperatura é necessário para a solução. Considera-se a grade de 100 camadas irregularmente espaçadas que representa uma atmosfera (troposfera e estratosfera), entre a pressão superficial (p_s) até a pressão no topo da atmosfera ($p_0 \simeq 3 \cdot 10^{-5}$ bar). A grade é numerada de baixo para cima. As temperaturas são calculadas no meio de cada camada e os fluxos calculados nas bordas das camadas. Uma camada extra é utilizada como temperatura superficial, na base da grade. Podemos escrever a Equação 2.3 como uma subtração finita:

$$T_j^{n+1} = T_j^n - \frac{g}{c_p} \left(\frac{F_{j+1/2}^n - F_{j-1/2}^n}{\Delta p_j} \right) \Delta t, \quad (2.4)$$

onde Δt é o passo de tempo, Δp_j é a largura da camada j , e o sobrescrito n indica o passo de tempo atual. A variável de passo temporal é usada começando por um tempo pequeno e progredindo para maiores, baseando-se em quão rápido a temperatura muda com a altitude.

Quando a atmosfera é espessa, a capacidade térmica da atmosfera próxima a superfície se torna alta. Assim o objetivo é atingir o equilíbrio radiativo em todas as camadas da estratosfera, assim como o equilíbrio no topo da atmosfera. No equilíbrio o fluxo estelar absorvido e o fluxo infravermelho irradiado devem ser iguais. O fluxo infravermelho irradiado é uma função monotonicamente crescente com a temperatura superficial (T_S). Assim pode-se ajustar a temperatura da camada mais baixa da atmosfera (J), como:

$$T_J^{n+1} = T_J^n - \frac{g}{c_{pJ}} \left(\frac{F_1^n}{\Delta p_J} \right) \Delta t, \quad (2.5)$$

onde F_1^n é o fluxo solar e infravermelho no topo da atmosfera do modelo. A temperatura superficial então é calculada seguindo uma adiabática úmida do topo da atmosfera até a superfície. Temperaturas nas outras camadas são obtidas seguindo a adiabática úmida da camada superficial até a camada desejada.

Tabela 2.1: Composição Atmosférica de Vênus, Terra e Marte

	Componentes	Vênus	Terra	Marte
Majoritários	Dióxido de Carbono (CO ₂)	96,5%	300 ppm	95,32%
	Nitrogênio (N ₂)	3,5%	78,08%	2,7%
	Oxigênio (O ₂)	—	20,95%	0,13%
	Argônio (Ar)	70 ppm	9340 ppm	1,6%
Minoritários	Monóxido de Carbono (CO)	17 ppm	—	0,08%
	Água (H ₂ O)	20 ppm	variável	210 ppm
	Dióxido de Enxofre (SO ₂)	150 ppm	—	—
	Hélio (He)	12 ppm	5,24 ppm	—
	Neônio (Ne)	7 ppm	18,18 ppm	2,5 ppm
	Criptônio (Kr)	—	1,14 ppm	0,3 ppm
	Xenônio (Xe)	—	—	0,08 ppm
	Metano (CH ₄)	—	1,7 ppm	—
	Hidrogênio (H ₂)	—	0,55 ppm	—
	Óxido Nítrico (NO)	—	—	100 ppm
	Hidrogênio-Deutério-Oxigênio (HDO)	—	—	0,85 ppm

Nota: CO₂ na Terra = 300 ppm (valor pré-Revolução Industrial). — = não reportado/traços.

Fonte: nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/ e keelingcurve.ucsd.edu/.

O modelo de interesse a esta dissertação é o ATMOS, com o qual os estudos se concentraram em duas frentes. A primeira se deu nos anos 1980 considerando um planeta do tipo Terra ($1R_{\oplus}$, $1M_{\oplus}$ e atmosfera descrita na Tabela 2.1) em KASTING *et al.* (1984) e KASTING (1988). Nele, analisa-se o comportamento do fluxo solar incidente e infravermelho re-emitido pela atmosfera aumentando a temperatura superficial. Posteriormente nos anos 1990 consideraram um planeta tipo Marte ($0,53R_{\oplus}$, $0,1M_{\oplus}$ e atmosfera descrita na Tabela 2.1) em KASTING (1991) onde analisa-se o comportamento do fluxo solar incidente e infravermelho re-emitido pela atmosfera aumentando desta vez a pressão superficial. Em ambos os modelos foi assumido um reservatório de água similar ao da Terra ($1,4 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$).

Em KASTING *et al.* (1993) utilizando as atmosferas de Terra e Marte define-se dois limites da ZH, o limite interno e externo. Neste trabalho é considerado como limite interno a perda de água e limite externo a condensação do CO₂. Ambos limites são considerados conservadores por ignorarem o possível efeito das nuvens, de H₂O no limite interno e de

CO₂ no limite externo. Para o Sol, KASTING *et al.* (1993) define como limite conservador interno em 0,95 *UA* e limite conservador externo em 1,67 *UA*.

KOPPARAPU *et al.* (2013) atualizou o código climático radiativo-convectivo de KASTING *et al.* (1993), apresentando quatro novas modificações: atualização de coeficientes de absorção de moléculas, inclusão de espalhamento Rayleigh por vapor d'água, inclusão de absorção induzida de CO₂ por colisão e atualização de capacidade térmica específica (c_p) de CO₂ e H₂O. Assim para o Sol, definiu-se o novo limite conservador interno e externo de 0,99 *UA* e 1,70 *UA*.

No ano seguinte, KOPPARAPU *et al.* (2014) atualizou novamente o código, com a adição da possibilidade de cálculo para distintas massas. Os resultados apresentaram uma diminuição de 10 % no tamanho da ZH para planetas de baixa massa ($0,1M_{\oplus}$) ao mover o limite interno para mais longe da estrela hospedeira e um aumento de 7 % no tamanho da ZH para planetas de alta massa ($10M_{\oplus}$) ao mover o limite interno para mais próximo da estrela hospedeira.

2.2 Determinação dos limites da zona de habitabilidade

Para o cálculo do limite interno da ZH (ZHI), o modelo supõe uma atmosfera dividida em uma estratosfera radiativa isotérmica de 200 K, e uma troposfera convectiva, onde é assumido um gradiente de temperatura adiabático para a água, úmido ou seco a depender da temperatura superficial selecionada (esta sendo um parâmetro livre do código). Abaixo da temperatura crítica da água (cerca de 647 K), o gradiente se comporta como úmido, enquanto acima deste valor o gradiente adiabático é seco (Figura 2.1). A metodologia para o cálculo do gradiente adiabático é descrito no Apêndice A de KASTING (1988).

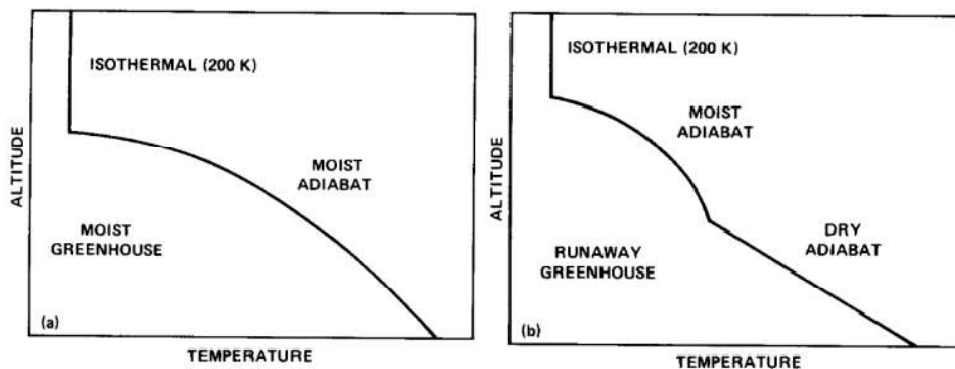


Figura 2.1: Diagrama dos gradientes de temperatura utilizados no cálculo da ZHI. No diagrama da esquerda (a) o perfil é para uma temperatura superficial abaixo de 647 K, assim o perfil é úmido na troposfera. No diagrama da direita (b) o perfil é para uma temperatura superficial acima de 647 K, assim o perfil é seco na troposfera. Figura adaptada de KASTING (1988).

Já para o cálculo do limite externo da ZH (ZHE), a atmosfera dividida em uma estra-

tosfera radiativa isotérmica a 167 K, e uma troposfera descrita por um gradiente adiabático úmido com duas componentes, CO_2 e água. A temperatura superficial não é mais um parâmetro livre, esta fixada em 273 K, porém a pressão de CO_2 é uma variável livre (Figura 2.2). A metodologia para o cálculo do gradiente adiabático úmido é descrito no Apêndice B de KASTING (1991).

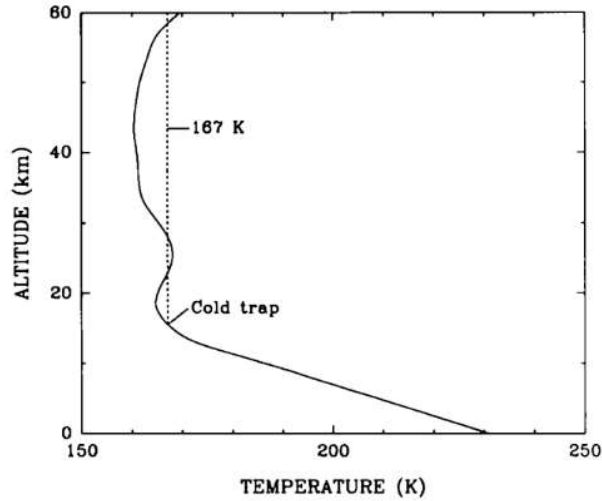


Figura 2.2: Diagrama do gradiente de temperatura para o caso de $P_S = 0,35$ bar. A troposfera é modelada como um gradiente adiabático úmido (linha cheia) até o "cold trap", altitude com temperatura suficiente para congelar voláteis, a partir desse ponto a estratosfera é modelada por uma isoterma a 167 K (linha tracejada). Figura extraída de KASTING (1991).

2.2.1 Limite interno da zona de habitabilidade (ZHI) para uma estrela tipo solar

Para a determinação da ZHI, KOPPARAPU *et al.* (2013) variam a temperatura superficial, de um planeta de dimensões similares à Terra ($1 R_\oplus$ e $1 M_\oplus$), entre 220 K e 2200 K. A atmosfera é também do tipo Terra (N_2 , Ar e CO_2 , dominada por H_2O , com pressão parcial de nitrogênio de 1 bar) (ver Tabela 2.1). O albedo superficial é igual a 0,32.

O fluxo efetivo estelar (S_{eff}) é calculado pela razão entre o fluxo infravermelho reemitido (F_{IR}) e o fluxo solar incidente (F_{SOL}):

$$S_{eff} = \frac{F_{IR}}{F_{SOL}}. \quad (2.6)$$

Na Figura 2.3a apresenta-se a variação dos fluxos incidente e reemitido em função da temperatura superficial. No intervalo entre 220 e 400 K, F_{IR} aumenta com a temperatura superficial até atingir aproximadamente $291 W/m^2$. Para comparação, o valor correspondente à Terra é de cerca de $270 W/m^2$. Entre 400 e 1800 K, F_{IR} permanece praticamente constante. Segundo KOPPARAPU *et al.* (2013), esse comportamento decorre do aumento

da opacidade atmosférica à radiação infravermelha. Para temperaturas superiores a 1800 K, F_{IR} volta a aumentar, pois a superfície passa a emitir parcela significativa da radiação no óptico e no infravermelho próximo.

No intervalo entre 220 e 400 K, F_{SOL} também aumenta, acompanhando a tendência de F_{IR} para manter o equilíbrio térmico da superfície. Após atingir um máximo local, F_{SOL} diminui até alcançar um valor aproximadamente constante de 264 W/m² para temperaturas superficiais superiores a 400 K.

A Figura 2.3b apresenta a variação de S_{eff} em função da temperatura superficial. O parâmetro aumenta até a temperatura crítica da água (647 K), mantendo-se praticamente constante nesse intervalo. Para temperaturas superiores a 1800 K, S_{eff} volta a crescer. Esse comportamento evidencia dois possíveis limites internos para ZH: o efeito estufa úmido (*moist greenhouse*) e o irreversível (*runaway greenhouse*). O limite associado ao *moist greenhouse* foi posteriormente descontinuado como critério conservador por KOPPARAPU *et al.* (2014), que verifica apenas 2% de diferença com o limite do *runaway greenhouse*, que em contraste permanece como a estimativa conservadora mais aceita para a borda interna da ZH. O limite de efeito estufa irreversível corresponde à evaporação completa dos oceanos, tornando a atmosfera opaca devido à elevada concentração de vapor d'água. Para o caso do Sol, o limite interno da Zona Habitável corresponde a $S_{eff} = 1,017$ e $d_{ZH} = 0,99$ UA. Consequentemente, a Terra, com semi-eixo maior de 1 UA, encontra-se muito próxima desse limite.

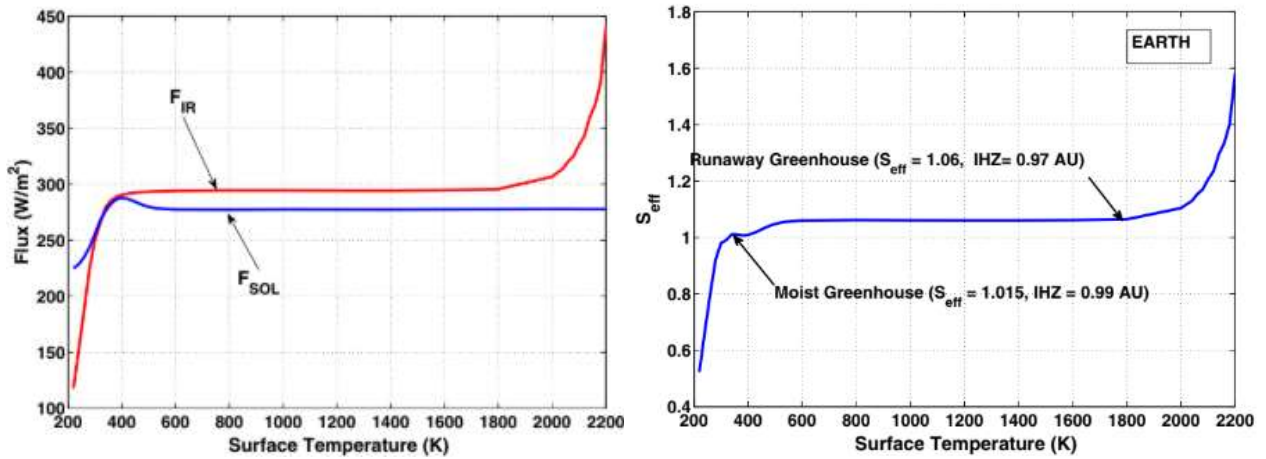


Figura 2.3: Diagramas referentes aos resultados obtidos para o limite interno da ZH no caso solar. À esquerda fluxo solar incidente (F_{SOL}) e fluxo infravermelho reemitido (F_{IR}) em função da temperatura superficial. À direita fluxo solar efetivo (S_{eff}) em função da temperatura superficial. Figuras extraídas de KOPPARAPU *et al.* (2014).

Ainda em seu trabalho KASTING *et al.* (1993) apresentaram um terceiro limite interno para a ZH obtida pelas observações da sonda *Magellan* que preconiza que água líquida seja ausente da superfície de Vênus a ao menos 1 Ga (bilhão de anos) (SOLOMON *et al.*, 1992). O Sol à época emitia cerca de 92 % da luminosidade atual, seguindo modelos

padrão de evolução estelar (KIPPENHAHN *et al.*, 2012).

Na distância que Vênus se encontra atualmente, seu fluxo solar é de 1,92 vezes do recebido pela Terra. Podemos inferir que o fluxo recebido a 1 Ga é de $0,92 \cdot 1,92 = 1,76$ vezes o recebido pela Terra. Assim estima-se uma ZHI otimista à distância orbital presente, usando a Equação 1.28, $d_{ZH} = (1/1,76)^{1/2} = 0,75 \text{ UA}$. Vale ressaltar que a distância orbital atual de Vênus é de 0,72 UA, dado os cálculos para as condições estelares de 1 Ga. Atualmente Vênus encontra-se fora da ZH Otimista solar.

2.2.2 Limite externo da zona de habitabilidade (ZHE) para uma estrela tipo solar

Para determinação do ZHE, KOPPARAPU *et al.* (2013) considera uma atmosfera do tipo Marte sendo o exemplo de planeta próximo ao limite externo em *runaway greenhouse* do Sistema Solar. Assim varia-se não a temperatura superficial como no caso do ZHI, mas sim a pressão de CO_2 para um planeta de dimensões similares da à Terra ($1 R_{\oplus}$ e $1 M_{\oplus}$), porém com uma atmosfera do tipo Marte com composição majoritariamente de CO_2 (ver Tabela 2.1). Igualmente ao caso da ZHI o albedo superficial é de 0,32. A temperatura superficial é fixada em 273 K e a temperatura da estratosfera em 167 K. Para obtenção do ZHE, a pressão de dióxido de carbono é variada desde 1 à 35 bar, ao passo de que a pressão de nitrogênio molecular segue uma proporção de 0,027 para 1 bar de dióxido de carbono.

Na Figura 2.4a tem-se os resultados dos fluxos obtidos em função da pressão parcial de CO_2 . Conforme a pressão aumenta o fluxo solar (F_{SOL}) diminui devido ao espalhamento Rayleigh (CO_2 é mais efetivo que o N_2 para este efeito). Enquanto isso, o F_{IR} decresce com o aumento da pressão, se tornando constante próximo de 10 bar.

Na Figura 2.4b observa-se o fluxo efetivo S_{eff} necessário para a manutenção da temperatura superficial de 273 K, atingindo valor mínimo em 0,325 em cerca de 8 bar, sendo este o fluxo solar efetivo para que um planeta do tipo Terra e atmosfera tipo Marte possa manter água líquida em sua superfície. Esse limite é definido como o *Maximum Greenhouse*, utilizado na literatura como o ZHE conservador. Utilizando a Equação 1.28 temos que este limite está a 1,67 UA do Sol.

É possível assim como no caso do ZHI, traçar um limite externo da ZH mais otimista, este previsto por POLLACK *et al.* (1987) de maneira empírica, dito Marte Jovem (*Early Mars* no texto original), baseando-se na possibilidade de água líquida na superfície de Marte no passado. Os rios de Marte teriam secado a 3,8 Ga, quando a luminosidade solar era de cerca de 75 % da atual. Fazendo os mesmos cálculos realizados para Vênus na subseção anterior tem que o fluxo recebido por Marte à época era de 0,32 vezes o recebido pela Terra.

Usando a equação 1.28 temos que o ZHE otimista para o caso solar se encontra a 1,77

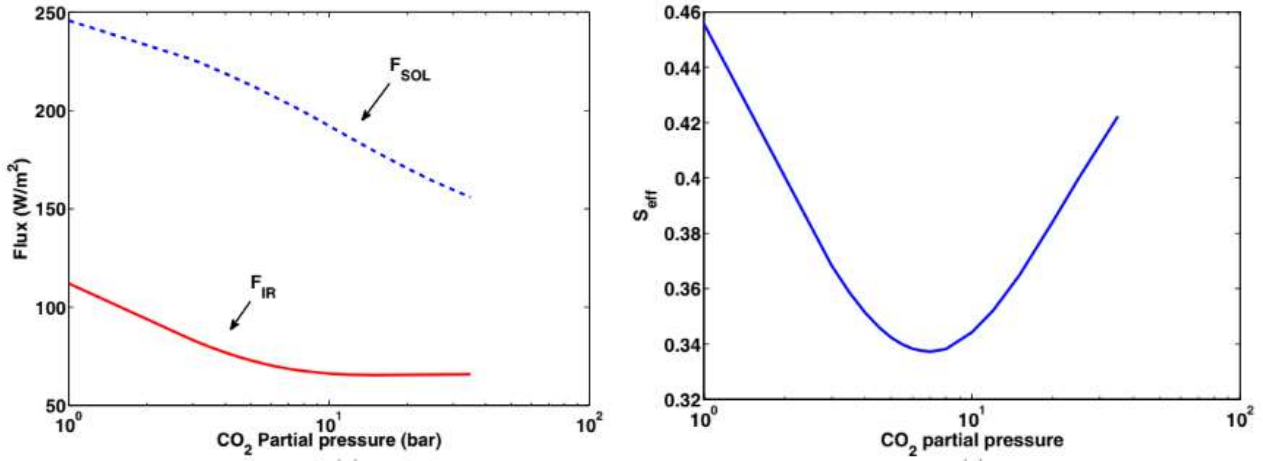


Figura 2.4: Diagramas referentes aos resultados obtidos para o limite externo da ZH no caso solar. À esquerda fluxo solar incidente (F_{SOL}) e fluxo infravermelho reemitido (F_{IR}) em função da pressão parcial de CO_2 . À direita fluxo solar efetivo (S_{eff}) em função da pressão parcial de CO_2 . Figuras extraídas de KOPPARAPU *et al.* (2014).

UA. Sugerindo que Marte outrora pode abrigar uma atmosfera mais quente, caso formada por outros gases. SEGURA *et al.* (2008) debatem que Marte jovem mais quente parece uma explicação para os vales que hoje vemos em Marte, impossibilitados de surgir em uma atmosfera fria sem chuvas.

2.2.3 Limites da zona de habitabilidade para estrelas F, G, K e M

Uma análise complementar consiste na determinação da ZH para diferentes estrelas da sequência principal, conforme proposto por KOPPARAPU *et al.* (2013). Foram considerados os tipos espectrais F, G, K e M, por serem os mais relevantes para estudos astrobiológicos (KASTING *et al.*, 1993). Para essa análise, foram gerados espectros sintéticos utilizando o modelo BTSettlegridmodels (ALLARD, 2013). Os espectros foram normalizados para o fluxo solar incidente na Terra. A Figura 2.5 apresenta os resultados obtidos por meio de uma análise análoga à descrita na subseção anterior.

Por meio dessas análises os autores encontram uma expressão geral para determinação do fluxo efetivo estelar (S_{eff}), em uma função da temperatura efetiva estelar entre 2600 e 7200 K:

$$S_{eff} = S_{eff\odot} + aT_{\star} + bT_{\star}^2 + cT_{\star}^3 + dT_{\star}^4, \text{ onde } T_{\star} = T_{\star eff} - 5780K, \quad (2.7)$$

sendo $T_{\star eff}$ a temperatura efetiva estelar em Kelvin e os coeficientes $S_{eff\odot}$, a , b , c e d são escolhidos a depender do limite da ZH desejado (listados na Tabela 2.2).

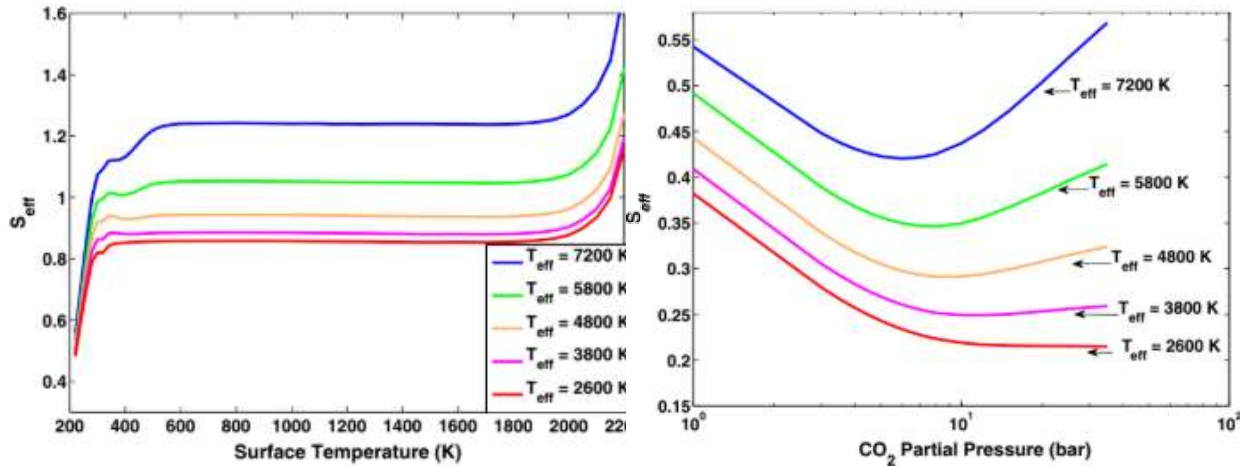


Figura 2.5: Diagramas referentes a determinação dos limites da ZH em outras estrelas. À esquerda fluxo solar efetivo S_{eff} em função da temperatura superficial para estrelas de 2600 a 7200 K. À direita fluxo solar efetivo (S_{eff}) em função da pressão parcial de CO_2 para estrelas de 2600 a 7200 K. Figuras extraídas de KOPPARAPU *et al.* (2014).

Tabela 2.2: Coeficientes da Equação 2.7, considerando os diferentes limites da ZH para outras estrelas da sequência principal. Tabela adaptada de KOPPARAPU *et al.* (2013).

Coeficientes	Recent Venus	Runaway Greenhouse	Maximum Greenhouse	Early Mars
$S_{eff\odot}$	1,7753	1,0512	0,3438	0,3179
a	$1,4316 \cdot 10^{-4}$	$1,3242 \cdot 10^{-4}$	$5,8942 \cdot 10^{-5}$	$5,4513 \cdot 10^{-5}$
b	$2,9875 \cdot 10^{-9}$	$1,541 \cdot 10^{-8}$	$1,655 \cdot 10^{-9}$	$1,513 \cdot 10^{-9}$
c	$-7,5702 \cdot 10^{-12}$	$7,9895 \cdot 10^{-12}$	$-3,0045 \cdot 10^{-12}$	$-2,7786 \cdot 10^{-12}$
d	$-1,1635 \cdot 10^{-15}$	$-1,8328 \cdot 10^{-15}$	$-5,2983 \cdot 10^{-16}$	$-4,8997 \cdot 10^{-16}$

Possíveis entraves à habitabilidade para planetas orbitando outras estrelas da sequência principal

i) Estrelas mais quentes que o Sol

Planetas orbitando estrelas mais quentes que o Sol apresentam dois tipos de problemas distintos. O primeiro é o fato de estrelas do tipo O, B e muitas do tipo A, terem uma vida muito curta na sequência principal. Já as estrelas do tipo F, permanecem na sequência principal por ao menos 2 bilhões de anos. Tempo suficiente para originar e desenvolver vida, porém talvez seja curto para desenvolver vida multicelular complexa, tendo como base a história terrestre (CATLING e CLAIRE, 2005).

O segundo problema é a alta quantidade de radiação UV (Figura 2.6). Um planeta orbitando a uma distância de 1 UA de uma estrela do tipo F, receberia quatro vezes mais radiação, do que a Terra recebe do Sol, em $\lambda < 315$ nm. Esse comprimento de onda inclui radiação UVB (290-320 nm) e UVC (100-290 nm), biologicamente danosas (SEGURA *et al.*, 2003). Para planetas com a mesma evolução atmosférica da Terra (sem camada

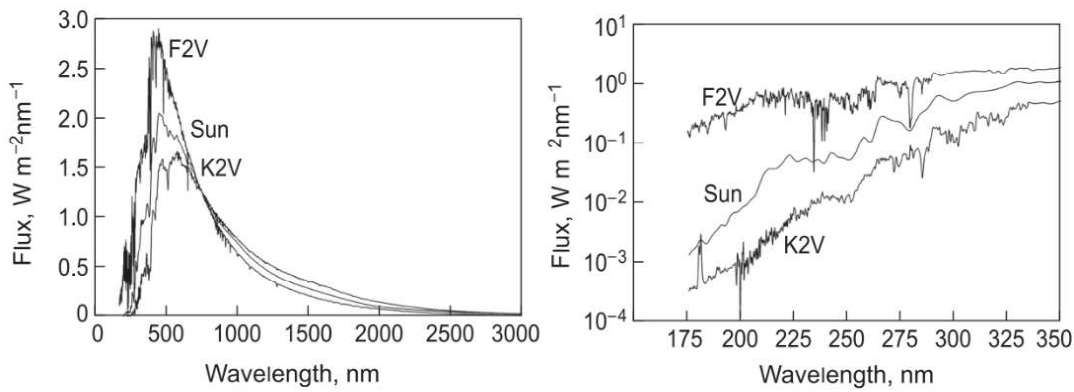


Figura 2.6: Diagrama que apresenta o fluxo incidente estelar para um planeta orbitando uma estrela do tipo F2, Solar e K2. O planeta recebe a mesma quantidade de luz que a Terra. O painel à esquerda mostra o espectro estelar em comprimento de onda (0 a 3000 nm). O painel à direita mostra a porção ultravioleta (175 a 350 nm) do espectro estelar em comprimento de onda. Figura adaptada de SEGURA *et al.* (2003).

de ozônio no início da sua história), isso pode levar a altas taxas de mutação na vida superficial. O planeta pode se formar com uma camada de ozônio espessa, assim estrelas do tipo F não devem ser excluídas.

ii) Estrelas mais frias que o Sol

Os problemas para planetas orbitando estrelas do tipo G, K ou M, são de outra natureza. Um problema reconhecido por DOLE (1964) e discutido por KASTING *et al.* (1993) é o travamento de maré. A ZH de estrelas do tipo M e K, coincidem com a distância para um planeta estar em travamento de maré com sua estrela. O travamento de maré pode congelar a atmosfera e os oceanos no lado escuro do planeta, formando uma grande placa de gelo, tornando o planeta completamente inabitável. Porém é possível que um planeta, assim como Mercúrio, possua rotação ressonante spin-órbita, que impede o travamento de maré. No caso de Mercúrio essa rotação ressonante é devido a uma distribuição de massa não esférica e por conta da sua excentricidade ($e \simeq 0,21$).

Outra forma de mitigar o problema associado ao travamento de maré é a advecção de calor pela atmosfera ou oceano (transporte horizontal). Um planeta com ao menos 30 mbar de CO_2 (cerca de 100 vezes o presente na Terra), pode transportar calor do lado iluminado ao lado escuro para prevenir o congelamento atmosférico (JOSHI, 2003). De maneira similar, com um grande oceano (similar à Terra), correntes oceânicas podem carregar calor globalmente (MERLIS e SCHNEIDER, 2011). PIERREHUMBERT (2010) propõe uma "Terra Olho" (do inglês "*eyeball Earth*") na qual há um lado iluminado quente e um lado escuro e frio, mesmo assim é possível a habitabilidade no limite temperado entre estes dois extremos. Assim não é possível excluir estrelas do tipo M, como candidatas à habitabilidade.

Existem entretanto outros problemas para planetas orbitando estrelas do tipo M. Es-

trelas do tipo M são mais ativas e emitem mais jatos energéticos que o Sol, e possuem ventos estelares mais fortes. Planetas orbitando estas estrelas terão período muito curtos ($P \simeq 10 - 100$ dias) e assim serão incapazes de gerar fortes campos magnéticos, por falta de efeito dínamo. Dessa forma, esses planetas podem perder suas atmosferas por ventos estelares (LAMMER *et al.*, 2007).

A ZH de estrelas tipo M são bem próximas a estrela, região onde há baixa disponibilidade de matéria (pois a massa do disco protoplanetário está concentrada em regiões mais externas), assim serão bem menores que a Terra. A formação também ocorreria rapidamente, não tendo tempo da nebulosa resfriar. Assim sendo gerados longe da *snowline*, reduzindo a quantidade de planetesimais ricos em água (CATLING, 2015). Nenhum dos pontos anteriores, completamente excluem estrelas do tipo M da possível habitabilidade. Sendo a maioria na vizinhança solar, e com tamanho e luminosidade que favorecem a busca e caracterização de planetas do tipo Terra (por meio do trânsito planetário). Deve-se esperar que estas estrelas continuem sendo alvos de grande prioridade.

2.2.4 Limites da zona de habitabilidade para pressões e massas diferentes

A metodologia descrita anteriormente, que utiliza a Equação 2.7 os coeficientes da Tabela 2.2, só pode ser utilizada para planetas com dimensões da Terra ($1 R_{\oplus}$ e $1 M_{\oplus}$). Para cálculos com distintos valores de raio e massa do planeta deve-se utilizar o código convectivo-radiativo caso a caso.

Em KOPPARAPU *et al.* (2014) foram refinados e obtidos os coeficientes para $1 M_{\oplus}$ e ainda coeficientes para duas outras massas planetárias: $0,1 M_{\oplus}$ e $5 M_{\oplus}$. Igualmente descrito em seções anteriores os limites interno e externo da ZH são aferidos assumindo uma atmosfera do tipo Terra e tipo Marte, respectivamente. KOPPARAPU *et al.* (2014) realizam três análises utilizando código radiativo-convectivo.

Varia-se a pressão parcial de nitrogênio (pN_2) na atmosfera fixando a massa em $1 M_{\oplus}$, afim de analisar a influência deste gás sobre os limites da ZH. Os resultados da análise são mostrados na Figura 2.7. Na análise à esquerda percebe-se que para temperaturas menores que 400 K, o F_{IR} é menor para pN_2 altas. Acima de 400 K, o maior constituinte da atmosfera é o H_2O tornando-a opaca, com isso F_{IR} torna-se constante e igual para todos as pN_2 . Não existindo diferença substancial nas diferentes pN_2 , pode-se concluir que o ZHI depende fracamente da pN_2 . Na análise à direita percebe-se uma diferença mínima entre os valores mínimos de S_{eff} para distintas pN_2 , entretanto a ZHE é fortemente dependente da pCO_2 que governa as interações a baixa pN_2 . Logo pode-se concluir que a ZHE não terá uma alteração significativa com a variação da pN_2 . Varia também a pN_2 o raio planetário para determinação dos limites da ZH. Não havendo alteração significativa de ambas ZHI e ZHE.

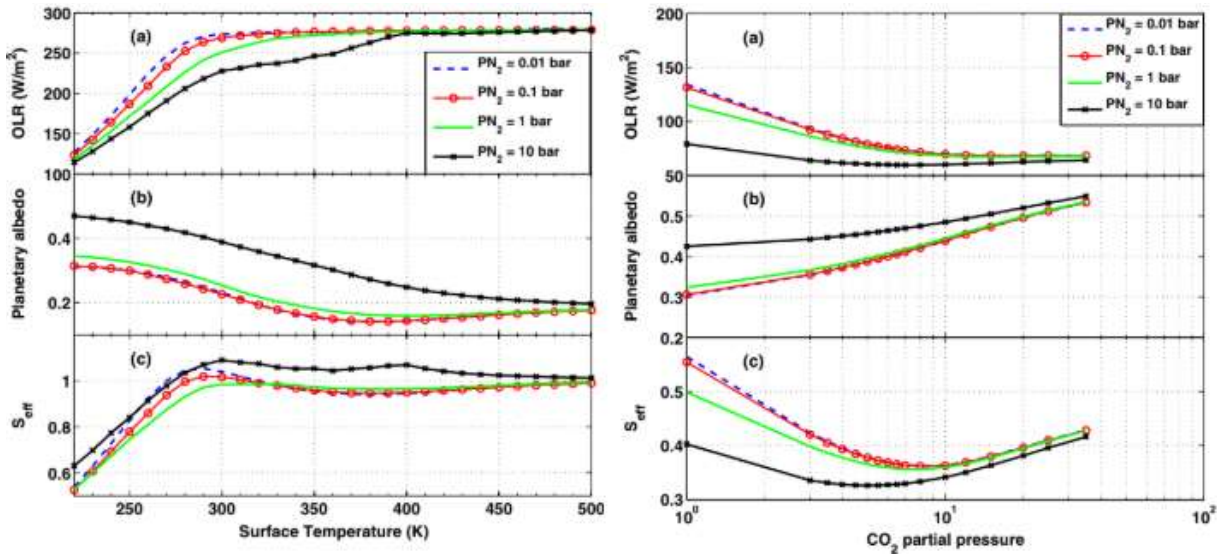


Figura 2.7: Influência da variação de pN_2 sobre a temperatura superficial e pCO_2 , utilizando OLR, albedo planetário e S_{eff} . À esquerda a análise para ZHI e à direita para ZHE. Figura adaptada de KOPPARAPU *et al.* (2014).

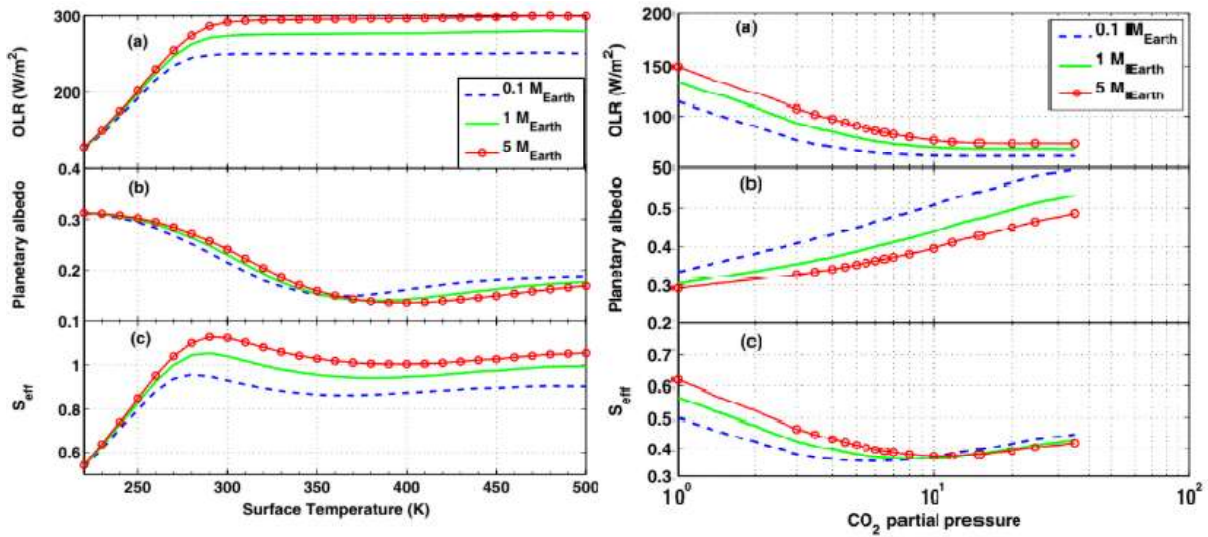


Figura 2.8: Influência da variação de massa sobre a temperatura superficial e pCO_2 , utilizando OLR, albedo planetário e S_{eff} . À esquerda a análise para ZHI e à direita para ZHE. Figura adaptada de KOPPARAPU *et al.* (2014).

A análise mais significativa é variando a massa planetária ($0,1 M_{\oplus}$, $1 M_{\oplus}$ e $5 M_{\oplus}$), mantendo fixo a pN_2 em 0,01, afim de estudar somente os efeitos da gravidade para os limites da ZH. Os resultados da análise são mostrados na Figura 2.8. Variando a massa entre os valores de 0,1, 1 e $5 M_{\oplus}$, para um planeta com pN_2 fixado em 0,01 bar. Esses valores são escolhidos para abranger todo o espectro de planetas rochosos pequenos. A Figura 2.8 é dividida em três análises assim como para a primeira análise. Na análise à esquerda (ZHI) percebe-se que o OLR (reemissão no infra-vermelho) é maior para planetas com maior massa. Isto ocorre devido a maior concentração de H_2O , para um planeta com

$0,1 M_{\oplus}$, devido a baixa gravidade, aumentando o efeito estufa e reduzindo a reemissão. Por esse motivo no painel final (S_{eff} por temperatura superficial) é possível observar para planetas massivos o fluxo efetivo é maior que para planetas menos massivos. Portanto, o ZHI se aproxima da estrela hospedeira para planetas massivos e se afasta para planetas menos massivos. Na análise à direita percebe-se uma diferença mínima entre os valores de mínimos de S_{eff} em razão da pCO_2 . Pode-se concluir então que, a ZHE não terá uma alteração considerável, em relação a variação de massa planetária. Como o resultado mais significativo das análises é das relações de massa, são dados os coeficientes para a Equação 2.7 agora com dependência de massa para $0,1$, 1 e $5 M_{\oplus}$. Com estes novos resultados é possível, não somente definir os limites da ZH para diferentes estrelas (de 2600 a 7200 K), como também para diferentes massas planetárias, cobrindo um grande conjunto de sistemas estelares/planetários.

Tabela 2.3: Coeficientes da Equação 2.7, considerando diferentes limites da ZH para outras estrelas da sequência principal e para diferentes massas planetárias. Tabela adaptada de KOPPARAPU *et al.* (2014).

Coeficientes	Recent Venus	Runaway Greenhouse	Maximum Greenhouse	Early Mars
$S_{eff\odot}$ ($1 M_{\oplus}$)	1,776	1,107	0,356	0,32
$S_{eff\odot}$ ($5 M_{\oplus}$)	...	1,188	...	...
$S_{eff\odot}$ ($0,1 M_{\oplus}$)	...	0,99	...	...
a ($1 M_{\oplus}$)	$2,136 \cdot 10^{-4}$	$1,332 \cdot 10^{-4}$	$6,171 \cdot 10^{-5}$	$5,547 \cdot 10^{-5}$
a ($5 M_{\oplus}$)	...	$1,433 \cdot 10^{-4}$	...	...
a ($0,1 M_{\oplus}$)	...	$1,209 \cdot 10^{-4}$	...	...
b ($1 M_{\oplus}$)	$2,533 \cdot 10^{-8}$	$1,580 \cdot 10^{-8}$	$1,698 \cdot 10^{-9}$	$1,526 \cdot 10^{-9}$
b ($5 M_{\oplus}$)	...	$1,707 \cdot 10^{-8}$	...	...
b ($0,1 M_{\oplus}$)	...	$1,404 \cdot 10^{-8}$	...	...
c ($1 M_{\oplus}$)	$-1,332 \cdot 10^{-11}$	$-8,308 \cdot 10^{-12}$	$-3,198 \cdot 10^{-12}$	$-2,874 \cdot 10^{-12}$
c ($5 M_{\oplus}$)	...	$-8,968 \cdot 10^{-12}$	...	...
c ($0,1 M_{\oplus}$)	...	$-7,418 \cdot 10^{-12}$	...	...
d ($1 M_{\oplus}$)	$-3,097 \cdot 10^{-15}$	$-1,931 \cdot 10^{-15}$	$-5,575 \cdot 10^{-16}$	$-5,011 \cdot 10^{-16}$
d ($5 M_{\oplus}$)	...	$-2,084 \cdot 10^{-15}$	...	...
d ($0,1 M_{\oplus}$)	...	$-1,713 \cdot 10^{-15}$	...	...

Capítulo 3

Quantificação da Habitabilidade

A crescente descoberta de exoplanetas tornou necessária a definição de métricas capazes de comparar esses corpos com a Terra. Entre essas métricas destaca-se o *Earth Similarity Index* (ESI), proposto por SCHULZE-MAKUCH *et al.* (2011), que quantifica o grau de semelhança física entre um planeta e a Terra. O ESI fornece uma medida adimensional compreendida entre 0 e 1, em que 0 representa nenhuma similaridade e 1 corresponde a um planeta idêntico à Terra.

O conceito de planeta terrestre ou *Earth-like* está, em geral, associado a objetos com composição global semelhante à terrestre. Entretanto, o ESI amplia essa definição ao incluir propriedades físicas da superfície, permitindo uma comparação mais abrangente entre planetas do Sistema Solar e exoplanetas. Dessa forma, o índice pode ser empregado para identificar candidatos com características semelhantes às da Terra, selecionar alvos para observações futuras e realizar estudos estatísticos sobre a ocorrência de planetas terrestres.

O cálculo do ESI baseia-se em um conjunto reduzido de parâmetros físicos. Para planetas do Sistema Solar, são utilizados o raio, a densidade média, a velocidade de escape e a temperatura superficial. No caso dos exoplanetas, a disponibilidade limitada de observações restringe o cálculo a parâmetros como raio ou massa e o fluxo estelar incidente, frequentemente utilizado para estimar a temperatura de equilíbrio do planeta.

O ESI fundamenta-se em uma medida de similaridade obtida a partir de uma métrica de distância entre as propriedades do planeta analisado e os valores correspondentes da Terra. Esse conceito é amplamente empregado em problemas de reconhecimento de padrões, classificação e agrupamento de dados (CHA, 2007). Quanto maior o número de propriedades consideradas e maior a precisão das observações, mais representativa é a comparação entre os planetas.

Apesar de sua ampla aplicação, o ESI apresenta limitações importantes. As propriedades físicas de muitos exoplanetas possuem elevadas incertezas observacionais e, em diversos casos, são estimadas a partir de modelos. Um exemplo é a temperatura superficial, que permanece desconhecida para praticamente todos os exoplanetas. Em seu lugar,

utiliza-se a temperatura de equilíbrio, a qual não considera os efeitos da atmosfera e, conseqüentemente, pode diferir significativamente da temperatura real da superfície.

Além disso, o ESI não constitui uma medida direta de habitabilidade. O índice representa apenas o grau de similaridade física em relação à Terra e não permite inferir, isoladamente, a existência de condições favoráveis à vida. Assim, planetas com elevados valores de ESI devem ser interpretados como candidatos promissores para estudos mais detalhados, e não como mundos necessariamente habitáveis. Utilizando parâmetros encontrados no catálogo da NASA e por meio do ATMOS, iremos ordenar melhor os planetas astrobiologicamente interessantes da amostra encontrada.

3.1 *Earth Similarity Index* (ESI)

Parâmetros de similaridade são amplamente empregados na classificação de objetos em diferentes áreas do conhecimento (DEZA e DEZA, 2009). Esses parâmetros quantificam o grau de semelhança entre dois elementos por meio de uma medida de distância. Considerando um parâmetro de distância d , a dissimilaridade entre dois objetos pode ser representada diretamente por esse valor, enquanto a similaridade pode ser definida como seu complemento, $s = 1 - d$.

Matematicamente, a distância constitui uma medida que representa a separação entre pontos em um espaço euclidiano R^n . De forma mais geral, essa medida pode ser definida em um espaço de Minkowski por meio da métrica do tipo L_p (CHA, 2007), em que a norma L_p é aplicada a um espaço vetorial finito de dimensão n , com vetores p e q .

$$d = \left(\sum_{i=1}^n |p_i - q_i|^p \right)^{1/p}. \quad (3.1)$$

Onde a distância Manhattan L_1 é:

$$L_1 = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i|. \quad (3.2)$$

E a distância Euclidiana L_2 é:

$$L_2 = \left(\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2 \right)^{1/2}. \quad (3.3)$$

Estes são casos especiais, onde p_i e q_i são as coordenadas de p e q com dimensões i (onde $i \in \mathbb{N}^*$). L_1 tem vantagem de poder ser decomposto nas contribuições individuais de cada variável. L_2 utiliza-se de distâncias quadradas. No interesse de encontrar a similaridade entre exoplanetas diferentes, baseado em distintas características, deve-se utilizar a distância Bray-Curtis (BRAY e CURTIS, 1957), esta aplica o conceito de distâncias paramétricas a fim de encontrar distâncias físicas. A distância Bray-Curtis é similar a

distância Manhattan, porém normalizada pela somatória das variáveis dos objetos:

$$d_{BC} = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - q_i|}{\sum_{i=1}^n (p_i + q_i)}, \quad (3.4)$$

onde p_i e q_i são duas quantidades mensuráveis onde a distância entre elas será medida, e n é o número total de variáveis. Na escala Bray-Curtis, zero (0) significa que as amostras são exatamente iguais e um (1) significa o completo distanciamento.

A intersecção entre duas distribuições é mais comumente utilizada na forma de similaridade (LOOMAN e CAMPBELL, 1960). Podemos transformar a distância por meio da seguinte relação:

$$s_{BC} = 1 - d_{BC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - q_i|}{\sum_{i=1}^n (p_i + q_i)}. \quad (3.5)$$

Assim, o valor zero é a ausência completa de relação e um é a completa correspondência entre os dados no espaço n -dimensional. Deve-se definir pesos para convenientemente priorizar um grupo de variáveis (de interesse para o estudo), no caso de um planeta ser utilizado como referência, por exemplo para encontrar planetas similares à Terra. Reescrevendo a Equação 3.5, avaliando cada parâmetro individualmente, eliminando a operação de soma e permitindo que cada variável receba um peso próprio:

$$s = \left[1 - \frac{|x - x_0|}{(x + x_0)} \right]^{W_x}, \quad (3.6)$$

onde x é o parâmetros físico de referência do exoplaneta, x_0 é o valor de referência e W_x é o peso do parâmetro, e a dimensão é $n = 1$ por conta de haver um índice por parâmetro. Para encontrar o valor do peso W_x , fixamos um valor limiar (V) na escala de similaridade:

$$V = \left[1 - \frac{|x - x_0|}{(x + x_0)} \right]^{W_x}. \quad (3.7)$$

BLOOM (1981) define entre 0 e 1, cinco intervalos de 0,2 de distância, definidos como muito baixa ($s < 0,2$), baixa ($0,2 < s < 0,4$), média ($0,4 < s < 0,6$), alta ($0,6 < s < 0,8$) e muito alta ($s > 0,8$). Assim define-se o valor limiar na escala de similaridade como $V = 0,8$. Fixando o valor limiar e definindo os limites físicos x_a e x_b como valores permitidos para x_0 (de forma que $x_a < x_0 < x_b$), pode-se calcular os expoentes peso para o limite superior e inferior, W_a e W_b respectivamente:

$$W_a = \frac{\ln V}{\ln(1 - \frac{|x_0 - x_a|}{(x_0 + x_a)})} \quad \text{e} \quad W_b = \frac{\ln V}{\ln(1 - \frac{|x_0 - x_b|}{(x_0 + x_b)})}; \quad (3.8)$$

O peso médio é obtido pela média geométrica destes valores:

$$W_x = \sqrt{W_a \cdot W_b}. \quad (3.9)$$

Defini-se então para o estudo da similaridade do parâmetros do exoplaneta (x) com o parâmetro da Terra (x_0):

$$ESI_x = \left[1 - \frac{|x - x_0|}{(x + x_0)}\right]^{w_x}. \quad (3.10)$$

SCHULZE-MAKUCH *et al.* (2011) definem duas sub-similaridades com a Terra, interior e superficial definidas respectivamente como:

$$ESI_I = (ESI_r \cdot ESI_\rho)^{1/2} \quad \text{e} \quad ESI_S = (ESI_{v_{esc}} \cdot ESI_{T_S})^{1/2}, \quad (3.11)$$

onde o r é o raio médio, ρ é a densidade e v_{esc} é a velocidade de escape, T_S é a temperatura superficial média. Assim com uma simples média geométrica, combina-se as sub-similaridades em uma similaridade global em inglês *Earth Similarity-Index* (ESI):

$$ESI = (ESI_I \cdot ESI_S)^{1/2}. \quad (3.12)$$

Os expoentes de peso são definidos para parâmetros terrestres: raio médio vai de 0,5 e 1,9 $R_\oplus$, massa vai de 0,1 a 10 $M_\oplus$, densidade vai de 0,7 a 1,5 $\rho_\oplus$, velocidade de escape vai de 0,4 a 1,4 $v_{e\oplus}$ e temperatura superficial vai de 273 a 323 K. Os limites são definidos para que o planeta seja rochoso e a temperatura superficial é definida como aquela adequada para extremófilos (233 a 402 K) (PRICE, 2007). A temperatura superficial a ser utilizada, é determinada conforme descrito na seção seguinte. Os parâmetros de referência e os pesos são apontados na Tabela 3.1:

Propriedade Planetária	Valor de Referência	Expoente Peso
Raio Médio (r)	1 $R_\oplus$	0,57
Densidade (ρ)	1 $\rho_\oplus$	1,07
Velocidade de Escape (v_{esc})	1 $v_{esc\oplus}$	0,7
Temperatura Superficial (T_S)	288 K	5,58

Tabela 3.1: Tabela de parâmetros de referência e expoente peso para Equação 3.10.

3.2 Determinação da Pressão e Temperatura Superficial

Dois parâmetros importantes para se entender as condições climáticas do exoplaneta são a pressão e temperatura superficial (KELES *et al.*, 2018). A estabilidade da água líquida na superfície do planeta depende de ambos. O ponto de fusão não depende tão fortemente da pressão, porém o ponto de ebulição depende significativamente dele (Figura 3.1). Logo, encontrar a pressão e temperatura superficial se torna essencial para

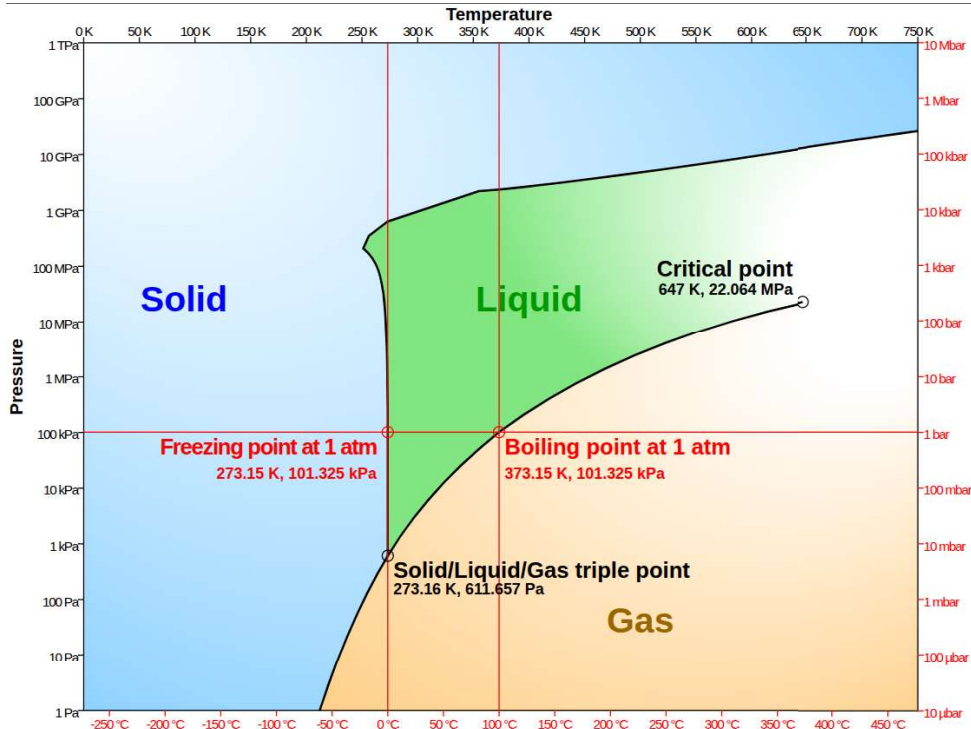


Figura 3.1: Diagrama de fase da água representado em um gráfico log-linear, com pressão de 1 Pa a 1 TPa e temperatura de 0 K a 650 K. Linhas pretas são os limites de fase enquanto as linhas vermelhas apresentam os limites de fusão e ebulição em 1 atm. Figura de Cmglee.

caracterizar o ambiente e a habilidade do exoplaneta.

3.2.1 Pressão Superficial

Uma estimativa inicial para a pressão superficial (P_s) pode ser obtida a partir de modelos de equilíbrio hidrostático (KIPPENHAHN *et al.*, 2012). Usando somente os dados observacionais do exoplaneta como massa e raio, podemos usar a equação:

$$\frac{P_s}{P_s^0} = \left(\frac{M_P}{M^0}\right)^2 \cdot \left(\frac{R^0}{R_P}\right)^4, \quad (3.13)$$

onde os superíndices 0 normalizam os parâmetros a valores terrestres. Neste trabalho segue-se a relação de massa-raio de MÜLLER *et al.* (2024). A relação foi escolhida por utilizar uma amostra atualizada de exoplanetas. Diante dos mais de 6000 confirmados MÜLLER *et al.* (2024) utiliza-se de 688 que possuem massa e raio definidos simultaneamente no catálogo PlanetS¹ (Figura 3.2).

A relação possui dois limites para planetas potencialmente rochosos, rochosos pequenos ($M_P < 4.37M_\oplus$) e super-terras ou planetas hiceânicos ($M > 4.37M_\oplus$), as relações são apresentadas na Equação 3.14:

¹dace.unige.ch/exoplanets/.

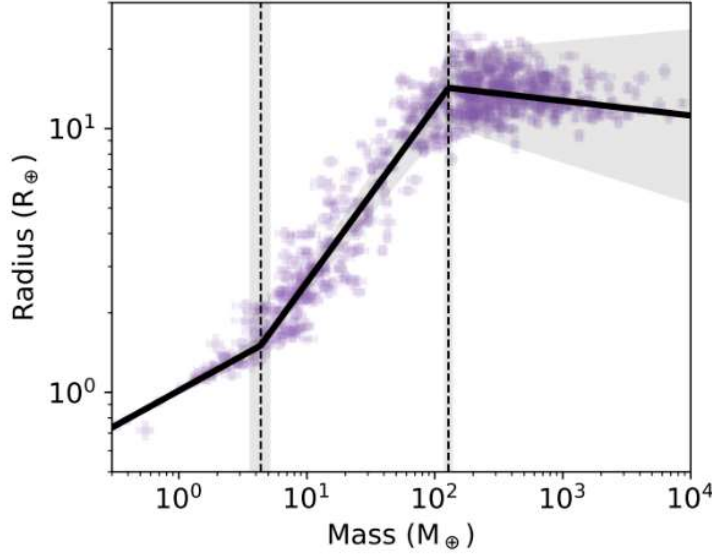


Figura 3.2: Diagrama massa-raio apresentando os planetas do catálogo PlanetS em roxo. A curva ajustada em preto se refere a Equação 3.14. As linhas tracejadas são os limites de planetas rochosos pequenos e Super-Terras/Hiceânicos. Figura extraída de MÜLLER *et al.* (2024).

$$R_P = \begin{cases} (1,02 \pm 0,03) M^{(0,27 \pm 0,04)} R_{\oplus} & \text{para } M_P < (4,37 \pm 0,72) M_{\oplus}; \\ (0,56 \pm 0,03) M^{(0,67 \pm 0,05)} R_{\oplus} & \text{para } M_P > (4,37 \pm 0,72) M_{\oplus}. \end{cases} \quad (3.14)$$

Assim podemos substituir a Equação 3.14 na Equação 3.13 para encontrar a pressão superficial do exoplaneta, supondo que este planeta possui uma atmosfera do tipo Terra ($P_{STipo-Terra}$):

$$P_{STipo-Terra} = \begin{cases} 0,86 \pm 0,03 \cdot R_P^{3,40 \pm 0,04} R_{\oplus} & \text{para } M_P < 4,37 M_{\oplus}; \\ 5,64 \pm 0,03 \cdot R_P^{-1,02 \pm 0,05} R_{\oplus} & \text{para } M_P > 4,37 M_{\oplus}. \end{cases} \quad (3.15)$$

3.2.2 Temperatura Superficial

Além da pressão superficial, também é possível estimar a temperatura superficial de um exoplaneta. Neste trabalho, utiliza-se a metodologia proposta por GARCIA (2016), combinada ao modelo climático radiativo-convectivo desenvolvido por KOPPARAPU *et al.* (2014). Assim como ocorre para a pressão superficial, não existe um método observacional direto para determinar a temperatura superficial de exoplanetas. Diferentes abordagens podem ser empregadas, JAGADEESH (2017) emprega uma regressão linear baseada em objetos do Sistema Solar para estabelecer uma relação entre a temperatura de equilíbrio e a temperatura superficial (Figura 3.3). Por outro lado, DEL GENIO *et al.* (2019) utiliza

simulações em um modelo de circulação global tridimensional (3D GCM) para investigar essa relação considerando diferentes condições atmosféricas (Figura 3.4).

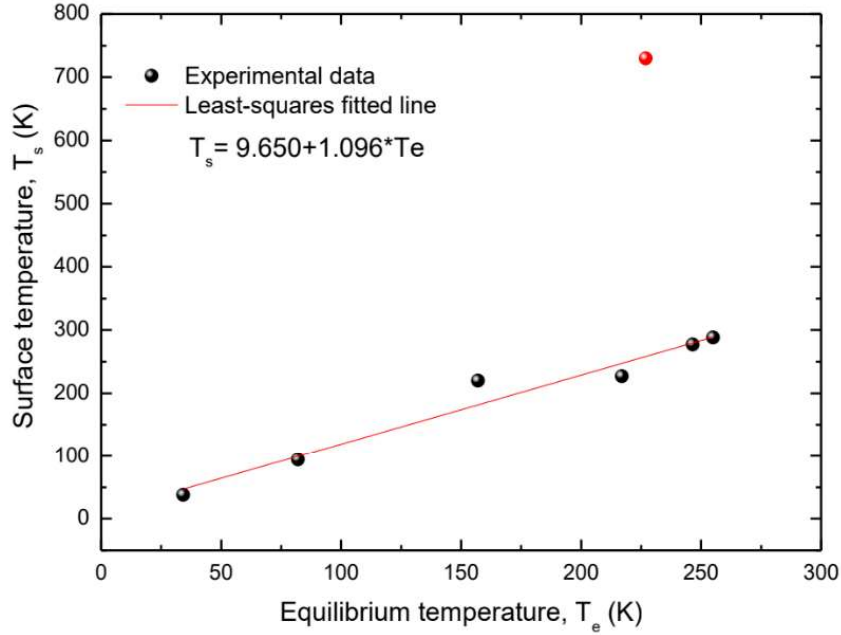


Figura 3.3: Diagrama da temperatura superficial T_s [K] pela temperatura de equilíbrio (T_e) [K] dos planetas do Sistema Solar (pontos pretos). A regressão linear é apresentada como uma linha vermelha. O ponto vermelho é Vênus, excluído da análise por não obedecer a relação linear. Figura extraída de JAGADEESH (2017).

A metodologia apresentada por GARCIA (2016) apresenta uma abordagem simplificada, porém adequada ao objetivo deste trabalho, ao estimar a temperatura superficial a partir dos limites da Zona Habitável (ZH) e da adoção de uma composição atmosférica pré-definida para o exoplaneta. A partir do fluxo estelar efetivo recebido pelo planeta (S_{eff}), é possível inferir o regime atmosférico mais provável, conforme discutido anteriormente. Como o cálculo de S_{eff} depende da temperatura superficial (T_s) obtida pelo ATMOS, essa temperatura pode ser estimada e posteriormente comparada à temperatura de equilíbrio planetária (T_{eq}).

Essa comparação permite avaliar a influência da atmosfera sobre o balanço energético planetário. A diferença entre T_s e T_{eq} representa o efeito do aquecimento atmosférico, principalmente associado à presença de gases de efeito estufa. Dessa forma, a estimativa da temperatura superficial fornece uma aproximação das condições climáticas esperadas para exoplanetas candidatos à análise de habitabilidade.

DEL GENIO *et al.* (2019) correlaciona a T_s com a T_{eq} , atribuindo a diferença entre as duas ao efeito estufa atmosférico (G_a):

$$T_s = T_{eq} + G_a \quad (3.16)$$

Esta relação permite validar o modelo com base no exemplo que temos da Terra. A

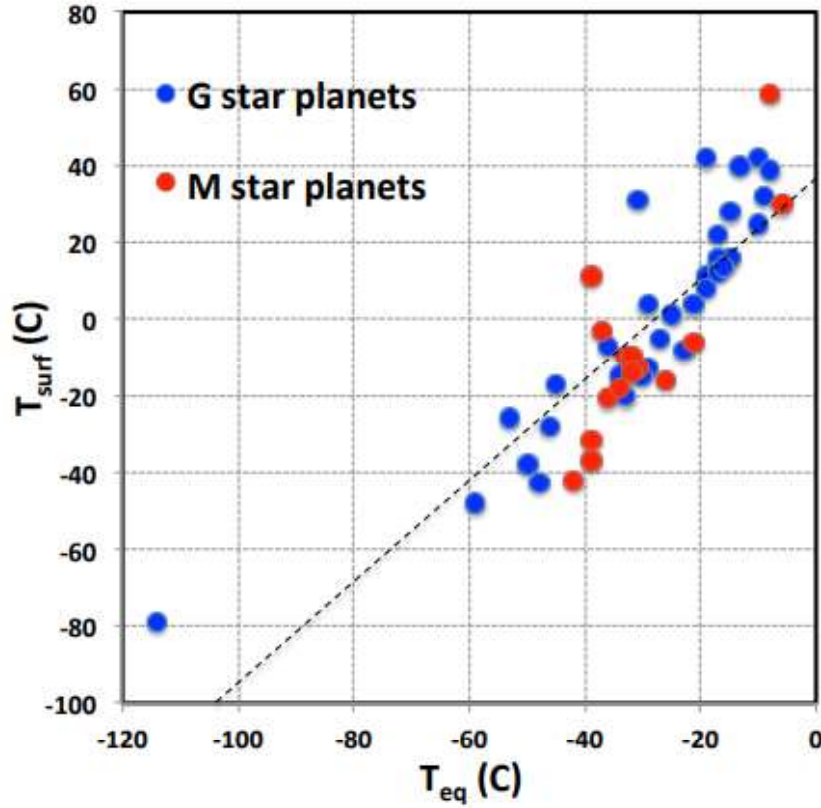


Figura 3.4: Diagrama da temperatura superficial, T_{surf} ($^{\circ}C$), pela temperatura de equilíbrio, T_{eq} ($^{\circ}C$), dos planetas orbitando estrelas do tipo G (pontos azuis) e estrelas do tipo M (pontos vermelhos). Linha pontilhada representa a regressão linear encontrada. Figura extraída de DEL GENIO *et al.* (2019).

metodologia utilizada nesta dissertação é um pouco mais restritiva que outros tipos de análise, porém permite com uma boa precisão estimar a temperatura superficial (como apresentado na próxima seção) e também requer um poder computacional menor. A estimativa da T_S obtida por esta análise será utilizada no cálculo do ESI_{T_S} , descrito na seção anterior.

Capítulo 4

Metodologia e Resultados

4.1 Introdução

Atualmente existem mais de 6000 exoplanetas confirmados. Na Tabela 4.1 pode-se observar os planetas detectados através das distintas técnicas (atualizado em 16/07/2026):

Técnica de detecção	Quantidade de Exoplanetas
Trânsito	4667
Velocidade Radial	1195
Outros Métodos	462

Tabela 4.1: Número de exoplanetas detectados até o momento por método de detecção até 16/07/2026. Dados extraídos de: exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html

Até o momento, a técnica de trânsito planetário forneceu a maior parte das identificações de exoplanetas. Nesta técnica, a missão mais sucedida em número de detecções até o momento é a missão espacial Kepler. Tendo em vista a grande quantidade de exoplanetas confirmados até o momento, é útil filtrar os planetas de interesse a este trabalho. Assim aplica-se uma filtragem sequencial, apresentada na Figura 4.1 onde (1) é a filtragem inicial realizada por códigos em Python desenvolvido pelo autor, (2) é a filtragem realizada pela Equação 2.7 de KOPPARAPU *et al.* (2014), (3) é a filtragem realizada por meio do código radiativo-convectivo de KASTING *et al.* (1993); KOPPARAPU *et al.* (2014), (4) é a filtragem realizada por meio da possível atmosfera planetária por meio da Equação 2.7 e por fim em (5) é realizada a estimativa da temperatura superficial (GARCIA, 2016). As etapas são descritas em maior detalhe nas seções seguintes, e também são apresentados os resultados para cada uma das filtrações, por fim foi encontrada uma amostra de planetas astrobiologicamente interessantes.

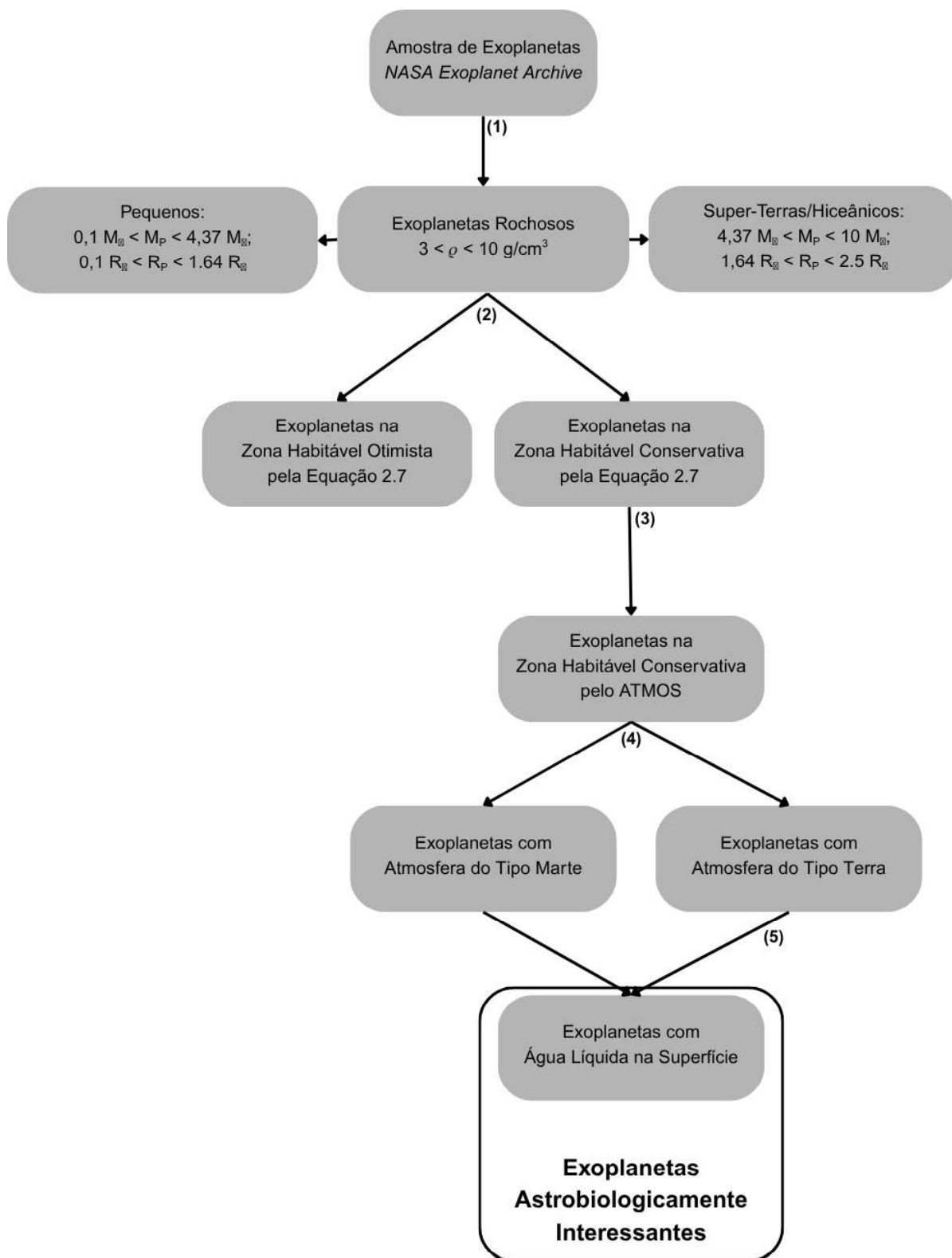


Figura 4.1: Diagrama representando as diferentes amostras encontradas na metodologia e resultados deste trabalho, cada seta numerada apresenta uma filtragem realizada a fim de refinar a amostra de exoplanetas astrobiologicamente interessantes.

4.2 Seleção da Amostra

Para a construção da amostra foi utilizado o banco de dados NASA Exoplanet Archive (NEA)¹. Um código Python de desenvolvimento do autor seleciona objetos com parâmetros físicos bem definidos, e utilizam-se relações empíricas para completeza dos parâmetros ausentes. Utiliza-se a referência padrão (*Default Parameter Set = 1*) caso disponível, caso contrário é realizado uma média das demais referências (*Default Parameter Set = 0*).

Caso o planeta tenha sido descoberto/confirmado por meio do método variação de velocidade radial, apenas sua massa (M_P) estará disponível no NEA (utiliza-se a massa mínima como a massa planetária, caso seja o único parâmetros disponível), logo utilizam-se as relações de MÜLLER *et al.* (2024):

$$\begin{aligned} R_P &= (1.02 \pm 0.03) M^{(0.27 \pm 0.04)} R_{\oplus} \text{ para } M_P \leq 4.37 M_{\oplus}; \\ R_P &= (0.56 \pm 0.03) M^{(0.67 \pm 0.05)} R_{\oplus} \text{ para } M_P > 4.37 M_{\oplus}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Caso o planeta tenha sido descoberto/confirmado por meio do método de trânsito planetário, apenas seu raio (R_P) estará disponível no NEA, logo utilizam-se as relações inversas de MÜLLER *et al.* (2024):

$$\begin{aligned} M_P &= (R_P/1,02 \pm 0.03)^{1/0,27 \pm 0.04} M_{\oplus} \text{ para } R_P \leq 1.64 R_{\oplus}; \\ M_P &= (R_P/0,56 \pm 0,03)^{1/0,67 \pm 0.05} M_{\oplus} \text{ para } R_P > 1.64 R_{\oplus}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde M_P em $[M_{\oplus}]$ e R_P em $[R_{\oplus}]$.

Caso o planeta tenha sido observado por ambos métodos, a densidade estará disponível diretamente, caso contrário são utilizadas relações de densidade de MÜLLER *et al.* (2024):

$$\begin{aligned} \rho_P &= 5,11 \pm 0,19 \cdot R_P^{0,73 \pm 0,15} \text{ para } R_P \leq 1.64 R_{\oplus}; \\ \rho_P &= 17,9 \pm 1,5 \cdot R_P^{-1,8 \pm 0,17} \text{ para } R_P > 1.64 R_{\oplus}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde ρ_P em $[\text{g}/\text{cm}^3]$.

Utiliza-se a terceira lei de Kepler para completar os valores de Período (P_P) e Semi-eixo Maior (a), caso um esteja disponível e o outro não:

¹Disponível em exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

$$\begin{aligned}
a_P &= \left(\mu \cdot \left(\frac{P_P}{365,25} \right)^2 \right)^{1/3}; \\
P_P &= \sqrt{a_P^3 / \mu \cdot 365,25}; \\
\text{onde } \mu &= M_\star + M_P,
\end{aligned} \tag{4.4}$$

onde P_P em [dias], a_P em [UA], $M_\star$ em [$M_\odot$], M_P em [$M_\star$] e μ em [$M_\odot$].

Caso o planeta possua o parâmetro de raio estelar ($R_\star$), temperatura estelar efetiva ($T_\star$) e albedo planetário (A) disponível no catálogo, pode-se estimar a temperatura de equilíbrio planetária (T_{eq}):

$$T_{eq} = T_\star \cdot \sqrt{R_\star / 2a_P} \cdot (1 - A)^{0,25}. \tag{4.5}$$

Caso o planeta tenha raio estelar ($R_\star$) disponível no catálogo mas o albedo planetário (A) não, utiliza-se o valor de $A = 0,3$ para o cálculo. Onde $R_\star$ em [m], a em [m] e $T_\star$ e T_{eq} em [K].

Caso esteja disponível a massa estelar $M_\star$ e o raio estelar $R_\star$ no catálogo, calcula-se a gravidade superficial estelar $g_\star$ que será utilizada no código radiativo convectivo:

$$g_\star = G \cdot M_\star / R_\star, \tag{4.6}$$

onde $g_\star$ em [g/cm^3], $G = 6,67430 \cdot 10^{-8}$ em [$\text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2$], $M_\star$ em [g], $R_\star$ em [cm].

Caso a luminosidade estelar $L_\star$ não esteja disponível no catálogo, ela é calculada pela lei de Stefan-Boltzmann, também a ser utilizada no código radiativo-convectivo:

$$L_\star = 4\pi R_\star^2 \sigma T_\star^4, \tag{4.7}$$

onde L em [W], $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ em [$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$], e $R_\star$ em [m], T em [K].

Nossos parâmetros finais são: nome do planeta, período orbital [dias], semi-eixo maior [UA], raio planetário [$R_\oplus$], massa planetária [$M_\oplus$], densidade planetária [g/cm^3], temperatura de equilíbrio planetário [K], temperatura efetiva da estrela hospedeira [K], metalicidade da estrela hospedeira [dex], gravidade superficial da estrela hospedeira [dex], luminosidade da estrela hospedeira [$L_\odot$].

Os cerca de 6000 exoplanetas foram filtrados inicialmente naqueles que estavam dentro do critério de Exoplanetas Rochosos ($3 < \rho < 10 \text{ g}/\text{cm}^3$). Os exoplanetas foram subdivididos em Rochosos Pequenos ou Super-Terras/Hiceânicos (MADHUSUDHAN *et al.*, 2023; MÜLLER *et al.*, 2024; SEAGER *et al.*, 2007):

- Exoplanetas Rochosos Pequenos:

$$0,1M_\oplus < M_P < 4,37M_\oplus \text{ ou } 0,1R_\oplus < R_P < 1,64R_\oplus;$$

- Exoplanetas Rochosos Super-Terras/Hiceânicos:

$$4,37M_{\oplus} < M_P < 10M_{\oplus} \text{ ou } 1,64R_{\oplus} < R_P < 2,5R_{\oplus}.$$

As amostras de exoplanetas rochosos pequenos possui 1447 exoplanetas, enquanto são 1161 exoplanetas rochosos super-Terras/hiceânicos. Representados no diagrama Massa-Raio na Figura 4.2.

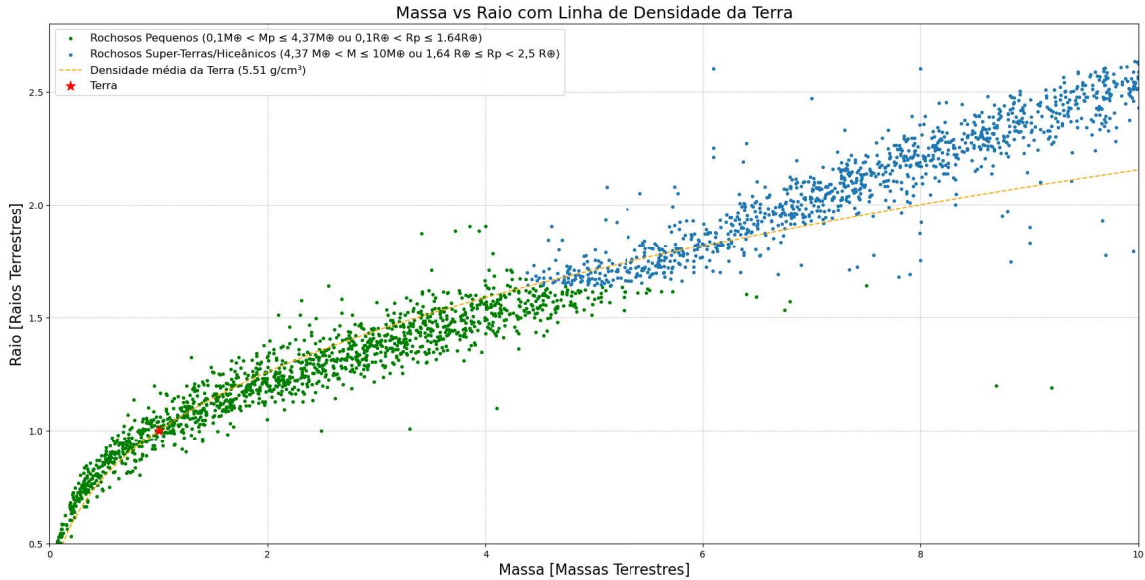


Figura 4.2: Relação de Massa por Raio dos planetas rochosos da amostra, os planetas em verde são os Rochosos Pequenos e em azul são as Super-Terras/Hiceânicos. A linha tracejada laranja é a densidade média da Terra ($5,51 \text{ g/cm}^3$) Fonte: autoria própria.

Os critérios de seleção das amostras levam em conta uma estimativa mais conservadora, de que as condições para habitabilidade só são encontradas em planetas rochosos pequenos (MÜLLER *et al.*, 2024; SEAGER *et al.*, 2007). E também se utiliza da hipótese mais otimista que condições de habitabilidade podem ser encontradas em planetas maiores ditos super-Terras ou planetas hiceânicos (MADHUSUDHAN *et al.*, 2023; SEAGER *et al.*, 2007).

Após esta filtragem inicial, utiliza-se a Equação 2.7 em conjunto com os coeficientes da Tabela 2.3 e a Equação 1.28, assim podemos encontrar os limites da ZH para cada uma das estrelas hospedeiras destes exoplanetas. Assim os exoplanetas rochosos podem ser divididos em duas sub-amostras:

- Zona Habitável Conservadora (ZHC): exoplanetas rochosos no limite entre *Runaway Greenhouse* e *Maximum Greenhouse*;
- Zona Habitável Otimista (ZHO): exoplanetas rochosos no limite entre *Recent Venus* e *Early Mars*.

Estas duas ZHs foram discutidas anteriormente, a conservadora utiliza dados extraídos do código radiativo-convectivo (ATMOS), enquanto a otimista leva em consideração suposições observacionais (descritas em detalhe no Capítulo 2.2). Neste trabalho é considerado habitabilidade em ambas ZHs como possível. Assim o número de exoplanetas rochosos na ZH de suas estrelas hospedeiras é melhor representado na Tabela 4.2 ou também na Figura 4.3:

	Exoplanetas Rochosos Pequenos	Exoplanetas Rochosos Super-Terras/Hiceânicos
Total da Amostra	1447	1161
Dentro da ZHO	44	31
Dentro da ZHC	26	14

Tabela 4.2: Amostras de exoplanetas rochosos com o total de exoplanetas de cada amostra dentro de cada limite da ZH, otimista ou conservadora.

A totalidade dos parâmetros das estrelas hospedeiras de exoplanetas da amostra pode ser encontrada no Apêndice B. A totalidade dos parâmetros dos exoplanetas de cada uma das amostras pode ser encontrada no Apêndice A.

Na Tabela B.1 podemos notar que as temperaturas das estrelas (T_{eff}) que contém planetas dentro da ZH, variam de 2566 a 5757 K, sendo estas estrelas de tipo espectral M, K, G e F na sequência principal. O $\log g$ varia entre 4,15 e 5,26 e a metalicidade entre -0,55 e 0,21. Na Tabela A.1 pode-se notar também que os raios planetários variam de 0,78 a 2,49 $R_{\oplus}$, e a massa entre 0,38 e 9,49 $M_{\oplus}$, ou seja, podem ser menores e menos massivos como também maiores e mais massivos que a Terra. As órbitas possuem semi-eixo maior entre 0,02 e 1,35 UA , assim também há uma variedade de distâncias orbitais, com tanto planetas mais distantes quanto mais próximos que a Terra do Sol.

Dentro da amostra existem ainda sistemas com mais de um planeta na ZH de sua estrela hospedeira, como os sistemas GJ 667 C com 3 planetas na ZH de sua estrela hospedeira (Figura ??) (ANGLADA-ESCUDE *et al.*, 2013) e o sistema Trappist-1 com 4 planetas em sua ZH (Figura ??) (GILLON *et al.*, 2017).

4.3 Cálculo da zona de habitabilidade

Preliminarmente utilizou-se a Equação 2.7 para cada uma das estrelas hospedeiras, usando os coeficientes da Tabela 2.3 de acordo com a massa do planeta de interesse (estrelas com múltiplos planetas com distintas massas são avaliados mais de uma vez com distintos parâmetros), assim foram obtidas as figuras da seção anterior.

Por seguinte, afim de refinar a amostra utiliza-se o código radiativo-convectivo de KOPPARAPU *et al.* (2014) (referido a partir daqui como ATMOS) para estes planetas

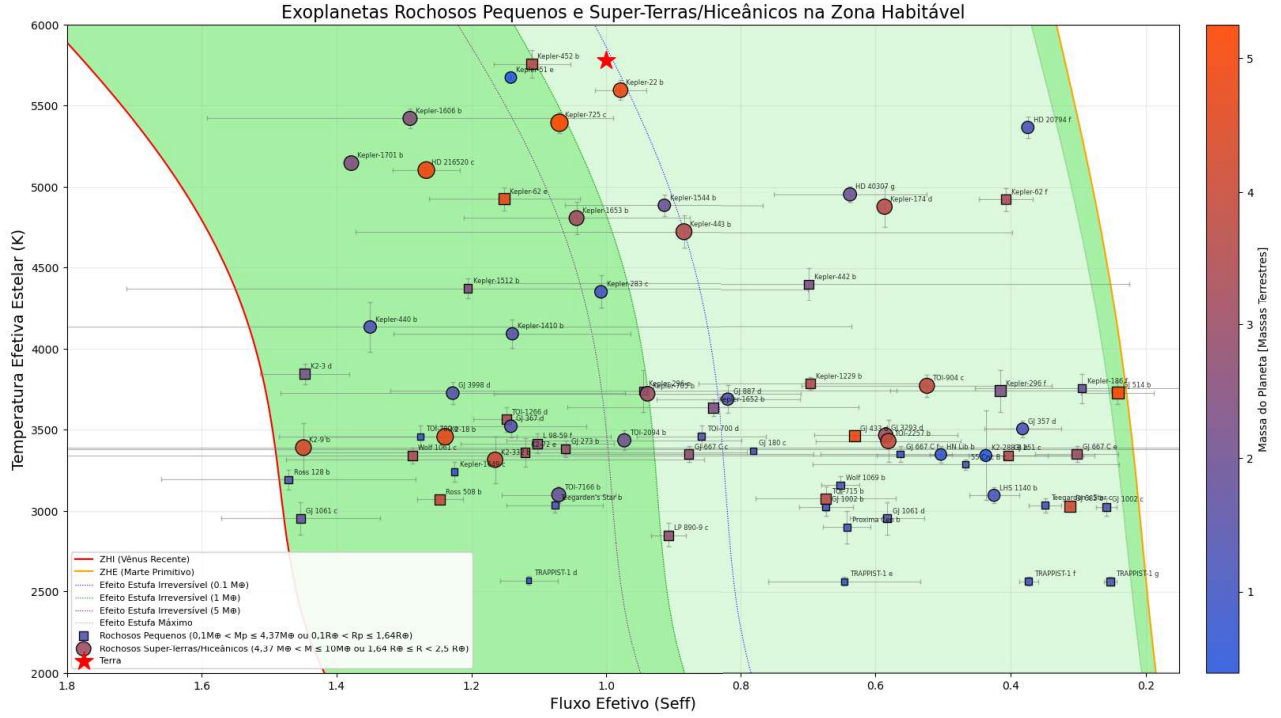


Figura 4.3: Diagrama de fluxo efetivo (S_{eff}) por temperatura efetiva estelar [K], considerando exoplanetas rochosos dentro da ZH da sua estrela hospedeira. As linhas cheias delimitam a Zona Habitável Otimista (sombreada verde+verde-claro), de Vênus Recente (vermelho) à Marte Primitivo (laranja). As linhas pontilhadas delimitam a Zona Habitável Conservadora (sombreada verde-claro), do Efeito Estufa Irreversível ($0,1 M_{\oplus}$ (azul), $1 M_{\oplus}$ (verde), $5 M_{\oplus}$ (roxo)) à Efeito Estufa Máximo (cinza). No diagrama os quadrados representam os planetas rochosos pequenos e os círculos representam as super-Terras/hiceânicos. O tamanho do ponto é relativo ao raio planetário e a escala de cor (azul para vermelho) é relativo à massa planetária. A Terra é representada por uma estrela vermelha. Fonte: autoria própria.

na ZHC², calcula-se a ZH para cada uma das estrelas hospedeiras e avalia-se se seus exoplanetas estarão dentro da ZHC, de acordo suas distâncias orbitais. Calcula-se o fluxo efetivo S_{eff} no topo da atmosfera por meio da Equação 2.6, a partir dos valores de F_{SOL} e F_{IR} fornecidos pelo código. Identificamos então os limites de *Runaway Greenhouse* e *Maximum Greenhouse* por meio da Equação 1.28.

Nas subseções seguintes são apresentados os parâmetros de entrada do ATMOS e como foram avaliadas as estrelas hospedeiras, assim como os cálculos realizados e resultados obtidos.

²O ATMOS permite somente a avaliação da ZH com limites referentes a ZH Conservadora (ZHC), uma vez que estes são os únicos limites calculáveis por respostas atmosféricas. A ZH Otimista tem limites sustentado em hipóteses do Sistema Solar, não calculáveis pelo modelo.

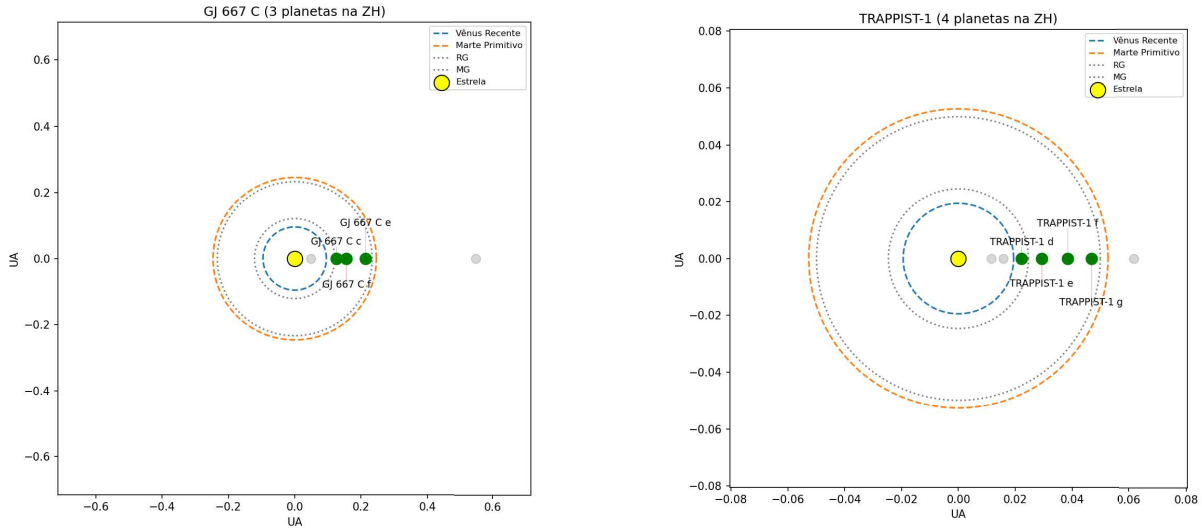


Figura 4.4: Diagramas distância [UA] por distância [UA] de sistemas com múltiplos planetas na ZH de sua estrela hospedeira, o sistema GJ 667 C à esquerda e o sistema Trappist-1 à direita. As linhas tracejadas delimitam a Zona Habitável Otimista, de Vênus Recente (azul) à Marte Primitivo (laranja). As linhas pontilhadas delimitam a Zona Habitável Conservadora, do Efeito Estufa Irreversível (cinza claro) ao Efeito Estufa Máximo (cinza escuro). A estrela é representada por um círculo amarelo, planetas do sistema dentro da zona habitável são círculos verdes e planetas do sistema fora da zona habitável são círculos cinzas. Fonte: autoria própria.

4.3.1 Parâmetros de entrada e saída do ATMOS

O código ATMOS tem os seguintes parâmetros de entrada:

- NSTEPS: Número de iterações do código ATMOS;
- RSURF: Umidade da superfície;
- P0: Pressão no topo da atmosfera;
- PN2: Pressão parcial de Nitrogênio;
- PCO2: Pressão parcial do Dióxido de Carbono;
- G: Gravidade superficial do planeta;
- RADIUS: Raio do planeta;
- TG0: Temperatura superficial do planeta;
- TSTRAT: Temperatura estratosférica do planeta;
- STARR: Estrela Hospedeira do planeta a ser modelada.

- SRFALB: Albedo Superficial do planeta;

Pode-se também alterar a composição química da atmosfera do planeta. O ATMOS considera as seguintes moléculas e elementos químicos: Argônio (Ar), Dióxido de Carbono (CO_2), Dióxido de Nitrogênio (NO_2), Etano (C_2H_6), Hidrogênio Molecular (H_2), Nitrogênio Molecular (N_2), Oxigênio Molecular (O_2).

Após cada iteração do modelo são realizados os cálculos de conservação energética, fluxos radiativos e transferência de temperatura (descritos no Capítulo 2.1). Como parâmetros de saída temos: altitude, temperatura, pressão, F_{SOL} e F_{IR} , fração de H_2O e CO_2 em cada uma das 101 camadas que subdividem a atmosfera.

Para cálculo dos resultados do presente trabalho foi utilizado o código ATMOS na configuração "reversa", aplicando somente uma iteração (NSTEPS = 1), seguindo a metodologia de KASTING (1988). A RSURF foi fixada em 0,8 (80% de umidade na atmosfera), a P0 foi fixada em 10^{-5} bar, o SRALB foi fixado em 0,32. Todos estes parâmetros fixados são os mesmo usados por KASTING *et al.* (1993) e também por KOPPARAPU *et al.* (2013).

Os parâmetros de RADIUS e G foram fixados em 6378 [km] e 980 [cm/s²] (valores nominais para um planeta de 1 $R_{\oplus}$ e 1 $M_{\oplus}$). Assim como parâmetros livres de entrada do modelo são: TSURF, TSTRAT, PN2 e PCO2, e a STARR é definida conforme a estrela hospedeira a ser modelada.

Estrela Hospedeira do planeta (STARR)

O ATMOS permite utilizar diferentes estrelas da sequência principal de tipo espectral entre M a F, permitindo a escolha por combinação de parâmetros de até 292 estrelas distintas³. A STARR consiste em um código com 5 entradas subdivido em 3 partes: XYYZZ, onde X é a metalicidade [Fe/H], YY refere-se ao $\log g$ e ZZ refere-se à T_{eff} .

- A metalicidade (X) pode ser A, B ou C, referindo-se a [Fe/H] = -0,5, 0,0 ou 0,5 dex respectivamente.
- O $\log g$ (YY) é um valor que vai de 30 a 50 em passos de 5, referindo-se a $\log g = 3,0$ à $5,0$ em passos de 0,5.
- A T_{eff} (ZZ) é um valor que vai de 26 a 72 em passos de 2, referindo-se a T_{eff} de 2600 a 7200 K em passos de 200 K.

Para a escolha da STARR apropriada para cada estrela hospedeira dos exoplanetas da amostra, foi utilizada a STARR com parâmetros mais similares por proximidade.

³Na realidade são 364 estrelas possíveis, onde 72 não funcionam corretamente (A30ZZ, A35ZZ, A50ZZ).

Pressão parcial dos gases N_2 e CO_2

Para a determinação dos limites da ZH são alteradas as pressões parciais de N_2 e CO_2 , pN_2 e pCO_2 respectivamente. A pressão parcial se refere a pressão exercida pelo gás como componente único no volume.

Para o cálculo da ZHI a pN_2 é fixada em 1 e pCO_2 é desprezada devido ao baixo conteúdo em uma atmosfera do tipo Terra em comparação com a atmosfera do tipo Marte. Esse parâmetro é importante para o cálculo da ZHE, variando a pCO_2 de 1 a 35 bar. Para a pN_2 é adotada a relação de $pN_2 = 0,027 \cdot pCO_2$ de forma a manter proporcionalmente a mesma quantidade de N_2 na atmosfera do planeta.

Cálculo do limite interno da ZH (ZHI)

Para determinação da ZHI dos exoplanetas da amostra utiliza-se uma atmosfera do tipo Terra, considerando a composição química: 78% de N_2 , 21% de O_2 , 9340 ppm de Ar e 300 ppm de CO_2 , os outros gases do modelo são desprezados. A TSTRAT é de 200 K e TSURF varia de 220 K a 1600 K.

Obteve-se resultados para todas as estrelas da Tabela B.1, e foi identificado o S_{eff} e d_{ZH} do *Runaway Greenhouse*, analisando o comportamento do F_{IR} e do S_{eff} com relação a TSURF. O efeito estufa Irreversível ocorre quando o fluxo infravermelho reemitido fica constante com relação a temperatura superficial, indicando que a energia irradiada é dominada pela alta atmosfera devido ao vapor d'água saturar a baixa atmosfera.

Cálculo do limite externo da ZH (ZHE)

Para determinação da ZHE dos exoplanetas da amostra utiliza-se uma atmosfera do tipo Marte, considerando a composição química: 95% de CO_2 , 2,7% de N_2 , 1,6% e 0,13% de O_2 e os outros gases do modelo são desprezados. A TSTRAT é fixada em 160K e a TSURF em 273 K. Variando a pCO_2 entre 1 a 35 bar em passos de 1 bar (e pN_2 relativamente).

Aumentando a pCO_2 na atmosfera, fisicamente está aumentando a quantidade de moléculas de CO_2 , logo para manter a composição química inicial, recalcula a pN_2 a cada passo usando a relação $pN_2 = 0,027 \cdot pCO_2$.

Obteve-se resultados para todas as estrelas da Tabela B.1, e foi identificado o S_{eff} e d_{ZH} do *Maximum Greenhouse*, analisando o comportamento do F_{IR} e do S_{eff} com relação à pCO_2 . O efeito estufa máximo ocorre quando o fluxo infravermelho reemitido atinge o valor mínimo com relação à pressão parcial de CO_2 , indicando que a atmosfera se tornou opaca no infravermelho, a radiação infravermelho é absorvida pela atmosfera.

4.3.2 Resultados para Zona Habitável pela Equação 2.7

Os resultados para todos os exoplanetas dentro da Zona Habitável de suas estrelas são apresentados no Apêndice C e D. Abaixo apresenta-se um sumário dos resultados.

Para exoplanetas rochosos pequenos, em sua maioria encontram-se concentrados em estrelas com T_{eff} entre 2600 e 3800 K (Figura 4.5). Essa concentração parece também estar associada ao viés de observação pelos métodos e limites atuais. Dos 1447 exoplanetas, 44 estão na ZH Otimista de sua estrela hospedeira, e 26 encontram-se na ZH Conservadora. Destes 44 exoplanetas, 9 apresentam barras de erro no fluxo efetivo (devido a propagação do erro no semi-eixo maior e luminosidade da estrela hospedeira), que são capazes de excluir o exoplaneta da ZH (GJ 1061 c, GJ 273 b, GJ 514 b, Kepler 1512 b, Kepler 186 f, Kepler 296 f, Kepler 442 b, Ross 128 b, Wolf 1061 c) (ver Figura 4.5).

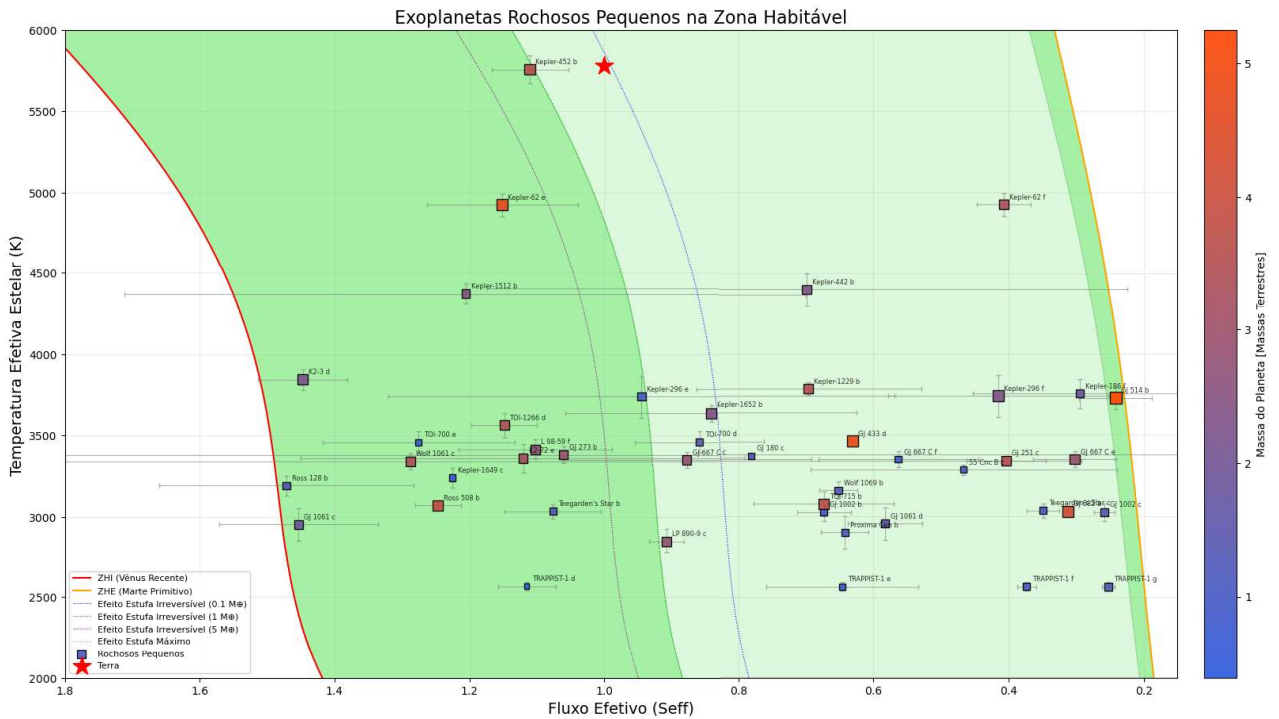


Figura 4.5: Diagrama de fluxo efetivo (S_{eff}) por temperatura efetiva estelar [K], considerando exoplanetas rochosos pequenos dentro da ZH da sua estrela hospedeira. As linhas cheias delimitam a Zona Habitável Otimista (sombreada verde+verde-claro), de Vênus Recente (vermelho) à Marte Primitivo (laranja). As linhas pontilhadas delimitam a Zona Habitável Conservadora (sombreada verde-claro), do Efeito Estufa Irreversível (0,1 $M_{\oplus}$ (azul), 1 $M_{\oplus}$ (verde), 5 $M_{\oplus}$ (roxo)) à Efeito Estufa Máximo (cinza). No diagrama os quadrados representam os planetas rochosos pequenos. O tamanho do ponto é relativo ao raio planetário e a escala de cor (azul para vermelho) é relativo à massa planetária. A Terra é representada por uma estrela vermelha.

Para super-Terras/hiceânicos, em sua maioria encontram-se concentrados em estrelas hospedeiras com T_{eff} entre 3000 e 4200 K (Figura 4.6). Essa concentração parece também estar associada ao viés de observação pelos métodos e limites atuais. Dos 1161 exoplanetas,

31 estão na ZH de sua estrela hospedeira, e 14 encontram-se na ZH Conservadora. Destes 41 exoplanetas, 2 apresentam barras de erro no fluxo efetivo, que são capazes de excluir o exoplaneta da ZH (K2-9 c, Kepler 440 b) (ver Figura 4.6).

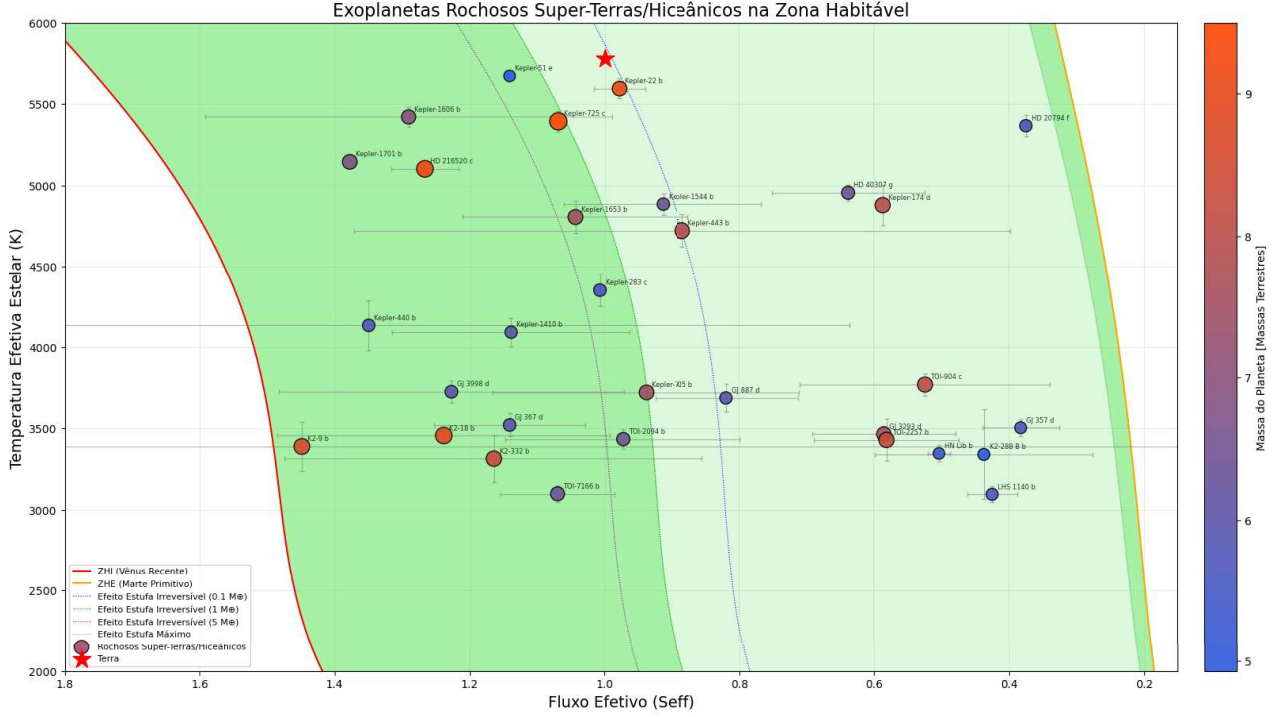


Figura 4.6: Diagrama de fluxo efetivo (S_{eff}) por temperatura efetiva estelar [K], considerando super-Terras/hicêânicos dentro da ZH da sua estrela hospedeira. As linhas cheias delimitam a Zona Habitável Otimista (sombreada verde+verde-claro), de Vênus Recente (vermelho) à Marte Primitivo (laranja). As linhas pontilhadas delimitam a Zona Habitável Conservadora (sombreada verde-claro), do Efeito Estufa Irreversível ($0.1 M_{\oplus}$ (azul), $1 M_{\oplus}$ (verde), $5 M_{\oplus}$ (roxo)) à Efeito Estufa Máximo (cinza). No diagrama os círculos representam as super-Terras/hicêânicos. O tamanho do ponto é relativo ao raio planetário e a escala de cor (azul para vermelho) é relativo à massa planetária. A Terra é representada por uma estrela vermelha.

4.3.3 Resultados para Zona Habitável pelo ATMOS

Após a análise do ATMOS (disponível no Apêndice D) a ZH Conservadora de todas as estrelas hospedeiras apresentou um refinamento. Por conta do ATMOS utilizar além da T_{eff} , também $\log g$ e metalicidade das estrelas, a ZH Conservadora é refinada (e para todas as estrelas da amostra a ZH Conservadora diminui de extensão, ou seja, o limite interno da ZH se afasta e o limite externo da ZH se aproxima da estrela hospedeira).

Apenas um exoplaneta, da amostra de rochosos pequenos dentro da ZHC, não está dentro da ZH Conservadora pela análise do ATMOS. LP 890-9 c ($a = 0,0398 \text{ UA}$) que estava bem próximo ao limite interno da ZH Conservadora pela Equação 2.7 ($ZHI =$

0.0396 UA). Após análise do ATMOS o limite interno foi movido externamente para ($ZHI = 0,0408$ UA). Abaixo uma representação da órbita planetária com os limites (Figura 4.7).

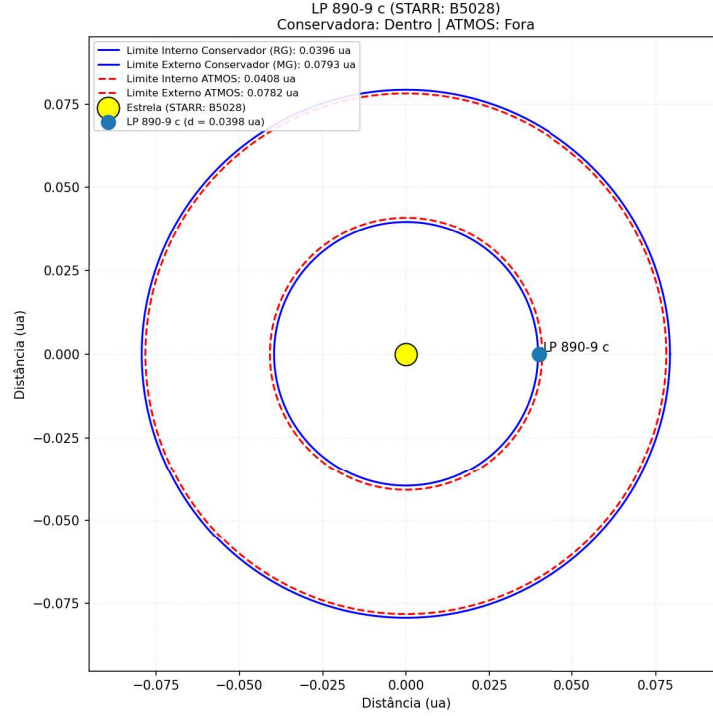


Figura 4.7: Diagrama distância [UA] por distância [UA] do exoplaneta LP 890-9 c. As linhas cheias azuis delimitam a ZH Conservadora pela Equação 2.7 e as linhas tracejadas vermelhas delimitam a ZH Conservadora pelo ATMOS.

4.4 Temperatura Superficial e Pressão Superficial

Como já descrito anteriormente, o código ATMOS permite trabalhar com dois tipos de atmosferas para o cálculo da ZH, do tipo Terra e Marte, para ZHI e ZHE respectivamente. Para uma atmosfera do tipo Terra, o código realiza um cálculo a partir da variação da temperatura superficial do planeta, calculando assim o S_{eff} .

Através dos resultados obtidos, estima-se o tipo de atmosfera que o planeta poderia ter, a depender da posição do exoplaneta dentro da ZH. Cada valor de S_{eff} é ligado a uma temperatura superficial. Assim é possível estimar a temperatura superficial com base na posição do exoplaneta dentro da ZH Conservadora de sua estrela hospedeira. A posição mais próxima do limite interno da ZH Conservadora, confere ao exoplaneta uma temperatura superficial próxima da 1800 K e o ponto mais distante do limite interno da ZH Conservadora (ainda com atmosfera tipo Terra) confere ao exoplaneta uma temperatura superficial próxima de 220 K. Caso o exoplaneta se encontre próximo ao limite exterior da ZH Conservadora, confere ao exoplaneta uma temperatura superficial de 273 K.

Foi realizada a estimativa de Temperatura e Pressão Superficial para os 39 exoplanetas que estão na ZH Conservadora pelo ATMOS. Com estes dois parâmetros conseguimos pelo diagrama de fase estimar o estado físico da água na superfície do planeta. Os resultados, de ambos rochosos pequenos e super-Terras/hiceânicos na ZH Conservadora pelo ATMOS, são apresentados na Tabela 4.3. É importante notar que há uma região de degenerescência (próximo ao ponto médio entre os limites da ZH), onde a atmosfera pode ser tanto do Tipo Terra quanto do Tipo Marte, por esse motivo, alguns exoplanetas possuem atmosfera ambígua.

Planeta	Pressão Superficial [bar]	Temperatura Superficial [K]	Atmosfera Análoga	Fase da Água
55 Cnc B c	$0,62 \pm 1,13$	$256,0 \pm 20,0$	Terra/Marte	Gelo
GJ 1002 b	$0,95 \pm 0,41$	$290,0 \pm 30,0$	Terra	Líquida
GJ 1002 c	$1,12 \pm 0,61$	$273,0 \pm 0,0$	Marte	Gelo
GJ 1061 d	$1,35 \pm 0,72$	$261,5 \pm 30,0$	Terra/Marte	Gelo
GJ 180 c	$0,78 \pm 0,85$	$280,0 \pm 20,0$	Terra	Líquida
GJ 251 c	$2,69 \pm 1,69$	$251,5 \pm 10,0$	Terra/Marte	Gelo
GJ 3293 d	$2,72 \pm 0,63$	$250,0 \pm 20,0$	Terra	Gelo
GJ 357 d	$3,33 \pm 0,71$	$251,5 \pm 10,0$	Terra/Marte	Gelo
GJ 433 d	$3,64 \pm 0,70$	$280,0 \pm 30,0$	Terra	Líquida
GJ 667 C c	$1,99 \pm 1,49$	$270,0 \pm 10,0$	Terra	Gelo
GJ 667 C e	$2,80 \pm 2,61$	$273,0 \pm 0,0$	Marte	Gelo
GJ 667 C f	$0,84 \pm 0,80$	$256,5 \pm 20,0$	Terra/Marte	Gelo
GJ 682 b	$3,99 \pm 3,73$	$256,5 \pm 10,0$	Terra/Marte	Gelo
GJ 887 d	$3,19 \pm 0,76$	$270,0 \pm 10,0$	Terra	Gelo
HD 20794 f	$3,18 \pm 0,57$	$273,0 \pm 0,0$	Marte	Gelo
HD 40307 g	$3,00 \pm 0,93$	$260,0 \pm 20,0$	Terra	Gelo
HN Lib b	$3,41 \pm 0,72$	$256,5 \pm 20,0$	Terra/Marte	Gelo
K2-288 B b	$3,29 \pm 0,61$	$251,5 \pm 10,0$	Terra/Marte	Gelo
Kepler-1229 b	$2,72 \pm 0,74$	$260,0 \pm 20,0$	Terra	Gelo
Kepler-1544 b	$3,16 \pm 0,13$	$270,0 \pm 10,0$	Terra	Gelo
Kepler-1652 b	$3,22 \pm 1,28$	$290,0 \pm 10,0$	Terra	Líquida
Kepler-174 d	$2,58 \pm 0,14$	$250,0 \pm 10,0$	Terra	Gelo
Kepler-186 f	$1,44 \pm 0,32$	$273,0 \pm 0,0$	Marte	Gelo
Kepler-22 b	$2,68 \pm 0,15$	$300,0 \pm 20,0$	Terra	Líquida
Kepler-296 f	$4,10 \pm 3,73$	$251,5 \pm 10,0$	Terra/Marte	Gelo
Kepler-442 b	$2,12 \pm 0,79$	$280,0 \pm 20,0$	Terra	Líquida
Kepler-443 b	$2,45 \pm 0,21$	$290,0 \pm 10,0$	Terra	Líquida
Kepler-62 f	$2,80 \pm 0,44$	$273,0 \pm 0,0$	Marte	Gelo
LHS 1140 b	$3,27 \pm 0,04$	$251,5 \pm 10,0$	Terra/Marte	Gelo
Proxima Cen b	$0,84 \pm 0,48$	$270,0 \pm 30,0$	Terra	Gelo
TOI-2257 b	$2,56 \pm 0,13$	$260,0 \pm 20,0$	Terra	Gelo
TOI-700 d	$1,10 \pm 0,19$	$290,0 \pm 10,0$	Terra	Líquida
TOI-715 b	$3,77 \pm 0,53$	$270,0 \pm 30,0$	Terra	Gelo
TOI-904 c	$2,59 \pm 0,14$	$256,5 \pm 20,0$	Terra/Marte	Gelo
TRAPPIST-1 e	$0,65 \pm 0,03$	$270,0 \pm 10,0$	Terra	Gelo
TRAPPIST-1 f	$1,01 \pm 0,041$	$251,5 \pm 10,0$	Terra/Marte	Gelo
TRAPPIST-1 g	$1,32 \pm 0,05$	$273,0 \pm 0,0$	Marte	Gelo
Teegarden's Star c	$0,86 \pm 0,44$	$251,5 \pm 10,0$	Terra/Marte	Gelo
Wolf 1069 b	$1,23 \pm 0,57$	$250,0 \pm 20,0$	Terra	Gelo

Tabela 4.3: Tabela dos planetas rochosos na ZH Conservadora pelo ATMOS com a estimativa de pressão e temperatura superficial, atmosfera análoga esperada pela distância orbital e a fase da água superficial estimada.

Para os 39 exoplanetas analisados temos uma grande maioria (33) dos exoplanetas com uma atmosfera possível do tipo Terra. Dentre estes são 8 os planetas com a possibilidade de água líquida em sua superfície: GJ 1002 b, GJ 180 c, GJ 433 d, Kepler-1652 b, Kepler-22 b, Kepler-442 b, Kepler-443 b, TOI-700 d.

Para validar a análise, uma relação foi utilizada para estimar o efeito estufa na atmosfera do tipo Terra (DEL GENIO *et al.*, 2019). A relação utilizada compara a temperatura de equilíbrio planetária (T_{eq}) [K] com a temperatura superficial (T_S) [K] com uma fator de correção para o efeito estufa (G_a) [K]:

$$T_S = T_{eq} + G_a \quad (4.8)$$

Realiza-se um ajuste linear entre os valores de T_S obtidos na Tabela 4.3 com os planetas que possuem T_{eq} (29 exoplanetas), encontramos a seguinte relação:

$$T_S = (0,3636 \pm 0,1782) \cdot T_{eq} + (175,28 \pm 43,66) \quad (4.9)$$

O coeficiente de determinação da regressão é $r^2 = 0,6271$. Essa relação apresenta um efeito estufa do tipo Terra com valor médio de $G_a = 18,98 \pm 11,40$ K e intervalo de variação entre [-1,57 K, 37,13 K]. Os resultados do ajuste linear são apresentados na Figura 4.8.

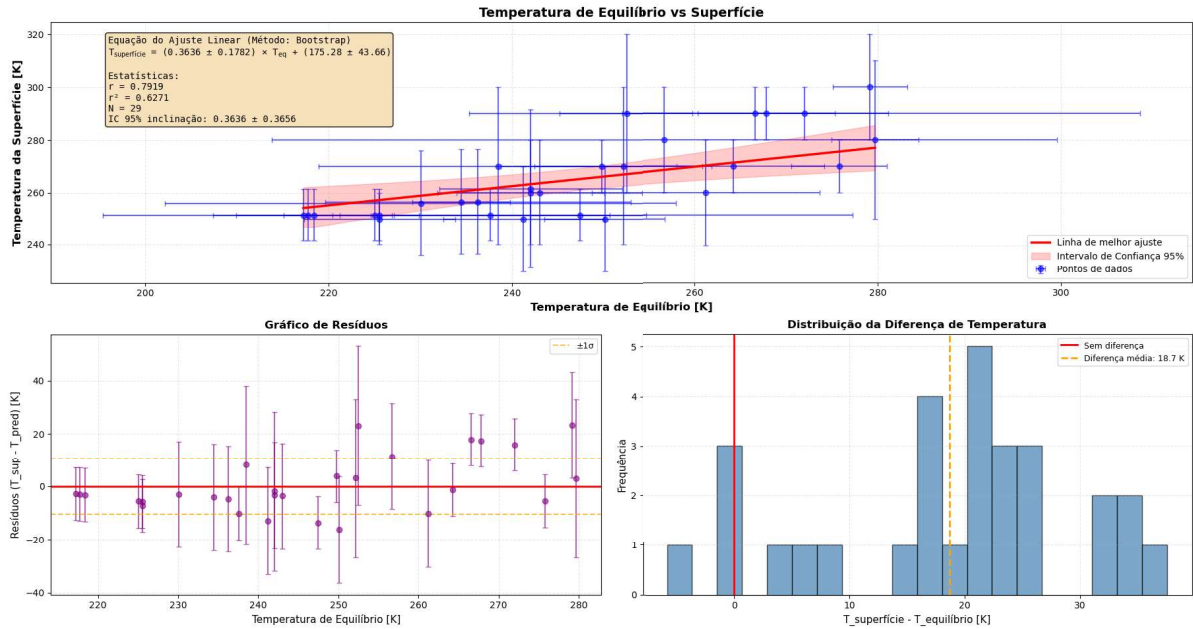


Figura 4.8: Ajuste linear relacionando a temperatura de equilíbrio e temperatura superficial na amostra de exoplanetas na ZH Conservadora pelo ATMOS com atmosfera análoga à Terra. O painel superior apresenta o diagrama de temperatura de equilíbrio [K] por temperatura superficial [K], com o ajuste linear (linha vermelha) e região de intervalo de 95% (região sombreada em vermelho). O painel inferior esquerdo apresenta os resíduos. O painel inferior direito apresenta a distribuição da diferença entre temperatura superficial pela temperatura de equilíbrio por frequência.

Os valores apresentados mostram grande variação por conta da temperatura superficial estar associada unicamente a distância orbital, de acordo com os gráficos apresentados no Apêndice D. Além disso, vale ressaltar que o valor de efeito estufa conferido a atmosfera na Terra é de $G_a^E \approx 33K$. A discrepância pode estar associada ao método tanto quanto ao número de exoplanetas utilizados. É necessário um estudo com modelos tri-dimensionais para obter uma precisão maior.

4.5 Cálculo do *Earth Similarity Index* (ESI)

Diante dos cálculos de temperatura superficial, pode-se então ordenar os exoplanetas na ZH Conservadora, com base na similaridade deles com a Terra (SCHULZE-MAKUCH *et al.*, 2011). Os resultados estão dispostos na Tabela 4.4 para todos os 33 planetas (com atmosfera tipo Terra).

Podemos notar que 24 dos 33 exoplanetas possuem um $ESI > 0,8$, o limiar para o planeta ser considerado de muito alta similaridade com a Terra. Nenhum planeta chega a estar abaixo do limiar de alta similaridade com a Terra ($ESI < 0,6$). Dentre eles o planeta com maior similaridade é GJ 1002 b. Na Figura 4.9 pode-se observar mais nitidamente o quão similar este planeta é com a Terra em relação aos outros da amostra.

Dos quatro parâmetros para se encontrar o ESI, somente o raio é um parâmetro diretamente observável, enquanto os outros três são calculados. O projeto PHL (iniciativa de catalogação de planetas potencialmente habitáveis da UPR-Arecibo), identifica que o ESI superficial domina sobre o ESI interior, uma vez que o expoente peso da temperatura superficial é proporcionalmente maior.

Para avaliação da habitabilidade é necessário que todos os parâmetros sejam considerados em conjunto. Porém com os parâmetros do interior, já é possível ter uma ideia da possibilidade do planeta ser rochoso.

Não está no âmbito deste trabalho, porém para trabalhos futuros, é interessante também utilizar o parâmetro de habitabilidade (PHI) apresentado por SCHULZE-MAKUCH *et al.* (2011), utilizando as moléculas e gases presentes na atmosfera. Com mais informações sobre os exoplanetas esse parâmetro pode ser mais um indicador de possibilidade de habitabilidade.

Planeta	ESI_r	ESI_ρ	ESI_{T_s}	$ESI_{v_{esc}}$	$ESI_{Interior}$	$ESI_{Superficial}$	ESI
GJ 1002 b	$0,993 \pm 0,037$	$0,971 \pm 0,338$	$0,981 \pm 0,284$	$0,997 \pm 0,030$	$0,982 \pm 0,172$	$0,989 \pm 0,144$	$0,985 \pm 0,112$
TOI-700 d	$0,981 \pm 0,015$	$0,873 \pm 0,504$	$0,981 \pm 0,095$	$0,949 \pm 0,109$	$0,925 \pm 0,267$	$0,965 \pm 0,072$	$0,945 \pm 0,141$
Proxima Cen b	$0,997 \pm 0,048$	$0,937 \pm 0,419$	$0,833 \pm 0,266$	$0,990 \pm 0,031$	$0,966 \pm 0,217$	$0,908 \pm 0,146$	$0,937 \pm 0,129$
Kepler-442 b	$0,924 \pm 0,033$	$0,935 \pm 0,633$	$0,924 \pm 0,187$	$0,894 \pm 0,126$	$0,930 \pm 0,315$	$0,909 \pm 0,112$	$0,919 \pm 0,166$
TRAPPIST-1 e	$0,976 \pm 0,004$	$0,903 \pm 0,029$	$0,833 \pm 0,089$	$0,950 \pm 0,006$	$0,939 \pm 0,015$	$0,889 \pm 0,048$	$0,914 \pm 0,025$
GJ 180 c	$0,990 \pm 0,092$	$0,753 \pm 0,937$	$0,924 \pm 0,187$	$0,957 \pm 0,158$	$0,864 \pm 0,539$	$0,940 \pm 0,123$	$0,901 \pm 0,287$
Teegarden's Star c	$0,999 \pm 0,044$	$0,970 \pm 0,399$	$0,676 \pm 0,080$	$0,996 \pm 0,034$	$0,984 \pm 0,204$	$0,821 \pm 0,051$	$0,899 \pm 0,097$
GJ 1061 d	$0,963 \pm 0,046$	$0,918 \pm 0,400$	$0,759 \pm 0,255$	$0,937 \pm 0,036$	$0,940 \pm 0,206$	$0,843 \pm 0,142$	$0,891 \pm 0,123$
GJ 667 C f	$0,997 \pm 0,081$	$0,892 \pm 1,155$	$0,717 \pm 0,165$	$0,973 \pm 0,210$	$0,943 \pm 0,612$	$0,835 \pm 0,132$	$0,887 \pm 0,296$
TRAPPIST-1 f	$0,987 \pm 0,003$	$0,923 \pm 0,024$	$0,676 \pm 0,080$	$0,999 \pm 0,006$	$0,954 \pm 0,013$	$0,822 \pm 0,049$	$0,886 \pm 0,027$
Kepler-1652 b	$0,887 \pm 0,035$	$0,772 \pm 0,485$	$0,981 \pm 0,095$	$0,914 \pm 0,100$	$0,828 \pm 0,261$	$0,947 \pm 0,069$	$0,885 \pm 0,143$
TOI-715 b	$0,873 \pm 0,013$	$0,986 \pm 0,329$	$0,833 \pm 0,266$	$0,844 \pm 0,067$	$0,928 \pm 0,155$	$0,838 \pm 0,138$	$0,882 \pm 0,104$
Wolf 1069 b	$0,970 \pm 0,040$	$0,948 \pm 0,358$	$0,664 \pm 0,159$	$0,975 \pm 0,034$	$0,959 \pm 0,182$	$0,805 \pm 0,097$	$0,879 \pm 0,099$
GJ 667 C c	$0,929 \pm 0,066$	$0,780 \pm 0,625$	$0,833 \pm 0,089$	$0,865 \pm 0,098$	$0,852 \pm 0,342$	$0,849 \pm 0,066$	$0,850 \pm 0,174$
GJ 433 d	$0,869 \pm 0,057$	$0,807 \pm 0,461$	$0,924 \pm 0,280$	$0,800 \pm 0,049$	$0,838 \pm 0,241$	$0,859 \pm 0,133$	$0,849 \pm 0,138$
GJ 887 d	$0,830 \pm 0,071$	$0,945 \pm 0,630$	$0,833 \pm 0,089$	$0,784 \pm 0,065$	$0,886 \pm 0,298$	$0,808 \pm 0,055$	$0,846 \pm 0,145$
Kepler-22 b	$0,779 \pm 0,017$	$0,951$	$0,891 \pm 0,169$	$0,739$	$0,861 \pm 0,009$	$0,812 \pm 0,077$	$0,836 \pm 0,040$
GJ 682 b	$0,868 \pm 0,083$	$0,938 \pm 0,782$	$0,717 \pm 0,083$	$0,827 \pm 0,096$	$0,902 \pm 0,378$	$0,770 \pm 0,063$	$0,834 \pm 0,178$
Kepler-1544 b	$0,828 \pm 0,013$	$0,906 \pm 0,198$	$0,833 \pm 0,089$	$0,773 \pm 0,038$	$0,866 \pm 0,095$	$0,802 \pm 0,047$	$0,833 \pm 0,052$
HD 40307 g	$0,812 \pm 0,092$	$0,975 \pm 0,845$	$0,746 \pm 0,168$	$0,780 \pm 0,092$	$0,890 \pm 0,389$	$0,763 \pm 0,097$	$0,824 \pm 0,188$
K2-288 B b	$0,840 \pm 0,055$	$0,976 \pm 0,629$	$0,676 \pm 0,080$	$0,812 \pm 0,096$	$0,905 \pm 0,293$	$0,741 \pm 0,062$	$0,819 \pm 0,137$
Kepler-1229 b	$0,902 \pm 0,024$	$0,793 \pm 0,360$	$0,746 \pm 0,168$	$0,835 \pm 0,075$	$0,846 \pm 0,193$	$0,789 \pm 0,096$	$0,817 \pm 0,105$
HN Lib b	$0,850 \pm 0,063$	$0,874 \pm 0,515$	$0,717 \pm 0,165$	$0,792 \pm 0,047$	$0,862 \pm 0,256$	$0,754 \pm 0,090$	$0,806 \pm 0,129$
LHS 1140 b	$0,837 \pm 0,004$	$0,943 \pm 0,042$	$0,676 \pm 0,080$	$0,790 \pm 0,007$	$0,888 \pm 0,020$	$0,731 \pm 0,043$	$0,806 \pm 0,026$
GJ 251 c	$0,903 \pm 0,055$	$0,782 \pm 0,477$	$0,676 \pm 0,080$	$0,833 \pm 0,064$	$0,840 \pm 0,258$	$0,751 \pm 0,053$	$0,794 \pm 0,125$
55 Cnc B c	$0,971 \pm 0,156$	$0,605 \pm 1,531$	$0,713 \pm 0,165$	$0,943 \pm 0,324$	$0,766 \pm 0,972$	$0,820 \pm 0,170$	$0,793 \pm 0,509$
GJ 357 d	$0,843 \pm 0,063$	$0,874 \pm 0,522$	$0,676 \pm 0,080$	$0,784 \pm 0,049$	$0,858 \pm 0,258$	$0,728 \pm 0,049$	$0,791 \pm 0,122$
Kepler-443 b	$0,753 \pm 0,026$	$0,668 \pm 0,245$	$0,981 \pm 0,095$	$0,780 \pm 0,045$	$0,709 \pm 0,131$	$0,875 \pm 0,049$	$0,788 \pm 0,076$
TOI-2257 b	$0,766 \pm 0,016$	$0,794 \pm 0,231$	$0,746 \pm 0,168$	$0,765 \pm 0,047$	$0,780 \pm 0,113$	$0,756 \pm 0,088$	$0,767 \pm 0,072$
GJ 3293 d	$0,783 \pm 0,068$	$0,857 \pm 0,554$	$0,664 \pm 0,159$	$0,772 \pm 0,049$	$0,819 \pm 0,267$	$0,716 \pm 0,089$	$0,766 \pm 0,134$
TOI-904 c	$0,769 \pm 0,016$	$0,816 \pm 0,202$	$0,717 \pm 0,165$	$0,764 \pm 0,037$	$0,792 \pm 0,098$	$0,740 \pm 0,087$	$0,766 \pm 0,066$
Kepler-296 f	$0,866 \pm 0,081$	$0,592$	$0,676 \pm 0,080$	$0,932 \pm 0,178$	$0,716 \pm 0,033$	$0,794 \pm 0,089$	$0,754 \pm 0,046$
Kepler-174 d	$0,767 \pm 0,017$	$0,784 \pm 0,211$	$0,664 \pm 0,079$	$0,769 \pm 0,041$	$0,775 \pm 0,105$	$0,715 \pm 0,047$	$0,744 \pm 0,056$

Tabela 4.4: Tabela dos planetas rochosos na ZH Conservadora pelo ATMOS com atmosfera tipo Terra, seus respectivos ESIs ordenados por maior similaridade com a Terra.

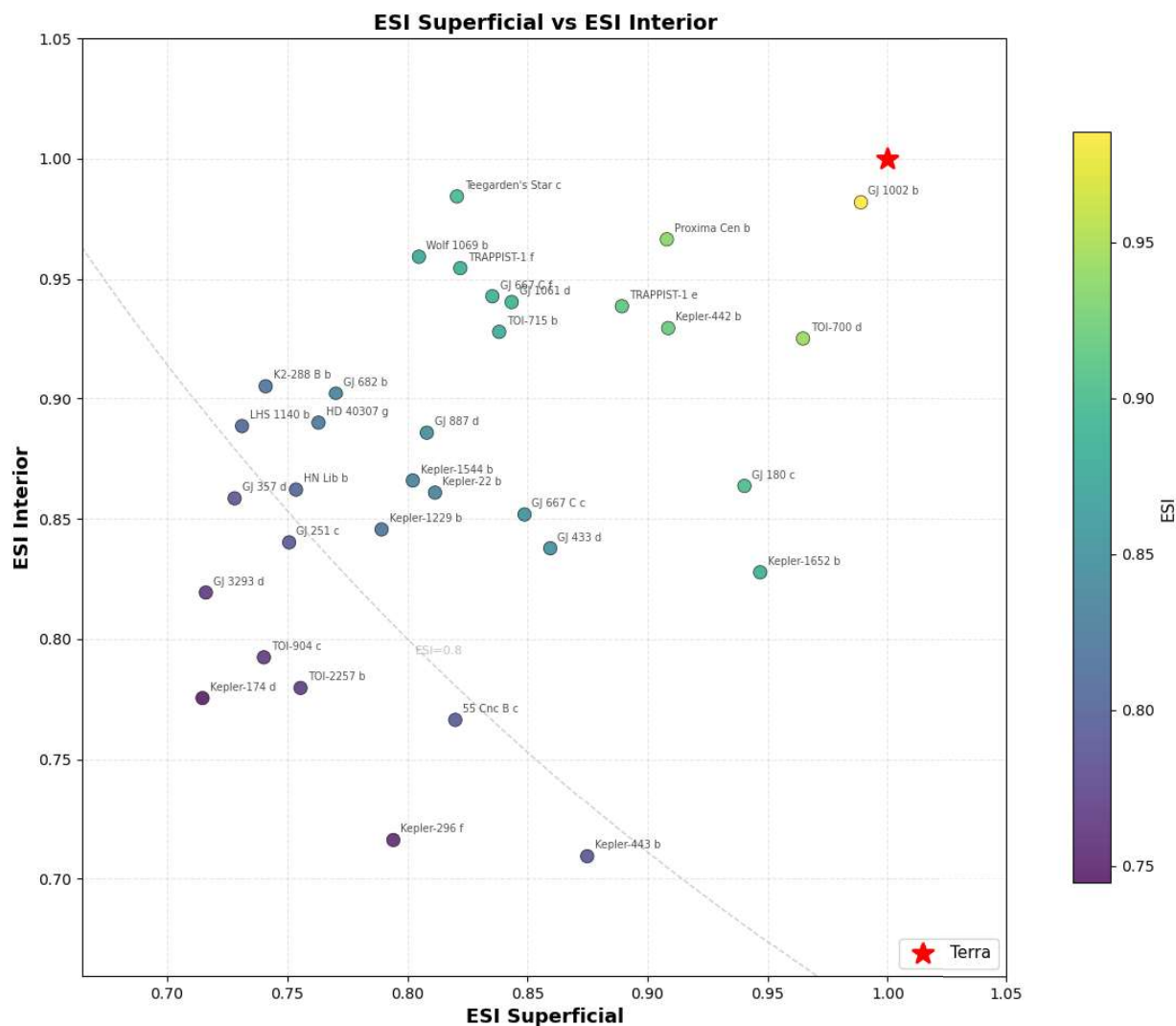


Figura 4.9: Diagrama ESI Superficial por ESI Interior com escala de cor para similaridade com a Terra (roxo para amarelo), a linha tracejada é o limite de $ESI = 0,8$, exoplanetas mais ao topo-direita apresentam maior similaridade com a Terra (representada por uma estrela vermelha).

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas futuras

O objetivo principal do trabalho foi identificar exoplanetas astrobiologicamente interessantes utilizando parâmetros físicos e orbitais do NASA Exoplanet Archive. Foi realizada uma análise por meio do código radiativo-convectivo de KASTING *et al.* (1993) já estabelecido na literatura como um código unidimensional robusto. Em conjunto foi aplicado o parâmetro de similaridade com a Terra desenvolvido por SCHULZE-MAKUCH *et al.* (2011). Os resultados da metodologia aplicada são disposto na Tabela 5.1.

Foram mais restritamente compilados 1447 Exoplanetas Rochosos Pequenos ($0,1M_{\oplus} < M_P < 4,37M_{\oplus}$ ou $0,1R_{\oplus} < R_P < 1,64R_{\oplus}$), destes 44 estão dentro da Zona Habitável Otimista, e 26 estão dentro da Zona Habitável Conservadora. São 25 exoplanetas dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS, com 20 exoplanetas de possível atmosfera análoga à Terra e 15 exoplanetas possuem $ESI > 0,8$.

Foram compilados 1161 Exoplanetas Rochosos Super-Terras/Hiceânicos ($4,37M_{\oplus} < M_P < 10M_{\oplus}$ ou $1,64R_{\oplus} < R_P < 2,5R_{\oplus}$), destes 31 estão dentro da Zona Habitável Otimista, e 14 estão dentro da Zona Habitável Conservadora. São 14 exoplanetas dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS, com 13 exoplanetas de possível atmosfera análoga à Terra e 9 exoplanetas possuem $ESI > 0,8$.

	Exoplanetas Rochosos Pequenos $0,1 < M_P < 4,37M_{\oplus}$ ou $0,1 < R_P < 1,64R_{\oplus}$	Exoplanetas Rochosos Super-Terras/Hiceânicos $4,37 < M_P < 10M_{\oplus}$ ou $1,64 < R_P < 2,5R_{\oplus}$
Total da Amostra	1447	1161
Dentro da ZHO	44	31
Dentro da ZHC Equação 2.7	26	14
Dentro da ZHC ATMOS	25	14
Atmosfera Análoga à Terra	20	13
Água Líquida Superficial	6	2

Tabela 5.1: Tabela apresentando os exoplanetas resultantes de cada filtragem.

A análise aponta 8 exoplanetas com temperatura superficial capaz de manter água líquida: GJ 1002b, GJ 180c, GJ 433d, Kepler-1652b, Kepler-22b, Kepler-442b, Kepler-443b, TOI-700d. Somente 2 deles são super-Terras/hiceânicos: Kepler-2b e Kepler-443b. Quase todos possuem $ESI > 0,8$ (única exceção é Kepler-443b), apresentados na Tabela 5.2.

Exoplaneta	T_s	ESI
GJ 1002 b	$290 \pm 30K$	$0,985 \pm 0,112$
TOI-700 d	$290 \pm 10K$	$0,945 \pm 0,141$
Kepler-442 b	$280 \pm 20K$	$0,919 \pm 0,166$
GJ 180 c	$280 \pm 20K$	$0,901 \pm 0,287$
Kepler-1652 b	$290 \pm 10K$	$0,885 \pm 0,143$
GJ 433 d	$280 \pm 30K$	$0,849 \pm 0,138$
Kepler-22 b	$300 \pm 20K$	$0,836 \pm 0,040$
Kepler-443 b	$290 \pm 20K$	$0,788 \pm 0,076$

Tabela 5.2: Tabela dos exoplanetas apontados pela análise como tendo atmosfera similar à Terra e também com temperatura superficial capaz de manter água líquida em sua superfície.

O candidato GJ 1002b é o exoplaneta mais astrobiologicamente interessante de nossa amostra, possuindo raio e massa muito similares à Terra ($1,08 R_\oplus$ e $1,04 M_\oplus$ respectivamente), orbitando uma anã M à somente $4,84 pc$ do Sol, se mostra um candidato sólido para novas observações. MASCAREÑO *et al.* (2023) discutem alguns entraves a sua habitabilidade, como a ejeção frequente de jatos na história evolutiva da estrela hospedeira, que poderiam ter eliminado a atmosfera planetária.

MASCAREÑO *et al.* (2023) ainda notam que por conta da geometria da órbita do sistema, não é possível a caracterização atmosférica por trânsito. Porém recentemente trabalhos como LOVIS *et al.* (2017) propõem a utilização de espectrógrafos acoplados a imageamento de alta resolução angular para caracterização de atmosferas na vizinhança solar.

Já TOI-700d é o primeiro planeta de dimensões terrestres encontrado pela missão TESS (GILBERT *et al.*, 2020). Ele está orbitando uma estrela do tipo M sem a detecção de atividade estelar intensa. Ainda é discutido se o planeta está em travamento de maré ou não, sendo necessárias mais observações para uma análise mais precisa (GILBERT *et al.*, 2023). Por ser um sistema planetário múltiplo aumenta-se a expectativa e interesse de futuras observações.

Kepler-442b, que em 2015 entrou para o efêmero *NASA Kepler's Hall of Fame: Small Habitable Zone Exoplanets*, possui parâmetros também semelhantes à Terra. Ele não está em travamento de maré com sua estrela hospedeira (uma estrela K, sendo mais estável que uma M). COVONE *et al.* (2021) discute que a estrela talvez não emita energia fotossintetizante (400-700 nm), aquela utilizada por organismo na fotossíntese, suficiente

para desenvolver uma biosfera. Por conta da geometria a órbita do sistema, é possível avaliar a atmosfera planetária por meio dos trânsitos. Sendo um candidato interessante para o JWST ou o Nancy Grace Roman Space Telescope.

GJ 180c se mostra um candidato menos proeminente. O planeta também está orbitando uma estrela anã M (com os mesmo problemas associados à jatos estelares) (FENG *et al.*, 2020).

O exoplaneta Kepler-1652 b foi modelado por BOLDOG *et al.* (2024), que discutiram a probabilidade do conteúdo de água do planeta ser grande, talvez tendo uma atmosfera rica em vapor d'água ou também um grande oceano. A análise é feita utilizando diferentes cenários possíveis, tendo em vista a densidade interna do planeta.

GJ 433d também está bem próximo ao limite de rochoso pequeno e super-Terra/Hiceânico, estando na linha tênue que divide estes dos sub-Netunos, pelo relação deste trabalho ele é um planeta rochoso pequeno (FENG *et al.*, 2020).

Kepler-22b é um ótimo análogo terrestre, com um período similar (289 dias) e orbitando uma estrela G (análoga Solar). O planeta entretanto possui uma massa bem maior que a Terra ($9,1M_{\oplus}$). O planeta transita, na linha de visada da Terra, uma estrela tipo-Solar. A geometria da órbita favorece futuras observações voltadas à caracterização atmosférica (SANCHIS-OJEDA *et al.*, 2015).

O candidato com menor ESI da amostra final é Kepler-443b, sendo uma Super-Terra/Hiceânico. Está à cerca de 802 pc da Terra, assim é um planeta de difícil observação e caracterização de alta resolução (GAJDOŠ *et al.*, 2019).

Tendo em vista as futuras missões, o desenvolvimento das técnicas observacionais e a melhor modelagem para seleção de exoplanetas a serem estudados, é de se esperar que o número de exoplanetas com possibilidade de água líquida em sua superfície seja maior.

Ao longo do trabalho, outras considerações foram levantadas acerca dos aprimoramentos para próximas etapas. A relação massa-raio utilizada pode ser mais refinada com uma maior base de dados de exoplanetas confirmadas. Pode-se também utilizar espectros das estrelas hospedeiras de cada exoplaneta, introduzindo-as no código manualmente. O código radiativo-convectivo utiliza-se somente de duas atmosferas (Terra e Marte), o que é uma desvantagem tendo em vista que somente no Sistema Solar temos 8 atmosferas distintas, só em planetas.

A utilização de modelos mais complexos tri-dimensionais de circulação geral, se mostram como o próximo passo para caracterização mais precisa de atmosferas. Estes modelos permitem a utilização de mais parâmetros, como a topografia e a taxa de rotação planetária, para uma caracterização mais precisa. O LMDZ desenvolvido pelo *Laboratoire de Météorologie Dynamique* na França (HOURLIN *et al.*, 2020) e o ROCKE-3D desenvolvido pela NASA (TSIGARIDIS *et al.*, 2025), se mostram como ótimos caracterizadores de atmosferas exoplanetárias. Sendo assim, um grande passo na direção da identificação de planetas astrobiologicamente interessantes.

Referências Bibliográficas

- ALDERSON, L., BATALHA, N. E., WAKEFORD, H. R., et al., 2024, “JWST COMPASS: NIRSpec/G395H Transmission Observations of the Super-Earth TOI-836b”, *The Astronomical Journal*, v. 167, n. 5 (abr.), pp. 216. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/ad32c9. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ad32c9>>.
- ALLARD, F., 2013, “The BT-Settl Model Atmospheres for Stars, Brown Dwarfs and Planets”, *Proceedings of the International Astronomical Union*, v. 8, n. S299, pp. 271–272. ISSN: 1743-9221. doi: 10.1017/s1743921313008545. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/S1743921313008545>>.
- ANGLADA-ESCUDE, G., TUOMI, M., GERLACH, E., et al., 2013, “A dynamically-packed planetary system around GJ 667C with three super-Earths in its habitable zone”, *Astronomy and Astrophysics*, v. 556 (ago.), pp. A126. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/201321331. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201321331>>.
- AUVERGNE, M., BODIN, P., BOISNARD, L., et al., 2009, “The CoRoT satellite in flight: description and performance”, *Astronomy and Astrophysics*, v. 506, n. 1 (mar.), pp. 411–424. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/200810860. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200810860>>.
- BARCLAY, T., KOSTOV, V. B., COLÓN, K. D., et al., 2021, “Stellar Surface Inhomogeneities as a Potential Source of the Atmospheric Signal Detected in the K2-18b Transmission Spectrum”, *The Astronomical Journal*, v. 162, n. 6 (dez.), pp. 300. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/ac2824. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ac2824>>.
- BATISTA, V., 2018, “Finding Planets via Gravitational Microlensing”. In: *Handbook of Exoplanets*, p. 659–687, Springer International Publishing. ISBN: 9783319553337. doi: 10.1007/978-3-319-55333-7_120. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-55333-7_120>.

- BLOOM, S., 1981, “Similarity Indices in Community Studies: Potential Pitfalls”, *Marine Ecology Progress Series*, v. 5, pp. 125–128. ISSN: 1616-1599. doi: 10.3354/meps005125. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3354/meps005125>>.
- BOLDOG, A., DOBOS, V., KISS, L. L., et al., 2024, “Water content of rocky exoplanets in the habitable zone”, *Astronomy & Astrophysics*, v. 681 (jan.), pp. A109. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/202346988. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202346988>>.
- BORUCKI, W. J., KOCH, D., BASRI, G., et al., 2010, “Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results”, *Science*, v. 327, n. 5968 (fev.), pp. 977–980. ISSN: 1095-9203. doi: 10.1126/science.1185402. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1126/science.1185402>>.
- BRAY, J. R., CURTIS, J. T., 1957, “An Ordination of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin”, *Ecological Monographs*, v. 27, n. 4 (out.), pp. 325–349. ISSN: 1557-7015. doi: 10.2307/1942268. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2307/1942268>>.
- CADIEUX, C., DOYON, R., MACDONALD, R. J., et al., 2024, “Transmission Spectroscopy of the Habitable Zone Exoplanet LHS 1140 b with JWST/NIRISS”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 970, n. 1, pp. L2. ISSN: 2041-8213. doi: 10.3847/2041-8213/ad5afa. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ad5afa>>.
- CATLING, D. C., 2015, *Astrobiology: A Very Short Introduction by David C. Catling*. Oxford University Press, Oxford, 2013. ISBN 978-0-19-958645-5, v. 50. Wiley. doi: 10.1002/gj.2690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/gj.2690>>.
- CATLING, D. C., CLAIRE, M. W., 2005, “How Earth’s atmosphere evolved to an oxic state: A status report”, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 237, n. 1-2 (ago.), pp. 1–20. ISSN: 0012-821X. doi: 10.1016/j.epsl.2005.06.013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.013>>.
- CHA, S.-H., 2007, “Comprehensive Survey on Distance/Similarity Measures between Probability Density Functions”. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15506682>>.
- CHEN, J., KIPPING, D., 2016, “PROBABILISTIC FORECASTING OF THE MASSES AND RADII OF OTHER WORLDS”, *The Astrophysical Journal*, v. 834, n. 1 (dez.), pp. 17. ISSN: 1538-4357. doi: 10.3847/1538-4357/834/1/17. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/834/1/17>>.

- CHEN, X., SUN, T., LU, Y. L., et al., 2026, “Insights into the Exoplanet Radius Valley from Host-star Ages, Activity, Chemistry, and Birth Radii”, *The Astrophysical Journal*, v. 1001, n. 2 (abr.), pp. 176. ISSN: 1538-4357. doi: 10.3847/1538-4357/ae5633. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ae5633>>.
- CHERUBIM, C., VISSAPRAGADA, S., CUNNINGHAM, T., et al., 2026, “Helium escaping from the atmosphere of a nearby rocky exoplanet orbiting in a habitable zone”, *Science*. ISSN: 1095-9203. doi: 10.1126/science.aea9708. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1126/science.aea9708>>.
- CHRISTIANSEN, J. L., MCELROY, D. L., HARBUT, M., et al., 2025, “The NASA Exoplanet Archive and Exoplanet Follow-up Observing Program: Data, Tools, and Usage”, *The Planetary Science Journal*, v. 6, n. 8 (ago.), pp. 186. ISSN: 2632-3338. doi: 10.3847/psj/ade3c2. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/PSJ/ade3c2>>.
- CLOUTIER, R., MENOU, K., 2020, “Evolution of the Radius Valley around Low-mass Stars from Kepler and K2”, *The Astronomical Journal*, v. 159, n. 5 (abr.), pp. 211. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/ab8237. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab8237>>.
- COVONE, G., IENCO, R. M., CACCIAPUOTI, L., et al., 2021, “Efficiency of the oxygenic photosynthesis on Earth-like planets in the habitable zone”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 505, n. 3 (maio), pp. 3329–3335. ISSN: 1365-2966. doi: 10.1093/mnras/stab1357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stab1357>>.
- CRUTZEN, P. J., 1976, “The possible importance of CSO for the sulfate layer of the stratosphere”, *Geophysical Research Letters*, v. 3, n. 2 (fev.), pp. 73–76. ISSN: 1944-8007. doi: 10.1029/gl003i002p00073. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/GL003i002p00073>>.
- CUMMING, A., MARCY, G. W., BUTLER, R. P., 1999, “The Lick Planet Search: Detectability and Mass Thresholds”, *The Astrophysical Journal*, v. 526, n. 2 (dez.), pp. 890–915. ISSN: 1538-4357. doi: 10.1086/308020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/308020>>.
- DAMIANO, M., BELLO-ARUFE, A., YANG, J., et al., 2024, “LHS 1140 b Is a Potentially Habitable Water World”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 968, n. 2, pp. L22. ISSN: 2041-8213. doi: 10.3847/2041-8213/ad5204. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ad5204>>.

- DEL GENIO, A. D., KIANG, N. Y., WAY, M. J., et al., 2019, “Albedos, Equilibrium Temperatures, and Surface Temperatures of Habitable Planets”, *The Astrophysical Journal*, v. 884, n. 1 (out.), pp. 75. ISSN: 1538-4357. doi: 10.3847/1538-4357/ab3be8. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab3be8>>.
- DELEUIL, M., BORDÉ, P., MOUTOU, C. A., 2010, “<i>CoRoT</i> mission highlights”, *Proceedings of the International Astronomical Union*, v. 6, n. S276 (out.), pp. 44–49. ISSN: 1743-9221. doi: 10.1017/s1743921311019910. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/S1743921311019910>>.
- DEMANGEON, O. D. S., ZAPATERO OSORIO, M. R., ALIBERT, Y., et al., 2021, “Warm terrestrial planet with half the mass of Venus transiting a nearby star”, *Astronomy and Astrophysics*, v. 653, pp. A41. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/202140728. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202140728>>.
- DEZA, E., DEZA, M. M., 2009, *Encyclopedia of Distances*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783642002342. doi: 10.1007/978-3-642-00234-2. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00234-2>>.
- DOLE, S. H., 1964, *Habitable Planets for Man*. Santa Monica, CA, RAND.
- FENG, F., BUTLER, R. P., SHECTMAN, S. A., et al., 2020, “Search for Nearby Earth Analogs. II. Detection of Five New Planets, Eight Planet Candidates, and Confirmation of Three Planets around Nine Nearby M Dwarfs*”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 246, n. 1 (jan.), pp. 11. ISSN: 1538-4365. doi: 10.3847/1538-4365/ab5e7c. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/ab5e7c>>.
- FULTON, B. J., PETIGURA, E. A., HOWARD, A. W., et al., 2017, “The California-Kepler Survey. III. A Gap in the Radius Distribution of Small Planets*”, *The Astronomical Journal*, v. 154, n. 3 (ago.), pp. 109. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/aa80eb. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aa80eb>>.
- GAJDOŠ, P., VAŇKO, M., PARIMUCHA, Î, 2019, “Transit timing variations and linear ephemerides of confirmed <i>Kepler</i> transiting exoplanets”, *Research in Astronomy and Astrophysics*, v. 19, n. 3 (mar.), pp. 041. ISSN: 2397-6209. doi: 10.1088/1674-4527/19/3/41. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/19/3/41>>.

- GARCIA, M. J., 2016, *Caracterização de exoplanetas rochosos na zona de habitabilidade das estrelas hospedeiras*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Astronomia. Disponível em: <<http://localhost:8080/tede/handle/tede/39>>. Divisão de Programas de Pós-Graduação - DIPPG.
- GILBERT, E. A., BARCLAY, T., SCHLIEDER, J. E., et al., 2020, “The First Habitable-zone Earth-sized Planet from TESS. I. Validation of the TOI-700 System”, *The Astronomical Journal*, v. 160, n. 3 (ago.), pp. 116. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/aba4b2. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aba4b2>>.
- GILBERT, E. A., VANDERBURG, A., RODRIGUEZ, J. E., et al., 2023, “A Second Earth-sized Planet in the Habitable Zone of the M Dwarf, TOI-700”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 944, n. 2 (fev.), pp. L35. ISSN: 2041-8213. doi: 10.3847/2041-8213/acb599. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/acb599>>.
- GILLON, M., TRIAUD, A. H. M. J., DEMORY, B.-O., et al., 2017, “Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1”, *Nature*, v. 542, n. 7642 (fev.), pp. 456–460. ISSN: 1476-4687. doi: 10.1038/nature21360. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nature21360>>.
- HADDEN, S., LITHWICK, Y., 2017, “Kepler Planet Masses and Eccentricities from TTV Analysis”, *The Astronomical Journal*, v. 154, n. 1, pp. 5. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/aa71ef. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aa71ef>>.
- HELLING, C., 2019, “Exoplanet Clouds”, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 47, n. 1 (maio), pp. 583–606. ISSN: 1545-4495. doi: 10.1146/annurev-earth-053018-060401. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060401>>.
- HILL, M. L., BOTT, K., DALBA, P. A., et al., 2023, “A Catalog of Habitable Zone Exoplanets”, *The Astronomical Journal*, v. 165, n. 2 (jan.), pp. 34. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/aca1c0. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aca1c0>>.
- HILL, M. L., KANE, S. R., FOLEY, B. J., et al., 2026, “Smaller Than Earth Habitability Model (STEHM): The Lower Size Limit for Atmosphere Retention in the Habitable Zone”, *The Planetary Science Journal*, v. 7, n. 6, pp. 140. ISSN: 2632-3338. doi: 10.3847/psj/ae6804. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/PSJ/ae6804>>.

- HOURDIN, F., RIO, C., GRANDPEIX, J., et al., 2020, “LMDZ6A: The Atmospheric Component of the IPSL Climate Model With Improved and Better Tuned Physics”, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 12, n. 7. ISSN: 1942-2466. doi: 10.1029/2019ms001892. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2019MS001892>>.
- HUANG, S.-S., 1960, “Life Outside the Solar System”, *Scientific American*, v. 202, n. 4 (abr.), pp. 55–63. ISSN: 0036-8733. doi: 10.1038/scientificamerican0460-55. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/scientificamerican0460-55>>.
- JAGADEESH, M. K., 2017, *Earth Similarity Index and Habitability Studies of Exoplanets*. Tese de Mestrado, Department of Physics and Electronics CHRIST UNIVERSITY BENGALURU, INDIA. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1801.07101>>.
- JOSHI, M., 2003, “Climate Model Studies of Synchronously Rotating Planets”, *Astrobiology*, v. 3, n. 2, pp. 415–427. ISSN: 1557-8070. doi: 10.1089/153110703769016488. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1089/153110703769016488>>.
- KASTING, J. F., 1988, “Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus”, *Icarus*, v. 74, n. 3, pp. 472–494. ISSN: 0019-1035. doi: 10.1016/0019-1035(88)90116-9. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90116-9](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(88)90116-9)>.
- KASTING, J. F., 1991, “CO₂ condensation and the climate of early Mars”, *Icarus*, v. 94, n. 1 (nov.), pp. 1–13. ISSN: 0019-1035. doi: 10.1016/0019-1035(91)90137-i. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90137-I](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(91)90137-I)>.
- KASTING, J. F., POLLACK, J. B., ACKERMAN, T. P., 1984, “Response of Earth’s atmosphere to increases in solar flux and implications for loss of water from Venus”, *Icarus*, v. 57, n. 3 (mar.), pp. 335–355. ISSN: 0019-1035. doi: 10.1016/0019-1035(84)90122-2. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(84\)90122-2](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(84)90122-2)>.
- KASTING, J. F., WHITMIRE, D. P., REYNOLDS, R. T., 1993, “Habitable Zones around Main Sequence Stars”, *Icarus*, v. 101, n. 1 (jan.), pp. 108–128. ISSN: 0019-1035. doi: 10.1006/icar.1993.1010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1993.1010>>.
- KELES, E., GRENFELL, J. L., GODOLT, M., et al., 2018, “The Effect of Varying Atmospheric Pressure upon Habitability and Biosignatures of Earth-like Planets”,

- Astrobiology*, v. 18, n. 2 (fev.), pp. 116–132. ISSN: 1557-8070. doi: 10.1089/ast.2016.1632. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1089/ast.2016.1632>>.
- KIPPENHAHN, R., WEIGERT, A., WEISS, A., 2012, *Stellar Structure and Evolution*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783642303043. doi: 10.1007/978-3-642-30304-3. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3>>.
- KIRK, J., STEVENSON, K. B., FU, G., et al., 2024, “JWST/NIRCam Transmission Spectroscopy of the Nearby Sub-Earth GJ 341b”, *The Astronomical Journal*, v. 167, n. 3 (fev.), pp. 90. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/ad19df. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ad19df>>.
- KOCH, D. G., BORUCKI, W. J., WEBSTER, L., et al., 1998, “Kepler: a space mission to detect earth-class exoplanets”. In: Bely, P. Y., Brekinridge, J. B. (Eds.), *Space Telescopes and Instruments V*, v. 3356, p. 599. SPIE, ago. doi: 10.1117/12.324482. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.324482>>.
- KOPPARAPU, R. K., RAMIREZ, R., KASTING, J. F., et al., 2013, “HABITABLE ZONES AROUND MAIN-SEQUENCE STARS: NEW ESTIMATES”, *The Astrophysical Journal*, v. 765, n. 2 (fev.), pp. 131. ISSN: 1538-4357. doi: 10.1088/0004-637x/765/2/131. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637x/765/2/131>>.
- KOPPARAPU, R. K., RAMIREZ, R. M., SCHOTTELKOTTE, J., et al., 2014, “HABITABLE ZONES AROUND MAIN-SEQUENCE STARS: DEPENDENCE ON PLANETARY MASS”, *The Astrophysical Journal*, v. 787, n. 2 (maio), pp. L29. ISSN: 2041-8213. doi: 10.1088/2041-8205/787/2/L29. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/787/2/L29>>.
- KRASNOPOLSKY, V., POLLACK, J., 1994, “H₂O-H₂SO₄ System in Venus’ Clouds and OCS, CO, and H₂SO₄ Profiles in Venus’ Troposphere”, *Icarus*, v. 109, n. 1 (maio), pp. 58–78. ISSN: 0019-1035. doi: 10.1006/icar.1994.1077. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1994.1077>>.
- KRASNOPOLSKY, V. A., FELDMAN, P. D., 2001, “Detection of Molecular Hydrogen in the Atmosphere of Mars”, *Science*, v. 294, n. 5548 (nov.), pp. 1914–1917. ISSN: 1095-9203. doi: 10.1126/science.1065569. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1126/science.1065569>>.
- KREIDBERG, L., STEVENSON, K. B., 2025, “A first look at rocky exoplanets with JWST”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 122, n. 39. ISSN:

- 1091-6490. doi: 10.1073/pnas.2416190122. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.2416190122>>.
- LAMMER, H., LICHTENEGGER, H. I., KULIKOV, Y. N., et al., 2007, “Coronal Mass Ejection (CME) Activity of Low Mass M Stars as An Important Factor for The Habitability of Terrestrial Exoplanets. II. CME-Induced Ion Pick Up of Earth-like Exoplanets in Close-In Habitable Zones”, *Astrobiology*, v. 7, n. 1 (fev.), pp. 185–207. ISSN: 1557-8070. doi: 10.1089/ast.2006.0128. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1089/ast.2006.0128>>.
- LEE, B.-C., DO, H.-J., PARK, M.-G., et al., 2023, “Long-period radial velocity variations of nine M red giants: The detection of substellar companions around HD 6860 and HD 112300”, *Astronomy amp; Astrophysics*, v. 678 (out.), pp. A106. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/202243725. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202243725>>.
- LINGAM, M., 2021, “A brief history of the term ‘habitable zone’ in the 19th century”, *International Journal of Astrobiology*, v. 20, n. 5, pp. 332–336. ISSN: 1475-3006. doi: 10.1017/s1473550421000203. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/s1473550421000203>>.
- LOOMAN, J., CAMPBELL, J. B., 1960, “Adaptation of Sorensen’s K (1948) for Estimating Unit Affinities in Prairie Vegetation”, *Ecology*, v. 41, n. 3, pp. 409–416. ISSN: 1939-9170. doi: 10.2307/1933315. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2307/1933315>>.
- LOVIS, C., SNELLEN, I., MOUILLET, D., et al., 2017, “Atmospheric characterization of Proxima b by coupling the SPHERE high-contrast imager to the ESPRESSO spectrograph”, *Astronomy amp; Astrophysics*, v. 599 (fev.), pp. A16. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/201629682. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201629682>>.
- LUSTIG-YAEGER, J., FU, G., MAY, E. M., et al., 2023, “A JWST transmission spectrum of the nearby Earth-sized exoplanet LHS 475 b”, *Nature Astronomy*, v. 7, n. 11 (ago.), pp. 1317–1328. ISSN: 2397-3366. doi: 10.1038/s41550-023-02064-z. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41550-023-02064-z>>.
- LÉGER, A., ROUAN, D., SCHNEIDER, J., et al., 2009, “Transiting exoplanets from the CoRoT space mission: VIII. CoRoT-7b: the first super-Earth with measured radius”, *Astronomy amp; Astrophysics*, v. 506, n. 1 (ago.), pp. 287–302. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/200911933. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200911933>>.

- MADHUSUDHAN, N., SARKAR, S., CONSTANTINOU, S., et al., 2023, “Carbon-bearing Molecules in a Possible Hycean Atmosphere”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 956, n. 1 (out.), pp. L13. ISSN: 2041-8213. doi: 10.3847/2041-8213/acf577. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/acf577>>.
- MAMAJEK, E. E., WRIGHT, J. T., TUCHOW, N. W., et al., 2026, “The Solirad (So) as a Convenient Unit for Quoting Astronomical Irradiances for Planetary Insolations and Exoplanetary Instellations”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 138, n. 2 (fev.), pp. 023001. ISSN: 1538-3873. doi: 10.1088/1538-3873/ae37da. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1538-3873/ae37da>>.
- MANABE, S., WETHERALD, R. T., 1967, “Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 24, n. 3 (maio), pp. 241–259. ISSN: 1520-0469. doi: 10.1175/1520-0469(1967)024<0241:teotaw>2.0.co;2. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2)>.
- MAROIS, C., ZUCKERMAN, B., KONOPACKY, Q. M., et al., 2010, “Images of a fourth planet orbiting HR 8799”, *Nature*, v. 468, n. 7327 (dez.), pp. 1080–1083. ISSN: 1476-4687. doi: 10.1038/nature09684. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nature09684>>.
- MASCAREÑO, A. S., GONZÁLEZ-ÁLVAREZ, E., OSORIO, M. R. Z., et al., 2023, “Two temperate Earth-mass planets orbiting the nearby star GJ 1002”, *Astron. Astrophys.*, v. 670 (fev.), pp. A5.
- MAY, E. M., MACDONALD, R. J., BENNETT, K. A., et al., 2023, “Double Trouble: Two Transits of the Super-Earth GJ 1132 b Observed with JWST NIRSpec G395H”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 959, n. 1 (dez.), pp. L9. ISSN: 2041-8213. doi: 10.3847/2041-8213/ad054f. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ad054f>>.
- MAYOR, M., QUELOZ, D., 1995, “A Jupiter-mass companion to a solar-type star”, *Nature*, v. 378, n. 6555 (nov.), pp. 355–359. ISSN: 1476-4687. doi: 10.1038/378355a0. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/378355a0>>.
- MCGOULDRIK, K., TOON, O. B., GRINSPOON, D. H., 2011, “Sulfuric acid aerosols in the atmospheres of the terrestrial planets”, *Planetary and Space Science*, v. 59, n. 10 (ago.), pp. 934–941. ISSN: 0032-0633. doi: 10.1016/j.pss.2010.05.020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2010.05.020>>.

- MERLIS, T. M., SCHNEIDER, T., 2011, “Changes in Zonal Surface Temperature Gradients and Walker Circulations in a Wide Range of Climates”, *Journal of Climate*, v. 24, n. 17, pp. 4757–4768. ISSN: 1520-0442. doi: 10.1175/2011jcli4042.1. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI4042.1>>.
- MONTMESSIN, F., BERTAUX, J.-L., LEFÈVRE, F., et al., 2011, “A layer of ozone detected in the nightside upper atmosphere of Venus”, *Icarus*, v. 216, n. 1 (nov.), pp. 82–85. ISSN: 0019-1035. doi: 10.1016/j.icarus.2011.08.010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2011.08.010>>.
- MORAN, S. E., STEVENSON, K. B., SING, D. K., et al., 2023, “High Tide or Riptide on the Cosmic Shoreline? A Water-rich Atmosphere or Stellar Contamination for the Warm Super-Earth GJ 486b from JWST Observations”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 948, n. 1 (maio), pp. L11. ISSN: 2041-8213. doi: 10.3847/2041-8213/accb9c. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/accb9c>>.
- MOSES, J. I., VISSCHER, C., FORTNEY, J. J., et al., 2011, “DISEQUILIBRIUM CARBON, OXYGEN, AND NITROGEN CHEMISTRY IN THE ATMOSPHERES OF HD 189733b AND HD 209458b”, *The Astrophysical Journal*, v. 737, n. 1, pp. 15. ISSN: 1538-4357. doi: 10.1088/0004-637x/737/1/15. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/737/1/15>>.
- MÜLLER, S., BARON, J., HELLED, R., et al., 2024, “The mass-radius relation of exoplanets revisited”, *Astronomy and Astrophysics*, v. 686 (June), pp. A296. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/202348690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202348690>>.
- MÉNDEZ, A., RIVERA-VALENTÍN, E. G., SCHULZE-MAKUCH, D., et al., 2020, “Habitability Models for Planetary Sciences”, doi: 10.48550/ARXIV.2007.05491. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2007.05491>>.
- NASA EXOPLANET SCIENCE INSTITUTE, 2026. “Exoplanet and Candidate Statistics”. NASA Exoplanet Archive. Disponível em: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html>. Accessed: 2026-08-13.
- NESVORNÝ, D., KIPPING, D. M., BUCHHAVE, L. A., et al., 2012, “The Detection and Characterization of a Nontransiting Planet by Transit Timing Variations”, *Science*, v. 336, n. 6085, pp. 1133–1136. ISSN: 1095-9203. doi: 10.1126/science.1221141. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1126/science.1221141>>.

- OTEGI, J. F., BOUCHY, F., HELLED, R., 2020, “Revisited mass-radius relations for exoplanets below 120 $M_{\oplus}$ ”, *Astronomy and Astrophysics*, v. 634 (fev.), pp. A43. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/201936482. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201936482>>.
- PEPE, F., MAYOR, M., DELABRE, B., et al., 2000, “HARPS: a new high-resolution spectrograph for the search of extrasolar planets”. In: Iye, M., Moorwood, A. F. M. (Eds.), *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, v. 4008, p. 582. SPIE, ago. doi: 10.1117/12.395516. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.395516>>.
- PERRYMAN, M., 2018, *The Exoplanet Handbook*. 2 ed. Cambridge, England, Cambridge University Press.
- PIERREHUMBERT, R. T., 2010, “A PALETTE OF CLIMATES FOR GLIESE 581g”, *The Astrophysical Journal*, v. 726, n. 1 (dez.), pp. L8. ISSN: 2041-8213. doi: 10.1088/2041-8205/726/1/L8. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/726/1/L8>>.
- POLLACK, J., KASTING, J., RICHARDSON, S., et al., 1987, “The case for a wet, warm climate on early Mars”, *Icarus*, v. 71, n. 2 (ago.), pp. 203–224. ISSN: 0019-1035. doi: 10.1016/0019-1035(87)90147-3. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(87\)90147-3](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(87)90147-3)>.
- PRICE, P. B., 2007, “Microbial life in glacial ice and implications for a cold origin of life: Microbial life in glacial ice; a cold origin of life”, *FEMS Microbiology Ecology*, v. 59, n. 2 (fev.), pp. 217–231. ISSN: 1574-6941. doi: 10.1111/j.1574-6941.2006.00234.x. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00234.x>>.
- RAUER, H., AERTS, C., CABRERA, J., et al., 2025, “The PLATO mission”, *Experimental Astronomy*, v. 59, n. 3 (abr.). ISSN: 1572-9508. doi: 10.1007/s10686-025-09985-9. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10686-025-09985-9>>.
- RICKER, G. R., WINN, J. N., VANDERSPEK, R., et al., 2014, “Transiting Exoplanet Survey Satellite”, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, v. 1, n. 1 (out.), pp. 014003. ISSN: 2329-4124. doi: 10.1117/1.jatis.1.1.014003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/1.JATIS.1.1.014003>>.

- ROBOCK, A., 2000, “Volcanic eruptions and climate”, *Reviews of Geophysics*, v. 38, n. 2 (maio), pp. 191–219. ISSN: 1944-9208. doi: 10.1029/1998rg000054. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/1998RG000054>>.
- ROTHMAN, L., GORDON, I., BARBE, A., et al., 2009, “The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, v. 110, n. 9-10, pp. 533–572. ISSN: 0022-4073. doi: 10.1016/j.jqsrt.2009.02.013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.02.013>>.
- ROTHMAN, L., GORDON, I., BARBER, R., et al., 2010, “HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, v. 111, n. 15 (out.), pp. 2139–2150. ISSN: 0022-4073. doi: 10.1016/j.jqsrt.2010.05.001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.05.001>>.
- SANCHIS-OJEDA, R., RAPPAPORT, S., PALLÈ, E., et al., 2015, “THE K2-ESPRINT PROJECT. I. DISCOVERY OF THE DISINTEGRATING ROCKY PLANET K2-22b WITH A COMETARY HEAD AND LEADING TAIL”, *The Astrophysical Journal*, v. 812, n. 2 (out.), pp. 112. ISSN: 1538-4357. doi: 10.1088/0004-637x/812/2/112. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/812/2/112>>.
- SAUR, J., STROBEL, D. F., NEUBAUER, F. M., 1998, “Interaction of the Jovian magnetosphere with Europa: Constraints on the neutral atmosphere”, *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 103, n. E9 (ago.), pp. 19947–19962. ISSN: 0148-0227. doi: 10.1029/97je03556. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/97JE03556>>.
- SAUR, J., DULING, S., ROTH, L., et al., 2015, “The search for a subsurface ocean in Ganymede with Hubble Space Telescope observations of its auroral ovals”, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 120, n. 3 (mar.), pp. 1715–1737. ISSN: 2169-9402. doi: 10.1002/2014ja020778. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/2014JA020778>>.
- SCARSDALE, N., WOGAN, N., WAKEFORD, H. R., et al., 2024, “JWST COM-PASS: The 3–5 m Transmission Spectrum of the Super-Earth L 98-59 c”, *The Astronomical Journal*, v. 168, n. 6 (nov.), pp. 276. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/ad73cf. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ad73cf>>.
- SCHLIEDER, J. E., BARCLAY, T., BARNES, A., et al., 2024, “Survey science with the Nancy Grace Roman Space Telescope Wide Field Instrument”. In: Coyle,

- L. E., Perrin, M. D., Matsuura, S. (Eds.), *Space Telescopes and Instrumentation 2024: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, p. 29. SPIE, ago. doi: 10.1117/12.3020622. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/12.3020622>>.
- SCHULZE-MAKUCH, D., MÉNDEZ, A., FAIRÉN, A. G., et al., 2011, “A Two-Tiered Approach to Assessing the Habitability of Exoplanets”, *Astrobiology*, v. 11, n. 10 (dez.), pp. 1041–1052. ISSN: 1557-8070. doi: 10.1089/ast.2010.0592. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1089/ast.2010.0592>>.
- SEAGER, S., MALLEN-ORNELAS, G., 2003, “A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve”, *The Astrophysical Journal*, v. 585, n. 2 (mar.), pp. 1038–1055. ISSN: 1538-4357. doi: 10.1086/346105. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/346105>>.
- SEAGER, S., KUCHNER, M., HIER-MAJUMDER, C. A., et al., 2007, “Mass-Radius Relationships for Solid Exoplanets”, *The Astrophysical Journal*, v. 669, n. 2 (nov.), pp. 1279–1297. ISSN: 1538-4357. doi: 10.1086/521346. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/521346>>.
- SEAGER, S., DEMING, D., 2010, “Exoplanet Atmospheres”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 48, n. 1 (ago.), pp. 631–672. ISSN: 1545-4282. doi: 10.1146/annurev-astro-081309-130837. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130837>>.
- SEGURA, A., KRELOVE, K., KASTING, J. F., et al., 2003, “Ozone Concentrations and Ultraviolet Fluxes on Earth-Like Planets Around Other Stars”, *Astrobiology*, v. 3, n. 4 (dez.), pp. 689–708. ISSN: 1557-8070. doi: 10.1089/153110703322736024. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1089/153110703322736024>>.
- SEGURA, T. L., TOON, O. B., COLAPRETE, A., 2008, “Modeling the environmental effects of moderate-sized impacts on Mars”, *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 113, n. E11 (nov.). ISSN: 0148-0227. doi: 10.1029/2008je003147. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2008JE003147>>.
- SHAPLEY, H., 1953, *Climatic Change: Evidence, Causes, and Effects*. Harvard University Press. ISBN: 9780674367159. doi: 10.4159/harvard.9780674367166. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4159/harvard.9780674367166>>.
- SHIBATA, S., IZIDORO, A., 2025, “A Tale of Dynamical Instabilities and Giant Impacts in the Exoplanet Radius Valley”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 986, n. 2, pp. L25. ISSN: 2041-8213. doi: 10.3847/2041-8213/adde51. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/adde51>>.

- SHKLOVSKII, I. S., SAGAN, C., 1966, *Intelligent Life in the Universe*. San Francisco, Holden-Day, Inc.
- SOLOMON, S. C., SMREKAR, S. E., BINDSCHADLER, D. L., et al., 1992, “Venus tectonics: An overview of Magellan observations”, *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 97, n. E8 (ago.), pp. 13199–13255. ISSN: 0148-0227. doi: 10.1029/92je01418. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/92JE01418>>.
- SRIVASTAVA, A., DOYON, R., BOUCHY, F., et al., 2026. “TOI-4552 b: A new ultra-short period rocky world revealed by NIRPS and TESS”. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2603.18233>>.
- STEFFEN, J. H., GAUDI, B. S., FORD, E. B., et al., 2007. “Detecting and Characterizing Planetary Systems with Transit Timing”. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/0704.0632>>.
- SULLIVAN, K., DATTILO, A., BATALHA, N. M., 2025, “The First Direct Occurrence Rate Estimates for Kepler Exoplanets in Small-separation Binary Star Systems: Planet Occurrence Is Suppressed in Binary Stars”, *The Astronomical Journal*, v. 171, n. 1 (dez.), pp. 53. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/ae2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ae2021>>.
- TOKAR, R. L., JOHNSON, R. E., THOMSEN, M. F., et al., 2012, “Detection of exospheric O₂ at Saturn’s moon Dione”, *Geophysical Research Letters*, v. 39, n. 3 (fev.). ISSN: 1944-8007. doi: 10.1029/2011gl050452. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2011GL050452>>.
- TSIGARIDIS, K., ACKERMAN, A. S., ALEINOV, I., et al., 2025, “ROCKE-3D 2.0: an updated general circulation model for simulating the climates of rocky planets”, *Geoscientific Model Development*, v. 18, n. 17, pp. 5825–5871. ISSN: 1991-9603. doi: 10.5194/gmd-18-5825-2025. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5194/gmd-18-5825-2025>>.
- VALENCIA, D., O’CONNELL, R. J., SASSELOV, D., 2006, “Internal structure of massive terrestrial planets”, *Icarus*, v. 181, n. 2 (abr.), pp. 545–554. ISSN: 0019-1035. doi: 10.1016/j.icarus.2005.11.021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2005.11.021>>.
- WOLSZCZAN, A., FRAIL, D. A., 1992, “A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12”, *Nature*, v. 355, n. 6356 (jan.), pp. 145–147. ISSN: 1476-4687. doi: 10.1038/355145a0. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/355145a0>>.

- YEE, J. C., ZANG, W., UDALSKI, A., et al., 2021, “OGLE-2019-BLG-0960 Lb: the Smallest Microlensing Planet”, *The Astronomical Journal*, v. 162, n. 5 (out.), pp. 180. ISSN: 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/ac1582. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ac1582>>.
- ZAHNLE, K. J., CATLING, D. C., 2017, “The Cosmic Shoreline: The Evidence that Escape Determines which Planets Have Atmospheres, and what this May Mean for Proxima Centauri B”, *The Astrophysical Journal*, v. 843, n. 2, pp. 122. ISSN: 1538-4357. doi: 10.3847/1538-4357/aa7846. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa7846>>.
- ZHANG, Z., LIU, M. C., CLAYTOR, Z. R., et al., 2021, “The Second Discovery from the COCONUTS Program: A Cold Wide-orbit Exoplanet around a Young Field M Dwarf at 10.9 pc”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 916, n. 2, pp. L11. ISSN: 2041-8213. doi: 10.3847/2041-8213/ac1123. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ac1123>>.

Apêndice A

Tabela dos planetas rochosos na ZH Otimista

Tabela A.1: Parâmetros físicos e orbitais dos planetas rochosos na ZH Otimista de suas estrelas hospedeiras

Planeta	P [dias]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
55 Cnc B c	$33,75 \pm 0,04$	$0,13 \pm 0,00$	$0,90 \pm 0,49$	$1,25 \pm 2,17$	$9,30 \pm 22,05$	$230,04 \pm 27,92$
GJ 1002 b	$10,35 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,00$	$1,03 \pm 0,13$	$1,04 \pm 0,11$	$5,33 \pm 2,14$	$252,47 \pm 7,28$
GJ 1002 c	$21,20 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,00$	$1,08 \pm 0,17$	$1,36 \pm 0,17$	$5,97 \pm 2,97$	$198,68 \pm 5,73$
GJ 1061 c	$6,68 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$1,23 \pm 0,18$	$1,81 \pm 0,13$	$5,34 \pm 2,43$	$304,12 \pm 11,98$
GJ 1061 d	$13,07 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$1,14 \pm 0,18$	$1,62 \pm 0,21$	$6,08 \pm 2,97$	$242,03 \pm 9,98$
GJ 180 c	$24,33 \pm 0,06$	$0,13 \pm 0,01$	$0,97 \pm 0,31$	$1,23 \pm 1,02$	$7,51 \pm 9,53$	–
GJ 251 c	$53,65 \pm 0,04$	$0,20 \pm 0,01$	$1,39 \pm 0,26$	$3,54 \pm 1,09$	$7,23 \pm 4,58$	$218,41 \pm 8,51$
GJ 273 b	$18,65 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,00$	$1,27 \pm 0,20$	$2,88 \pm 0,27$	$7,71 \pm 3,75$	$292,47 \pm 14,13$
GJ 3293 d	$48,13 \pm 0,06$	$0,19 \pm 0,00$	$2,07 \pm 0,47$	$7,43 \pm 1,18$	$4,63 \pm 3,24$	$241,22 \pm 8,75$
GJ 357 d	$55,66 \pm 0,06$	$0,20 \pm 0,01$	$1,70 \pm 0,36$	$5,71 \pm 1,01$	$6,42 \pm 4,19$	$217,23 \pm 9,86$
GJ 367 d	$34,37 \pm 0,07$	$0,16 \pm 0,00$	$1,80 \pm 0,28$	$5,95 \pm 0,47$	$5,63 \pm 2,68$	$288,13 \pm 7,13$
GJ 3998 d	$41,78 \pm 0,05$	$0,19 \pm 0,01$	$1,82 \pm 0,41$	$5,93 \pm 1,08$	$5,41 \pm 3,79$	$292,23 \pm 16,23$
GJ 433 d	$36,06 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,01$	$1,56 \pm 0,29$	$4,78 \pm 0,96$	$6,99 \pm 4,20$	$279,71 \pm 4,71$
GJ 514 b	$140,43 \pm 0,41$	$0,42 \pm 0,01$	$1,63 \pm 0,32$	$5,25 \pm 0,81$	$6,62 \pm 4,03$	$195,68 \pm 10,42$
GJ 667 C c	$28,14 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,01$	$1,27 \pm 0,28$	$2,72 \pm 1,35$	$7,24 \pm 6,00$	–
GJ 667 C e	$62,24 \pm 0,55$	$0,21 \pm 0,02$	$1,41 \pm 0,39$	$2,97 \pm 2,02$	$5,86 \pm 6,26$	–
GJ 667 C f	$39,03 \pm 0,20$	$0,16 \pm 0,02$	$0,99 \pm 0,28$	$0,85 \pm 0,98$	$4,83 \pm 6,92$	–
GJ 682 b	$17,48 \pm 0,05$	$0,08 \pm 0,01$	$1,56 \pm 0,43$	$4,11 \pm 1,90$	$5,93 \pm 5,61$	–
GJ 887 d	$50,77 \pm 0,05$	$0,21 \pm 0,01$	$1,77 \pm 0,42$	$5,94 \pm 1,66$	$5,88 \pm 4,47$	$264,23 \pm 9,92$
HD 20794 f	$647,60 \pm 2,60$	$1,35 \pm 0,01$	$1,77 \pm 0,31$	$5,71 \pm 0,54$	$5,64 \pm 3,05$	$214,52 \pm 4,34$
HD 216520 c	$154,43 \pm 0,44$	$0,53 \pm 0,01$	$2,39 \pm 0,52$	$9,20 \pm 1,81$	$3,71 \pm 2,52$	$295,22 \pm 3,32$
HD 40307 g	$197,80 \pm 7,35$	$0,60 \pm 0,03$	$1,88 \pm 0,57$	$6,44 \pm 2,72$	$5,35 \pm 5,38$	$261,19 \pm 12,51$
HN Lib b	$36,12 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,00$	$1,66 \pm 0,34$	$5,32 \pm 0,86$	$6,42 \pm 4,13$	$234,44 \pm 5,32$
K2-18 b	$32,94 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	$2,37 \pm 0,22$	$8,92 \pm 1,65$	$4,11 \pm 1,45$	$282,71 \pm 14,81$
K2-288 B b	$31,39 \pm 0,00$	$0,16 \pm 0,03$	$1,72 \pm 0,31$	$4,93 \pm 2,50$	$5,36 \pm 4,01$	$225,04 \pm 29,67$
K2-3 d	$44,56 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,00$	$1,46 \pm 0,05$	$2,20 \pm 3,25$	$5,62 \pm 6,50$	$305,20 \pm 7,30$

Continua na próxima página

Tabela A.1 – continuação da página anterior

Planeta	P [dias]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
K2-332 b	$17,71 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$2,21 \pm 0,17$	$8,33 \pm 2,00$	$4,25 \pm 1,41$	$288,55 \pm 15,00$
K2-72 e	$24,16 \pm 0,00$	$0,11 \pm 0,01$	$1,28 \pm 0,13$	$3,23 \pm 1,52$	$8,40 \pm 4,67$	$286,34 \pm 21,11$
K2-9 b	$18,45 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,01$	$2,26 \pm 0,58$	$8,61 \pm 3,73$	$4,11 \pm 3,62$	$301,71 \pm 60,18$
Kepler-1229 b	$86,83 \pm 0,00$	$0,29 \pm 0,01$	$1,40 \pm 0,11$	$3,53 \pm 1,44$	$7,12 \pm 3,38$	$242,02 \pm 8,04$
Kepler-1410 b	$60,87 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,00$	$1,76 \pm 0,15$	$5,98 \pm 2,26$	$6,01 \pm 2,73$	$307,54 \pm 11,08$
Kepler-1512 b	$20,36 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$1,20 \pm 0,08$	$2,36 \pm 1,18$	$7,63 \pm 4,13$	$479,71 \pm 16,93$
Kepler-1544 b	$168,81 \pm 0,00$	$0,54 \pm 0,01$	$1,79 \pm 0,07$	$6,38 \pm 1,33$	$6,17 \pm 1,51$	$275,81 \pm 5,23$
Kepler-1606 b	$196,44 \pm 0,00$	$0,64 \pm 0,01$	$2,03 \pm 0,20$	$6,92 \pm 1,82$	$4,56 \pm 1,79$	$303,67 \pm 11,96$
Kepler-1649 c	$19,54 \pm 0,00$	0,06	$0,97 \pm 0,12$	$0,57 \pm 0,43$	$3,46 \pm 2,92$	$295,20 \pm 6,37$
Kepler-1652 b	$38,10 \pm 0,00$	$0,17 \pm 0,01$	$1,47 \pm 0,17$	$2,38 \pm 1,30$	$4,15 \pm 2,69$	$266,60 \pm 14,56$
Kepler-1653 b	$140,25 \pm 0,00$	$0,47 \pm 0,01$	$2,14 \pm 0,20$	$7,50 \pm 2,25$	$4,24 \pm 1,75$	$281,29 \pm 8,28$
Kepler-1701 b	$169,13 \pm 0,00$	$0,57 \pm 0,00$	$2,11 \pm 0,50$	$6,82 \pm 4,15$	$3,99 \pm 3,74$	$301,56 \pm 26,98$
Kepler-174 d	$247,35 \pm 0,00$	0,68	$2,19 \pm 0,12$	$7,99 \pm 1,79$	$4,21 \pm 1,18$	$225,56 \pm 8,22$
Kepler-186 f	$129,94 \pm 0,00$	$0,43 \pm 0,11$	$1,16 \pm 0,08$	$1,78 \pm 1,50$	$6,30 \pm 5,46$	$199,23 \pm 26,60$
Kepler-22 b	$289,86 \pm 0,00$	$0,81 \pm 0,01$	$2,10 \pm 0,12$	9,10	5,20	$279,15 \pm 4,08$
Kepler-283 c	$92,74 \pm 0,00$	0,34	$1,81 \pm 0,13$	$5,50 \pm 2,07$	$5,14 \pm 2,22$	$270,31 \pm 8,45$
Kepler-296 e	$34,14 \pm 0,00$	$0,17 \pm 0,03$	$1,16 \pm 0,18$	$1,07 \pm 0,63$	4,10	$303,94 \pm 36,81$
Kepler-296 f	$63,34 \pm 0,00$	$0,26 \pm 0,04$	$1,58 \pm 0,42$	$2,31 \pm 2,22$	3,20	$247,43 \pm 29,80$
Kepler-440 b	$101,11 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,05$	$1,79 \pm 0,18$	$5,73 \pm 1,64$	$5,46 \pm 2,25$	$302,97 \pm 37,09$
Kepler-442 b	$112,31 \pm 0,00$	$0,41 \pm 0,13$	$1,30 \pm 0,14$	$2,36 \pm 1,63$	$5,95 \pm 4,56$	$256,67 \pm 42,90$
Kepler-443 b	$177,67 \pm 0,00$	$0,49 \pm 0,13$	$2,29 \pm 0,20$	$7,85 \pm 1,88$	$3,59 \pm 1,28$	$271,99 \pm 36,66$
Kepler-452 b	$384,84 \pm 0,01$	$1,05 \pm 0,02$	$1,51 \pm 0,19$	$3,58 \pm 1,68$	$5,68 \pm 3,40$	$285,97 \pm 16,19$
Kepler-51 e	$264,28 \pm 0,91$	$0,80 \pm 0,01$	$1,66 \pm 0,37$	$4,94 \pm 1,48$	$5,95 \pm 4,32$	$286,20 \pm 7,04$
Kepler-62 e	$122,39 \pm 0,00$	$0,43 \pm 0,00$	$1,60 \pm 0,05$	$4,70 \pm 2,11$	$6,26 \pm 2,87$	$290,75 \pm 6,29$
Kepler-62 f	$267,29 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,01$	$1,41 \pm 0,07$	$3,36 \pm 1,60$	$6,62 \pm 3,29$	$224,22 \pm 4,86$
Kepler-705 b	$56,06 \pm 0,00$	$0,23 \pm 0,00$	$2,12 \pm 0,08$	$7,41 \pm 1,57$	$4,31 \pm 1,04$	$269,55 \pm 5,00$
Kepler-725 c	$207,54 \pm 0,30$	$0,67 \pm 0,00$	$2,49 \pm 0,63$	$9,50 \pm 2,52$	$3,39 \pm 2,72$	$297,17 \pm 7,64$
L 98-59 f	$23,06 \pm 0,06$	$0,11 \pm 0,00$	$1,40 \pm 0,14$	$2,72 \pm 0,33$	$5,00 \pm 2,05$	$285,18 \pm 7,28$
LHS 1140 b	$24,74 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$1,73 \pm 0,03$	$5,60 \pm 0,19$	$5,90 \pm 0,30$	$225,54 \pm 4,33$
LP 890-9 c	$8,46 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$1,36 \pm 0,05$	$2,74 \pm 1,06$	$5,99 \pm 2,41$	$271,60 \pm 10,39$
Proxima Cen b	$11,18 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,99 \pm 0,17$	$1,05 \pm 0,05$	$5,94 \pm 3,01$	$238,48 \pm 19,58$
Ross 128 b	$9,87 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,00$	$1,09 \pm 0,18$	$1,38 \pm 0,20$	$5,88 \pm 2,98$	$306,52 \pm 9,84$
Ross 508 b	$10,77 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,00$	$1,48 \pm 0,23$	$3,93 \pm 0,53$	$6,66 \pm 3,27$	$293,86 \pm 5,33$
TOI-1266 d	$32,51 \pm 0,06$	$0,15 \pm 0,00$	$1,37 \pm 0,28$	$3,40 \pm 1,22$	$7,30 \pm 5,14$	$287,34 \pm 7,13$
TOI-2094 b	$18,79 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	$1,90 \pm 0,10$	$6,50 \pm 1,68$	$5,25 \pm 1,58$	$278,33 \pm 13,89$
TOI-2257 b	$35,19 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,00$	$2,20 \pm 0,12$	$8,21 \pm 2,12$	$4,27 \pm 1,29$	$243,00 \pm 11,18$
TOI-700 d	$37,42 \pm 0,00$	$0,16 \pm 0,00$	$1,07 \pm 0,06$	$1,43 \pm 0,87$	$6,43 \pm 4,05$	$267,81 \pm 7,49$
TOI-700 e	$27,81 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,94 \pm 0,08$	$0,65 \pm 0,45$	$4,24 \pm 3,18$	$295,65 \pm 8,27$
TOI-715 b	$19,29 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$1,54 \pm 0,06$	$3,69 \pm 1,36$	$5,60 \pm 2,18$	$252,14 \pm 9,71$
TOI-7166 b	$12,92 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$2,01 \pm 0,06$	$6,34 \pm 1,49$	$4,33 \pm 1,08$	$282,98 \pm 5,69$
TOI-904 c	$84,00 \pm 0,00$	$0,31 \pm 0,04$	$2,17 \pm 0,12$	$8,14 \pm 1,66$	$4,39 \pm 1,15$	$236,28 \pm 16,63$
TRAPPIST-1 d	$4,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,79 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,01$	$4,37 \pm 0,16$	$286,26 \pm 3,51$
TRAPPIST-1 e	$6,10 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,92 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,02$	$4,90 \pm 0,17$	$249,78 \pm 11,05$
TRAPPIST-1 f	$9,21 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$1,04 \pm 0,01$	$1,04 \pm 0,03$	$5,02 \pm 0,15$	$217,75 \pm 2,67$

Continua na próxima página

Tabela A.1 – continuação da página anterior

Planeta	P [dias]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TRAPPIST-1 g	$12,35 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$1,13 \pm 0,01$	$1,32 \pm 0,04$	$5,06 \pm 0,15$	$197,41 \pm 2,42$
Teegarden's Star b	$4,91 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$1,03 \pm 0,17$	$1,14 \pm 0,12$	$5,69 \pm 2,87$	$314,91 \pm 17,22$
Teegarden's Star c	$11,42 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,99 \pm 0,15$	$1,02 \pm 0,12$	$5,71 \pm 2,71$	$237,59 \pm 13,04$
Wolf 1061 c	$17,87 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,00$	$1,35 \pm 0,24$	$3,38 \pm 0,39$	$7,59 \pm 4,07$	$299,31 \pm 14,76$
Wolf 1069 b	$15,56 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,00$	$1,11 \pm 0,15$	$1,28 \pm 0,18$	$5,18 \pm 2,23$	$250,13 \pm 6,63$

O símbolo – denota parâmetros não informados no NEA

Alguns parâmetros não tem erro informado no NEA.

Apêndice B

Tabela das estrelas hospedeiras dos planetas rochosos na ZH Otimista

Tabela B.1: Parâmetros Estelares de hospedeiras de planetas em sua ZH Otimista

Estrela	T_{eff} [K]	Fe/H [dex]	$\log g$ [dex]	R_* [$R_{\odot}$]	M_* [$M_{\odot}$]	L_* [$L_{\odot}$]
55 Cnc	$3286,00 \pm 31,00$	$0,16 \pm 0,10$	$4,86 \pm 0,05$	$0,27 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,00$
GJ 1002	$3024,00 \pm 52,00$	$-0,25 \pm 0,19$	$5,10 \pm 0,06$	$0,14 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$
GJ 1061	$2953,00 \pm 98,00$	$-0,08 \pm 0,08$	–	$0,16 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$
GJ 180	3371	–	–	–	0,43	0,01
GJ 251	$3342,00 \pm 24,00$	$0,07 \pm 0,07$	$4,87 \pm 0,05$	$0,36 \pm 0,01$	$0,35 \pm 0,04$	$0,02 \pm 0,00$
GJ 273	$3382,00 \pm 49,00$	$0,09 \pm 0,17$	–	$0,29 \pm 0,03$	0,29	$0,01 \pm 0,01$
GJ 3293	$3466,00 \pm 49,00$	$0,02 \pm 0,09$	–	$0,40 \pm 0,03$	0,42	$0,02 \pm 0,00$
GJ 357	$3505,00 \pm 51,00$	$-0,12 \pm 0,16$	$4,94 \pm 0,07$	$0,34 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,00$
GJ 367	$3522,00 \pm 70,00$	$-0,01 \pm 0,12$	$4,78 \pm 0,03$	$0,46 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,00$
GJ 3998	$3726,00 \pm 68,00$	$-0,13 \pm 0,09$	$4,75 \pm 0,04$	$0,50 \pm 0,05$	$0,52 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,01$
GJ 433	3461	-0,22	4,81	0,50	0,48	0,02
GJ 514	$3728,00 \pm 68,00$	$-0,14 \pm 0,09$	$4,76 \pm 0,04$	$0,50 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,01$
GJ 667	$3350,00 \pm 50,00$	$-0,55 \pm 0,10$	$4,69 \pm 0,10$	–	$0,33 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,00$
GJ 682	3028	–	–	–	0,27	0,00
GJ 887	$3688,00 \pm 86,00$	$-0,06 \pm 0,08$	$4,16 \pm 0,04$	$0,47 \pm 0,02$	$0,49 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,00$
HD 20794	$5368,00 \pm 64,00$	$-0,42 \pm 0,02$	$4,39 \pm 0,03$	$0,93 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,00$
HD 216520	$5103,00 \pm 20,00$	-0,16	$4,54 \pm 0,03$	$0,76 \pm 0,01$	$0,82 \pm 0,04$	$0,35 \pm 0,00$
HD 40307	$4956,00 \pm 50,00$	$-0,31 \pm 0,03$	$4,47 \pm 0,16$	$0,72 \pm 0,05$	$0,77 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,03$
HN Lib	$3347,00 \pm 50,00$	$-0,18 \pm 0,15$	$4,76 \pm 0,13$	$0,30 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,00$
K2-18	$3457,00 \pm 39,00$	$0,12 \pm 0,16$	$4,79 \pm 0,01$	$0,41 \pm 0,04$	$0,36 \pm 0,05$	$0,03 \pm 0,00$
K2-288	$3341,00 \pm 276,00$	$-0,21 \pm 0,09$	$4,96 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,03$	$0,33 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,00$
K2-3	$3844,00 \pm 62,00$	$-0,16 \pm 0,08$	$4,70 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,00$
K2-332	$3315,00 \pm 144,50$	$0,09 \pm 0,16$	$4,97 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,00$
K2-72	$3360,47 \pm 86,79$	–	$5,05 \pm 0,07$	$0,33 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,08$	$0,01 \pm 0,00$
K2-9	$3390,00 \pm 150,00$	$-0,25 \pm 0,20$	$4,82 \pm 0,07$	$0,31 \pm 0,11$	$0,30 \pm 0,14$	$0,01 \pm 0,01$
Kepler-1229	$3784,00 \pm 38,74$	$-0,06 \pm 0,10$	$4,75 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,03$	$0,54 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,01$
Kepler-1410	$4092,00 \pm 89,05$	$0,01 \pm 0,15$	$4,67 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,03$	$0,63 \pm 0,04$	$0,07 \pm 0,01$

Continua na próxima página

Tabela B.1 – continuada da página anterior

Estrela	T_{eff} [K]	Fe/H [dex]	$\log g$ [dex]	R_* [$R_{\odot}$]	M_* [$M_{\odot}$]	L_* [$L_{\odot}$]
Kepler-1512	4372,00 $\pm$ 61,42	0,20 $\pm$ 0,25	4,64 $\pm$ 0,01	0,67 $\pm$ 0,04	0,73 $\pm$ 0,06	0,02 $\pm$ 0,01
Kepler-1544	4886,00 $\pm$ 65,28	0,02 $\pm$ 0,11	4,61 $\pm$ 0,01	0,74 $\pm$ 0,02	0,81 $\pm$ 0,03	0,27 $\pm$ 0,04
Kepler-1606	5422,00 $\pm$ 61,68	0,01 $\pm$ 0,15	4,53 $\pm$ 0,06	0,86 $\pm$ 0,06	0,90 $\pm$ 0,04	0,52 $\pm$ 0,12
Kepler-1649	3240,00 $\pm$ 61,00	-0,15 $\pm$ 0,11	5,00 $\pm$ 0,02	0,23 $\pm$ 0,00	0,20 $\pm$ 0,01	0,01 $\pm$ 0,00
Kepler-1652	3638,00 $\pm$ 51,00	-0,30 $\pm$ 0,12	4,88 $\pm$ 0,04	0,38 $\pm$ 0,04	0,40 $\pm$ 0,04	0,02 $\pm$ 0,01
Kepler-1653	4807,00 $\pm$ 100,00	-0,18 $\pm$ 0,10	4,62 $\pm$ 0,02	0,69 $\pm$ 0,03	0,72 $\pm$ 0,03	0,23 $\pm$ 0,04
Kepler-1701	5146,00 $\pm$ 25,00	0,03 $\pm$ 0,10	4,53 $\pm$ 0,11	0,84 $\pm$ 0,15	0,87 $\pm$ 0,09	0,45
Kepler-174	4880,00 $\pm$ 126,00	-0,44 $\pm$ 0,10	4,68 $\pm$ 0,15	0,62 $\pm$ 0,03	0,76 $\pm$ 0,02	0,27
Kepler-186	3755,00 $\pm$ 90,00	-0,26 $\pm$ 0,12	4,74 $\pm$ 0,02	0,52 $\pm$ 0,02	0,54 $\pm$ 0,02	0,05 $\pm$ 0,01
Kepler-22	5596,00 $\pm$ 61,00	-0,26 $\pm$ 0,07	4,44 $\pm$ 0,03	0,87 $\pm$ 0,01	0,86 $\pm$ 0,05	0,65 $\pm$ 0,02
Kepler-283	4351,00 $\pm$ 100,00	-0,37 $\pm$ 0,14	4,72 $\pm$ 0,15	0,57 $\pm$ 0,02	0,66 $\pm$ 0,12	0,12 $\pm$ 0,01
Kepler-296	3740,00 $\pm$ 130,00	-0,08 $\pm$ 0,29	4,77 $\pm$ 0,07	0,48 $\pm$ 0,08	0,50 $\pm$ 0,08	0,03 $\pm$ 0,01
Kepler-440	4134,00 $\pm$ 154,00	-0,30 $\pm$ 0,15	4,71 $\pm$ 0,03	0,56 $\pm$ 0,04	0,57 $\pm$ 0,04	0,08 $\pm$ 0,02
Kepler-442	4402,00 $\pm$ 100,00	-0,37 $\pm$ 0,10	4,67 $\pm$ 0,02	0,60 $\pm$ 0,02	0,61 $\pm$ 0,03	0,12 $\pm$ 0,02
Kepler-443	4723,00 $\pm$ 100,00	-0,01 $\pm$ 0,10	4,61 $\pm$ 0,02	0,71 $\pm$ 0,03	0,74 $\pm$ 0,03	0,22 $\pm$ 0,03
Kepler-452	5757,00 $\pm$ 85,00	0,21 $\pm$ 0,09	4,32 $\pm$ 0,09	1,11 $\pm$ 0,12	1,04 $\pm$ 0,05	1,21 $\pm$ 0,05
Kepler-51	5674	0,05	4,51	0,87 $\pm$ 0,04	0,96 $\pm$ 0,05	0,72
Kepler-62	4925,00 $\pm$ 70,00	-0,37 $\pm$ 0,04	4,68 $\pm$ 0,04	0,64 $\pm$ 0,02	0,69 $\pm$ 0,02	0,21 $\pm$ 0,02
Kepler-705	3722,00 $\pm$ 31,42	0,07 $\pm$ 0,07	4,75 $\pm$ 0,01	0,51 $\pm$ 0,02	0,53 $\pm$ 0,02	0,05 $\pm$ 0,01
Kepler-725	5395,00 $\pm$ 64,00	-0,08	4,55	0,88 $\pm$ 0,04	0,95 $\pm$ 0,01	0,49
L 98-59	3415,00 $\pm$ 60,00	-0,46 $\pm$ 0,26	4,91 $\pm$ 0,02	0,32 $\pm$ 0,01	0,29 $\pm$ 0,01	0,01 $\pm$ 0,00
LHS 1140	3096,00 $\pm$ 48,00	-0,15 $\pm$ 0,09	5,04 $\pm$ 0,02	0,22 $\pm$ 0,00	0,18 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00
LP 890-9	2850,00 $\pm$ 75,00	-0,03 $\pm$ 0,09	5,13 $\pm$ 0,05	0,16 $\pm$ 0,01	0,12 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00
Proxima Cen	2900,00 $\pm$ 100,00	–	–	0,14 $\pm$ 0,02	0,12 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00
Ross 128	3192,00 $\pm$ 60,00	-0,02 $\pm$ 0,08	–	0,20 $\pm$ 0,01	0,17 $\pm$ 0,02	0,00 $\pm$ 0,00
Ross 508	3071,00 $\pm$ 28,00	-0,20 $\pm$ 0,20	5,04 $\pm$ 0,03	0,21 $\pm$ 0,01	0,18 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00
TOI-1266	3563,00 $\pm$ 77,00	-0,11 $\pm$ 0,09	4,83 $\pm$ 0,02	0,42 $\pm$ 0,01	0,44 $\pm$ 0,02	0,03 $\pm$ 0,00
TOI-2094	3435,00 $\pm$ 60,00	-0,06 $\pm$ 0,02	4,89 $\pm$ 0,04	0,38 $\pm$ 0,02	0,42 $\pm$ 0,06	0,02 $\pm$ 0,00
TOI-2257	3430,00 $\pm$ 130,00	-0,27 $\pm$ 0,37	4,97 $\pm$ 0,05	0,31 $\pm$ 0,01	0,33 $\pm$ 0,02	0,01 $\pm$ 0,00
TOI-700	3459,00 $\pm$ 65,00	-0,07 $\pm$ 0,11	4,81 $\pm$ 0,04	0,42 $\pm$ 0,02	0,41 $\pm$ 0,02	0,02 $\pm$ 0,00
TOI-715	3075,00 $\pm$ 75,00	-0,25 $\pm$ 0,25	5,00 $\pm$ 0,20	0,24 $\pm$ 0,01	0,23 $\pm$ 0,01	0,00 $\pm$ 0,00
TOI-7166	3099,00 $\pm$ 50,50	-0,20 $\pm$ 0,12	5,02 $\pm$ 0,02	0,22 $\pm$ 0,01	0,19 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00
TOI-904	3770,20 $\pm$ 70,00	0,02 $\pm$ 0,09	4,62 $\pm$ 0,24	0,53 $\pm$ 0,02	0,56 $\pm$ 0,03	0,05 $\pm$ 0,01
TRAPPIST-1	2566,00 $\pm$ 26,00	0,04 $\pm$ 0,08	5,24 $\pm$ 0,01	0,12 $\pm$ 0,00	0,09 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00
Teegarden's Star	3034,00 $\pm$ 45,00	-0,11 $\pm$ 0,28	5,19 $\pm$ 0,20	0,12 $\pm$ 0,01	0,10 $\pm$ 0,01	0,00 $\pm$ 0,00
Wolf 1061	3342,00 $\pm$ 49,00	-0,09 $\pm$ 0,09	–	0,31 $\pm$ 0,03	0,29	0,01 $\pm$ 0,01
Wolf 1069	3158,00 $\pm$ 54,00	0,07 $\pm$ 0,19	4,93 $\pm$ 0,06	0,18 $\pm$ 0,01	0,17 $\pm$ 0,01	0,00 $\pm$ 0,00

O símbolo – denota parâmetros não informados no NEA

Alguns parâmetros não tem erro informado no NEA.

Apêndice C

Tabela de planetas rochosos na ZH da sua estrela hospedeira com os limites das ZHO e ZHC

Na Tabela a coluna ZH RV, indicam o limite interno da zona habitável otimista (Vênus Recente) e a coluna ZH EM, indicam o limite externo da zona habitável otimista (Marte Jovem). A coluna ZH RG, indicam o limite interno da zona habitável conservadora (Efeito Estufa Irreversível) e a coluna ZH MG, indicam o limite interno da zona habitável conservadora (Efeito Estufa Máximo). As colunas ZHO e ZHC, indicam se o planeta está Dentro ou Fora da Zona Habitável Otimista ou Zona Habitável Conservadora, respectivamente.

Tabela C.1: Tabela de planetas rochosos na ZH da sua estrela hospedeira com os limites das ZHO e ZHC

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
55 Cnc B c	$0,13 \pm 0,00$	$0,07 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,05$	$0,09 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,04$	Dentro	Dentro
GJ 1002 b	$0,05 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
GJ 1002 c	$0,07 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
GJ 1061 d	$0,05 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
GJ 180 c	$0,13 \pm 0,01$	0,09	0,24	0,12	0,23	Dentro	Dentro
GJ 251 c	$0,20 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,00$	$0,27 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
GJ 3293 d	$0,19 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,03$	Dentro	Dentro
GJ 357 d	$0,20 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,00$	$0,27 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
GJ 433 d	$0,18 \pm 0,01$	0,12	0,30	0,14	0,29	Dentro	Dentro
GJ 667 C c	$0,12 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,01$	Dentro	Dentro
GJ 667 C e	$0,21 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,01$	Dentro	Dentro
GJ 667 C f	$0,16 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,01$	Dentro	Dentro
GJ 682 b	$0,08 \pm 0,01$	0,04	0,10	0,04	0,09	Dentro	Dentro
GJ 887 d	$0,21 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,01$	$0,38 \pm 0,02$	Dentro	Dentro
HD 20794 f	$1,35 \pm 0,01$	$0,64 \pm 0,00$	$1,52 \pm 0,01$	$0,78 \pm 0,00$	$1,44 \pm 0,01$	Dentro	Dentro
HD 40307 g	$0,60 \pm 0,03$	$0,38 \pm 0,03$	$0,91 \pm 0,06$	$0,46 \pm 0,03$	$0,86 \pm 0,06$	Dentro	Dentro
HN Lib b	$0,14 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,22 \pm 0,00$	$0,10 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

Planeta	a [au]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
K2-288 B b	$0,16 \pm 0,03$	$0,09 \pm 0,00$	$0,23 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,00$	$0,22 \pm 0,01$	Dentro	Dentro
Kepler-1229 b	$0,29 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,02$	$0,50 \pm 0,06$	$0,24 \pm 0,03$	$0,48 \pm 0,06$	Dentro	Dentro
Kepler-1544 b	$0,54 \pm 0,01$	$0,41 \pm 0,03$	$0,99 \pm 0,08$	$0,50 \pm 0,04$	$0,94 \pm 0,07$	Dentro	Dentro
Kepler-1652 b	$0,17 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,04$	$0,16 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,04$	Dentro	Dentro
Kepler-174 d	0,68	0,41	0,99	0,50	0,94	Dentro	Dentro
Kepler-186 f	$0,43 \pm 0,11$	$0,19 \pm 0,01$	$0,49 \pm 0,04$	$0,24 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,03$	Dentro	Dentro
Kepler-22 b	$0,81 \pm 0,01$	$0,61 \pm 0,01$	$1,44 \pm 0,02$	$0,75 \pm 0,01$	$1,37 \pm 0,02$	Dentro	Dentro
Kepler-296 f	$0,26 \pm 0,04$	$0,13 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,03$	Dentro	Dentro
Kepler-442 b	$0,41 \pm 0,13$	$0,27 \pm 0,02$	$0,68 \pm 0,06$	$0,35 \pm 0,03$	$0,65 \pm 0,05$	Dentro	Dentro
Kepler-443 b	$0,49 \pm 0,13$	$0,37 \pm 0,03$	$0,90 \pm 0,07$	$0,45 \pm 0,04$	$0,86 \pm 0,07$	Dentro	Dentro
Kepler-62 f	$0,72 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,02$	$0,87 \pm 0,04$	$0,44 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,04$	Dentro	Dentro
LHS 1140 b	$0,09 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,01$	Dentro	Dentro
LP 890-9 c	$0,04 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
Proxima Cen b	$0,05 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
TOI-2257 b	$0,14 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,02$	Dentro	Dentro
TOI-700 d	$0,16 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,02$	$0,16 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,02$	Dentro	Dentro
TOI-715 b	$0,08 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,15 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	Dentro	Dentro
TOI-904 c	$0,31 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,03$	$0,45 \pm 0,05$	Dentro	Dentro
TRAPPIST-1 e	$0,03 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
TRAPPIST-1 f	$0,04 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
TRAPPIST-1 g	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
Teegarden's Star c	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
Wolf 1069 b	$0,07 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,11 \pm 0,00$	Dentro	Dentro
GJ 1061 c	$0,03 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	Dentro	Fora
GJ 273 b	$0,09 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,04$	$0,20 \pm 0,10$	$0,10 \pm 0,05$	$0,19 \pm 0,09$	Dentro	Fora
GJ 367 d	$0,16 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,02$	$0,17 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,02$	Dentro	Fora
GJ 3998 d	$0,19 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,04$	$0,21 \pm 0,02$	$0,42 \pm 0,04$	Dentro	Fora
GJ 514 b	$0,42 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,02$	$0,43 \pm 0,05$	$0,21 \pm 0,02$	$0,41 \pm 0,04$	Dentro	Fora
HD 216520 c	$0,53 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,00$	$1,12 \pm 0,01$	$0,57 \pm 0,00$	$1,06 \pm 0,01$	Dentro	Fora
K2-18 b	$0,14 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,03$	$0,16 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,03$	Dentro	Fora
K2-3 d	$0,20 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,00$	$0,50 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,00$	$0,48 \pm 0,01$	Dentro	Fora
K2-332 b	$0,09 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,03$	$0,09 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,02$	Dentro	Fora
K2-72 e	$0,11 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,02$	Dentro	Fora
K2-9 b	$0,09 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,14$	$0,11 \pm 0,07$	$0,22 \pm 0,13$	Dentro	Fora
Kepler-1410 b	$0,25 \pm 0,00$	$0,21 \pm 0,02$	$0,54 \pm 0,04$	$0,26 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,04$	Dentro	Fora
Kepler-1512 b	$0,13 \pm 0,00$	$0,11 \pm 0,02$	$0,28 \pm 0,06$	$0,14 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,06$	Dentro	Fora
Kepler-1606 b	$0,64 \pm 0,01$	$0,56 \pm 0,06$	$1,32 \pm 0,15$	$0,68 \pm 0,08$	$1,25 \pm 0,15$	Dentro	Fora
Kepler-1649 c	0,06	$0,06 \pm 0,00$	$0,15 \pm 0,00$	$0,07 \pm 0,00$	$0,15 \pm 0,00$	Dentro	Fora
Kepler-1653 b	$0,47 \pm 0,01$	$0,38 \pm 0,03$	$0,93 \pm 0,07$	$0,46 \pm 0,04$	$0,88 \pm 0,07$	Dentro	Fora
Kepler-1701 b	$0,57 \pm 0,00$	0,52	1,25	0,64	1,18	Dentro	Fora
Kepler-283 c	0,34	$0,28 \pm 0,02$	$0,68 \pm 0,04$	$0,34 \pm 0,02$	$0,65 \pm 0,04$	Dentro	Fora
Kepler-296 e	$0,17 \pm 0,03$	$0,13 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,03$	Dentro	Fora
Kepler-440 b	$0,24 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,03$	$0,57 \pm 0,08$	$0,28 \pm 0,04$	$0,54 \pm 0,08$	Dentro	Fora
Kepler-452 b	$1,05 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,02$	$1,95 \pm 0,04$	$1,01 \pm 0,02$	$1,85 \pm 0,04$	Dentro	Fora
Kepler-51 e	$0,80 \pm 0,01$	0,64	1,52	0,78	1,44	Dentro	Fora
Kepler-62 e	$0,43 \pm 0,00$	$0,36 \pm 0,02$	$0,87 \pm 0,04$	$0,44 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,04$	Dentro	Fora

Planeta	a [au]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-705 b	$0,23 \pm 0,00$	$0,18 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,03$	$0,43 \pm 0,05$	Dentro	Fora
Kepler-725 c	$0,67 \pm 0,00$	0,54	1,28	0,65	1,21	Dentro	Fora
L 98-59 f	$0,11 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,00$	$0,22 \pm 0,01$	Dentro	Fora
Ross 128 b	$0,05 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	Dentro	Fora
Ross 508 b	$0,05 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,00$	Dentro	Fora
TOI-1266 d	$0,15 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,34 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,00$	$0,32 \pm 0,00$	Dentro	Fora
TOI-2094 b	$0,14 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,00$	$0,29 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,01$	Dentro	Fora
TOI-700 e	$0,13 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,02$	$0,16 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,02$	Dentro	Fora
TOI-7166 b	$0,06 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,01$	Dentro	Fora
TRAPPIST-1 d	$0,02 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	Dentro	Fora
Teegarden's Star b	$0,03 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	Dentro	Fora
Wolf 1061 c	$0,09 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,08$	$0,10 \pm 0,04$	$0,21 \pm 0,08$	Dentro	Fora

O símbolo – denota parâmetros não informados no NEA

Alguns parâmetros não tem erro informado no NEA.

Apêndice D

Tabelas e Diagramas dos planetas
rochosos na ZH da sua estrelas
hospedeiras

D.1 55 Cnc B c

O exoplaneta 55 Cnc B c está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
55 Cnc B c	$33,75 \pm 0,04$	$0,13 \pm 0,00$	$0,90 \pm 0,49$	$1,2 \pm 2,2$	9 ± 22	230 ± 28

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
55 Cnc B	3286 ± 31	$0,16 \pm 0,10$	$4,86 \pm 0,05$	$0,27 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
55 Cnc B c	$0,13 \pm 0,00$	$0,07 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,04$	$0,09 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,04$	Dentro	Dentro

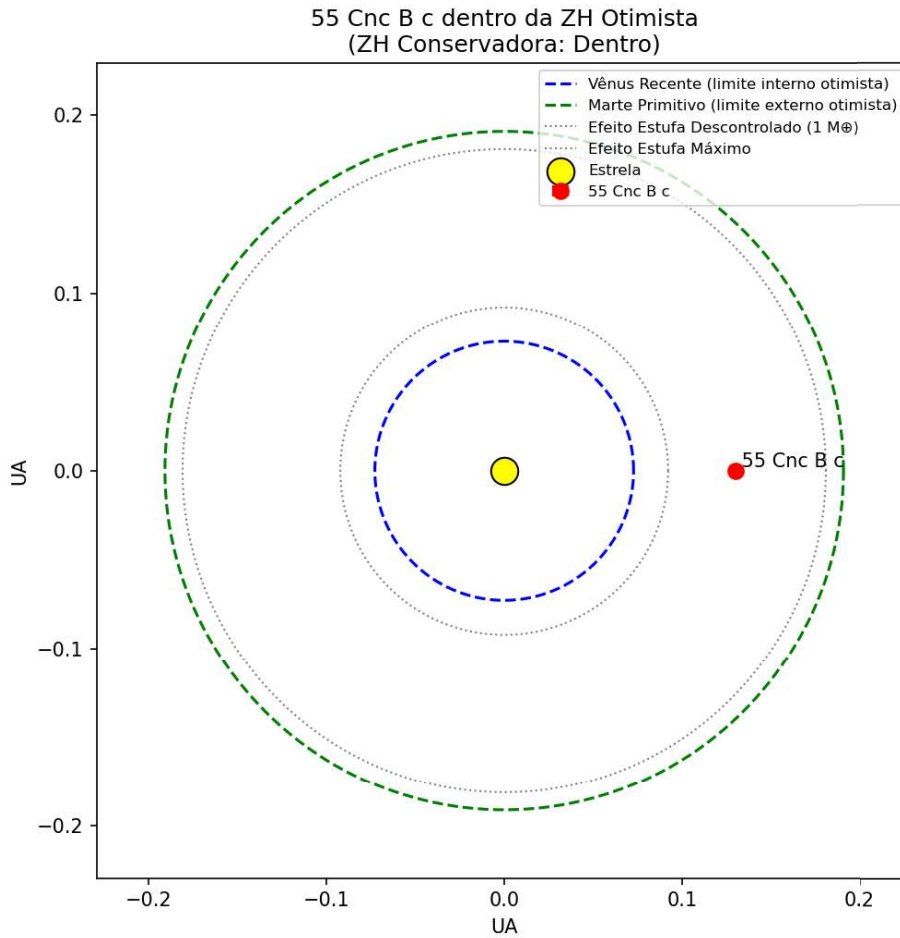


Figura D.1: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta 55 Cnc B c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

55 Cnc B c está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

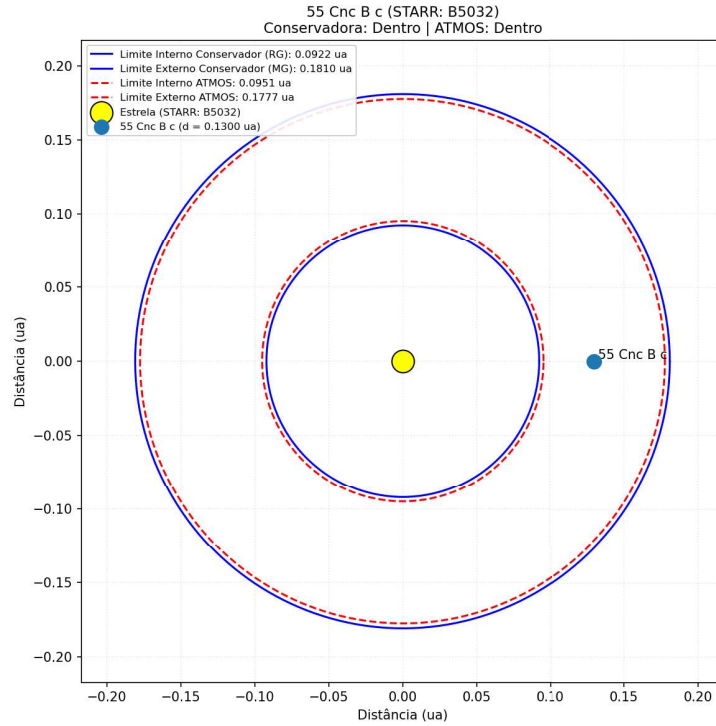


Figura D.2: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta 55 Cnc B c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

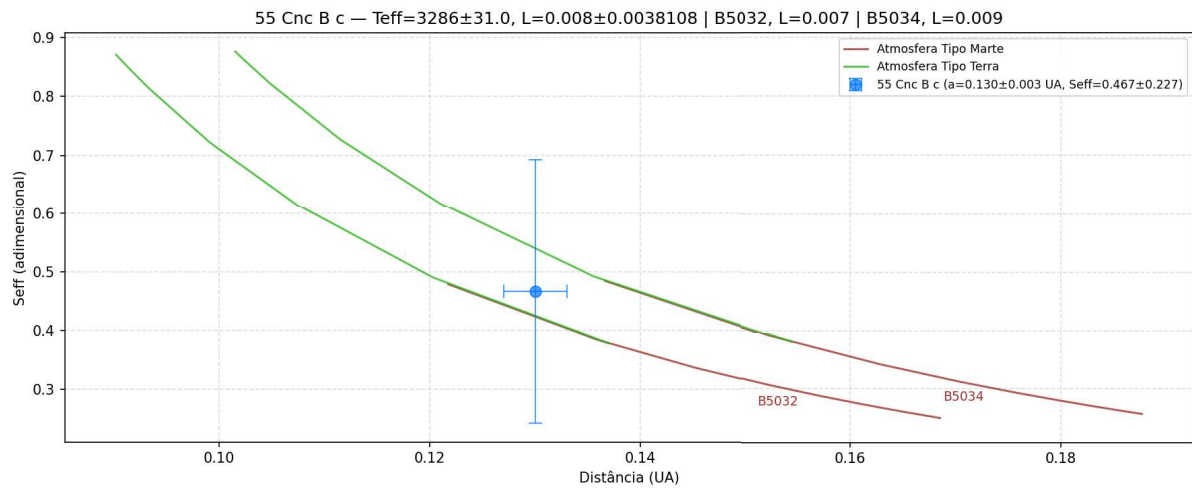


Figura D.3: Análise atmosférica de 55 Cnc B c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.2 GJ 1002 b

O exoplaneta GJ 1002 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 1002 b	$10,35 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,00$	$1,03 \pm 0,13$	$1,04 \pm 0,11$	$5,3 \pm 2,1$	$252,5 \pm 7,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 1002	3024 ± 52	$-0,25 \pm 0,19$	$5,10 \pm 0,06$	$0,14 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 1002 b	$0,05 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

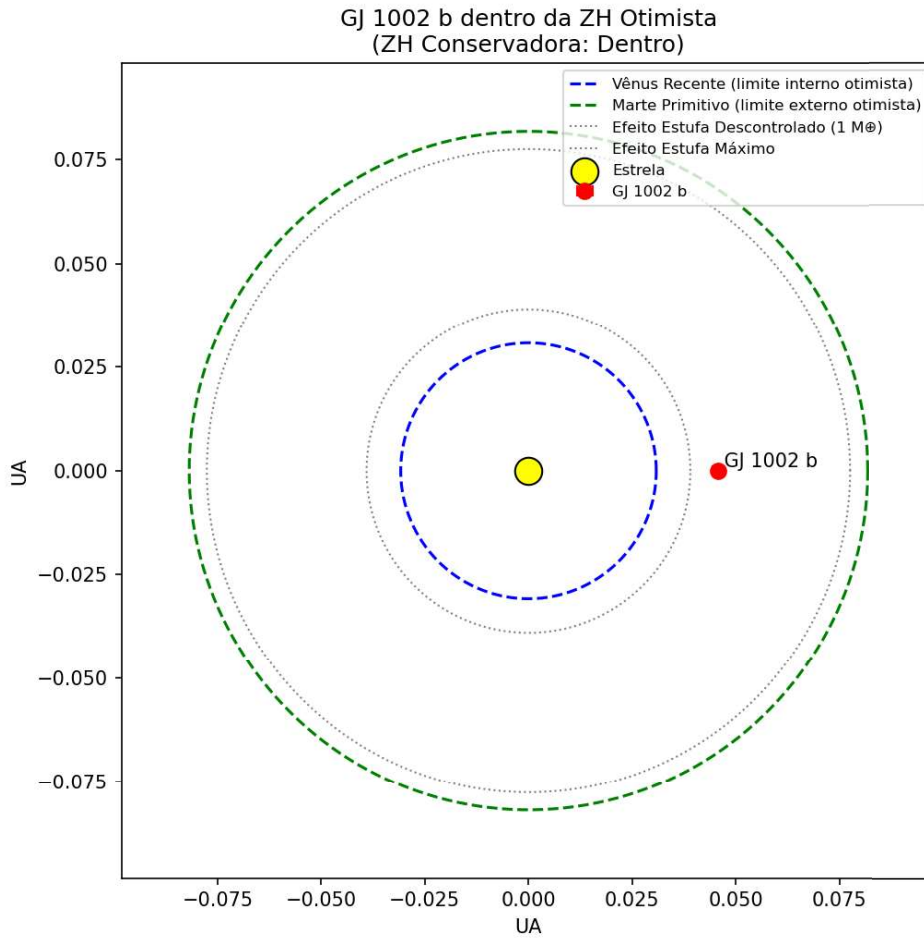


Figura D.4: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1002 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 1002 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

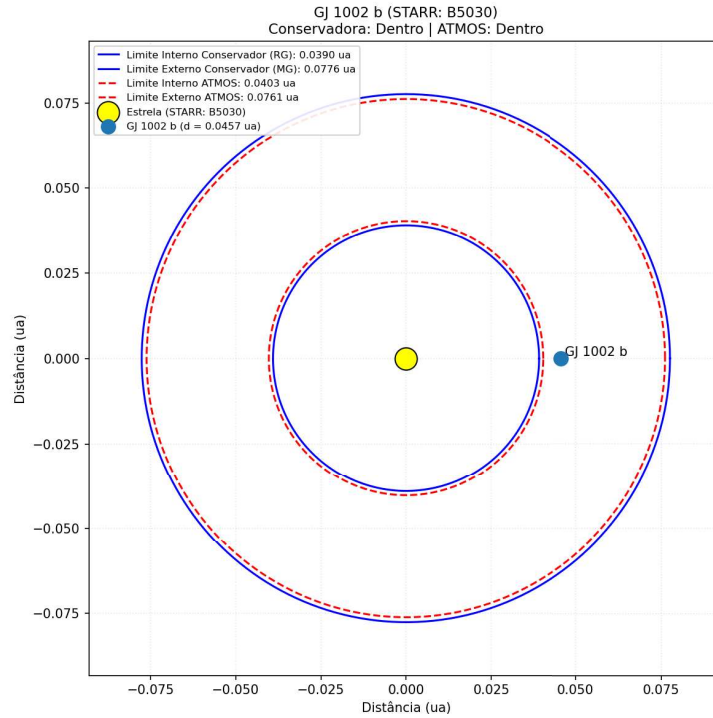


Figura D.5: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1002 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

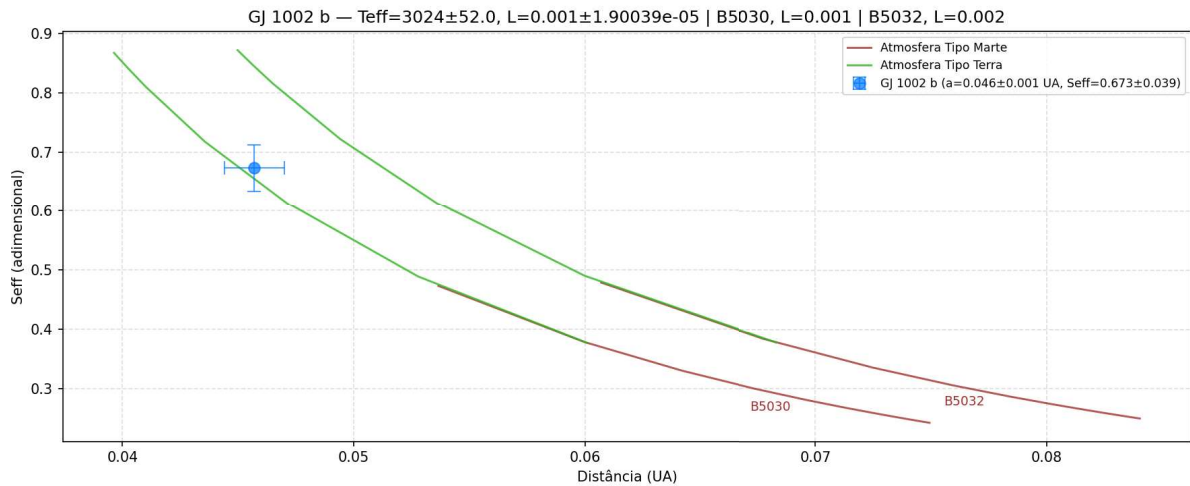


Figura D.6: Análise atmosférica de GJ 1002 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.3 GJ 1002 c

O exoplaneta GJ 1002 c está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 1002 c	$21,20 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,00$	$1,08 \pm 0,17$	$1,36 \pm 0,17$	$6,0 \pm 3,0$	$198,7 \pm 5,7$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 1002	3024 ± 52	$-0,25 \pm 0,19$	$5,10 \pm 0,06$	$0,14 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 1002 c	$0,07 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

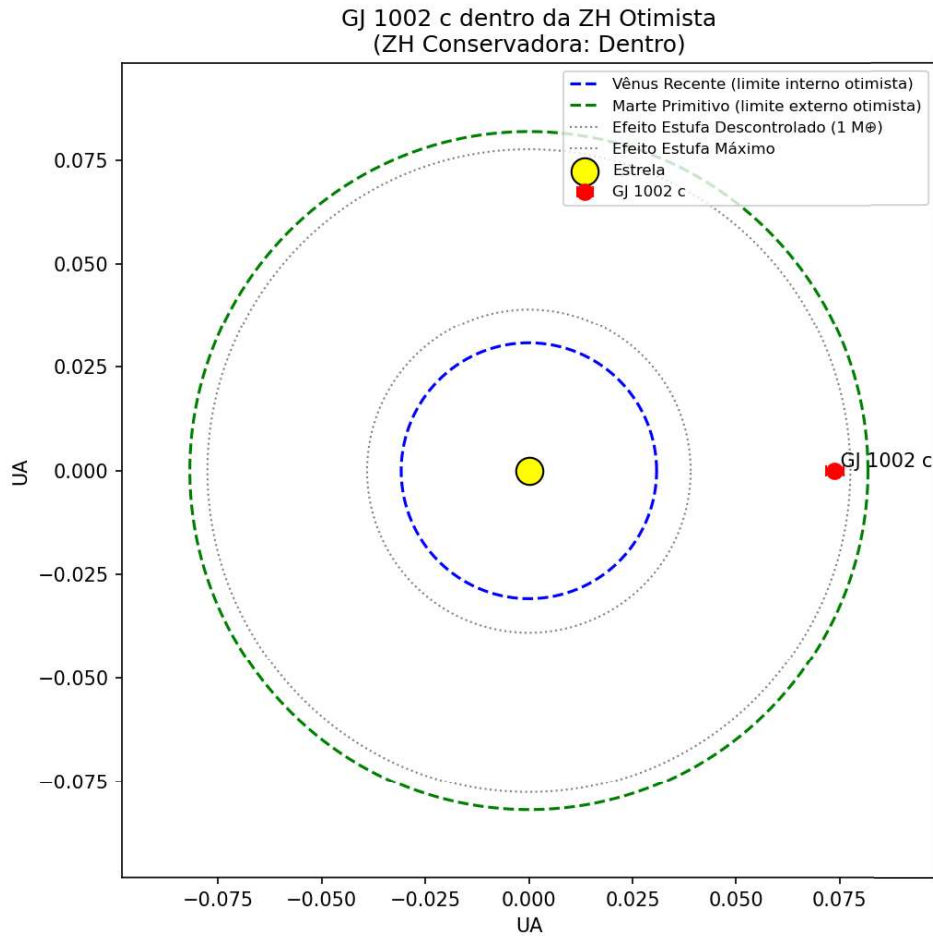


Figura D.7: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1002 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 1002 c está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Marte.

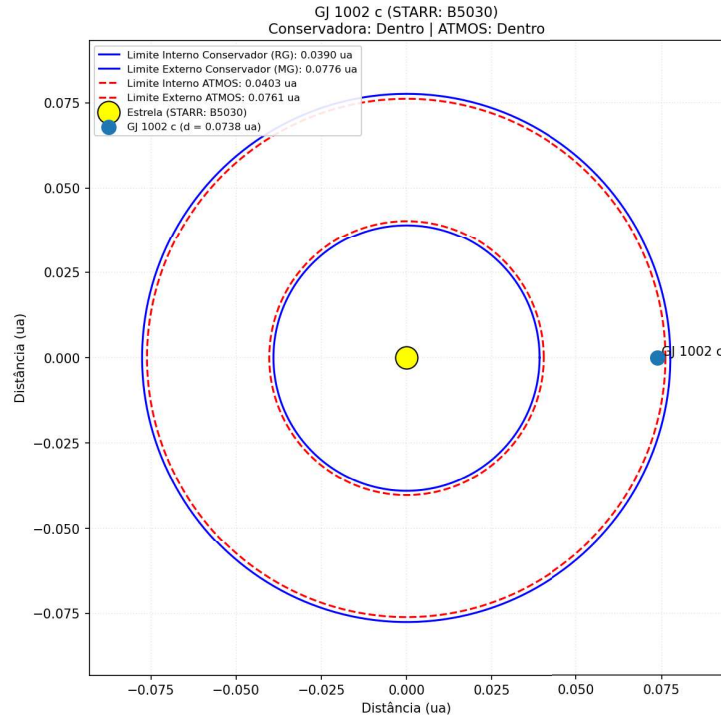


Figura D.8: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1002 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

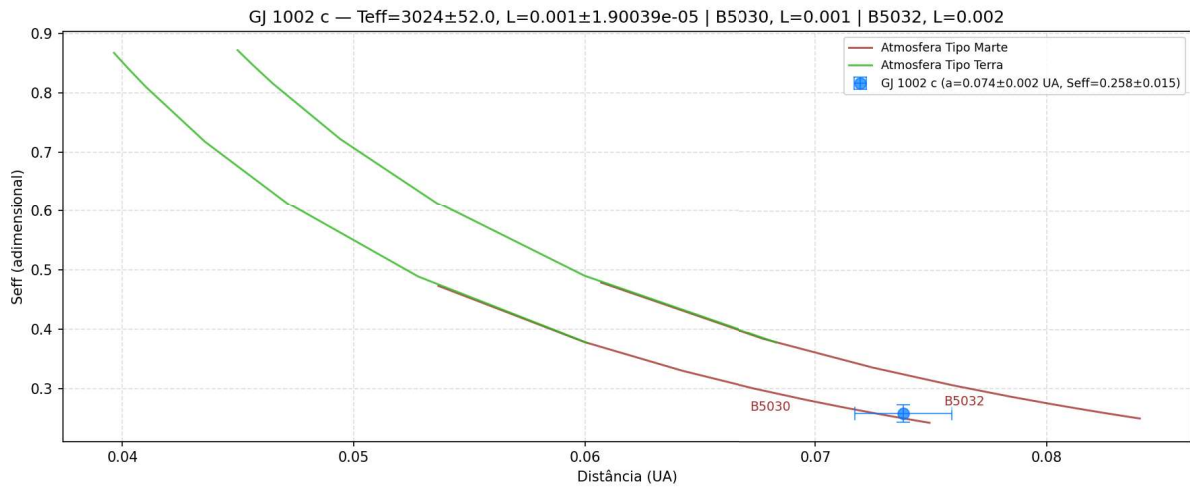


Figura D.9: Análise atmosférica de GJ 1002 c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.4 GJ 1061 c

O exoplaneta GJ 1061 c está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 1061 c	$6,68 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$1,23 \pm 0,18$	$1,81 \pm 0,13$	$5,3 \pm 2,4$	304 ± 12

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
GJ 1061	2953 ± 98	$-0,08 \pm 0,08$	–	$0,16 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 1061 c	$0,03 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	Dentro	Fora

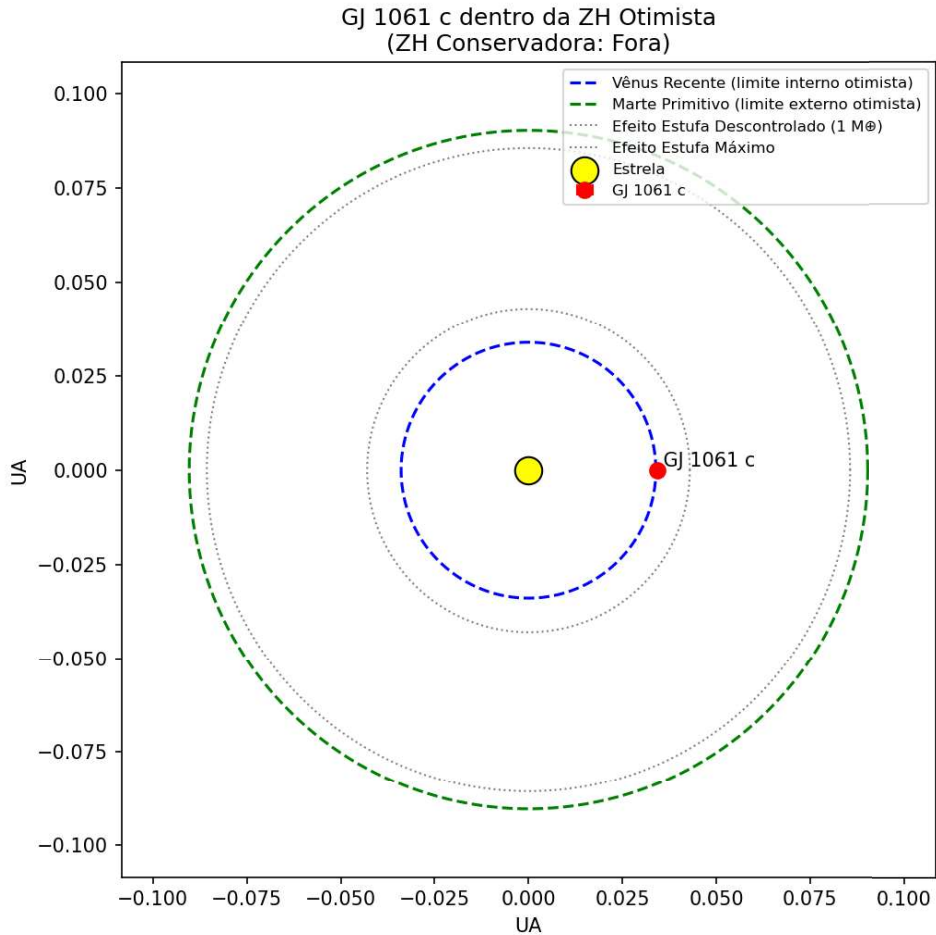


Figura D.10: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1061 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.5 GJ 1061 d

O exoplaneta GJ 1061 d está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 1061 d	$13,07 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$1,14 \pm 0,18$	$1,62 \pm 0,21$	$6,1 \pm 3,0$	$242,0 \pm 10,0$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 1061	2953 ± 98	$-0,08 \pm 0,08$	–	$0,16 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 1061 d	$0,05 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

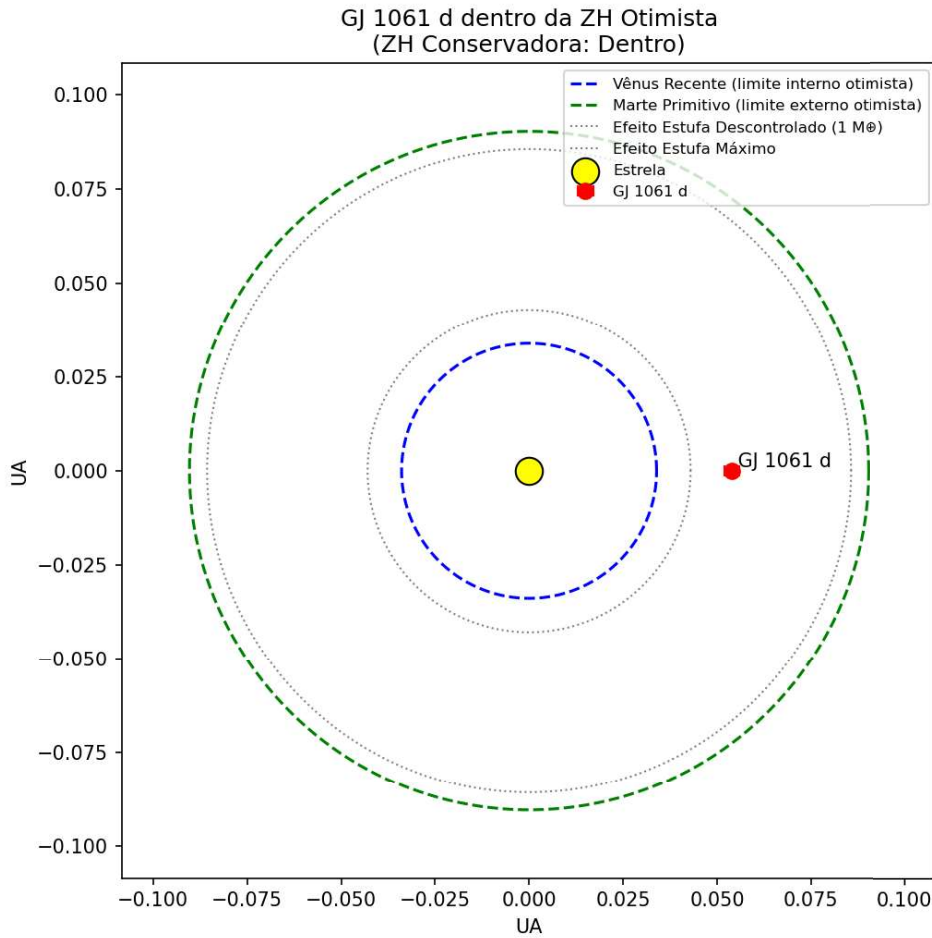


Figura D.11: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1061 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 1061 d está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

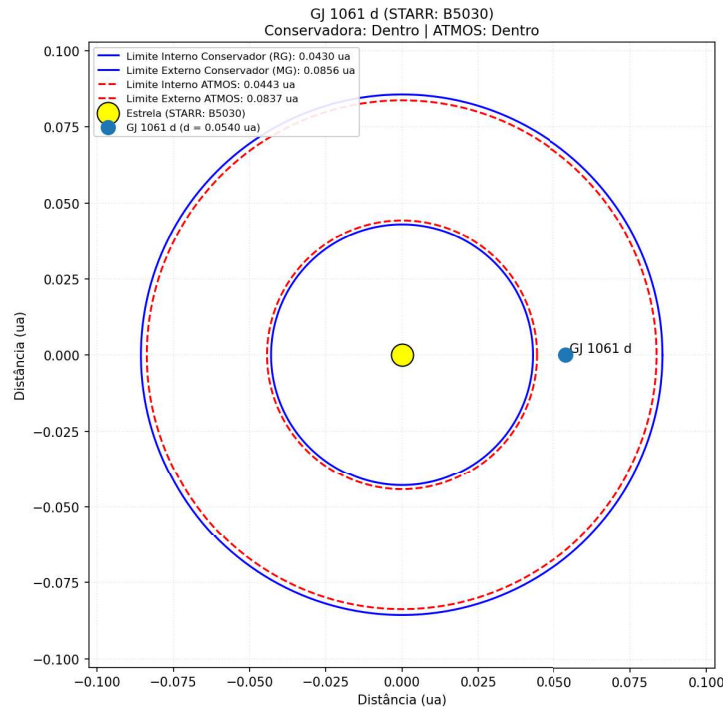


Figura D.12: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 1061 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

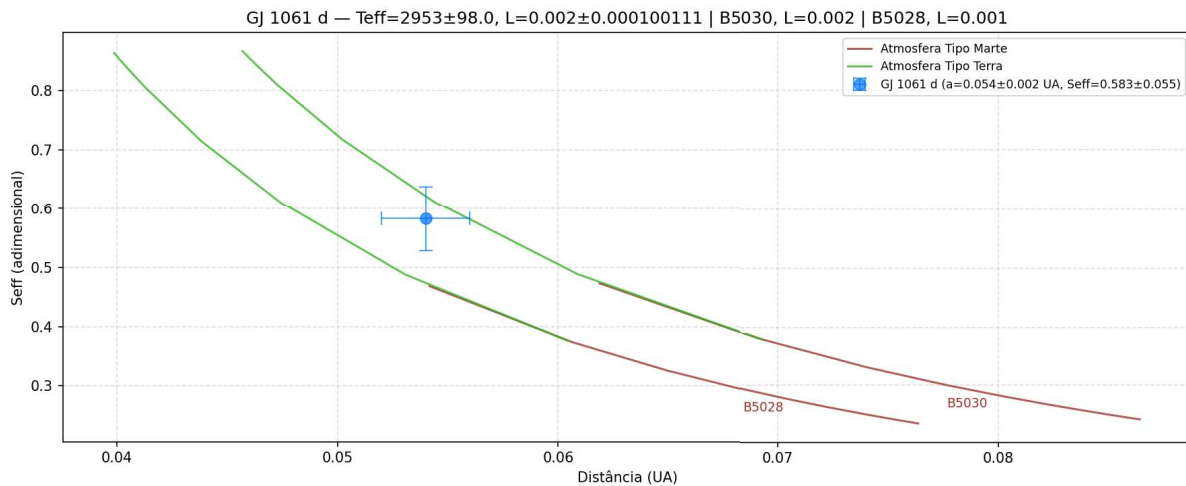


Figura D.13: Análise atmosférica de GJ 1061 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.6 GJ 180 c

O exoplaneta GJ 180 c está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 180 c	$24,33 \pm 0,06$	$0,13 \pm 0,01$	$0,97 \pm 0,31$	$1,2 \pm 1,0$	$7,5 \pm 9,5$	–

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 180	3371	–	–	–	0,43	0,013

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 180 c	$0,13 \pm 0,01$	0,10	0,24	0,12	0,23	Dentro	Dentro

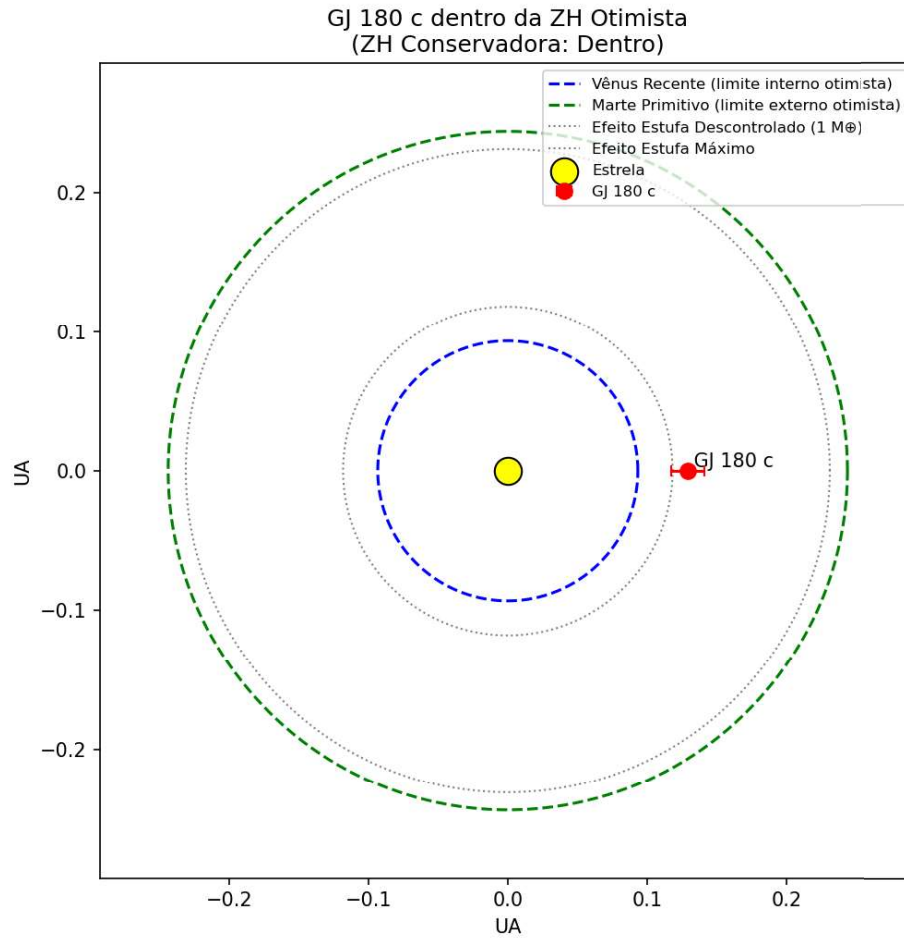


Figura D.14: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 180 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 180 c está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

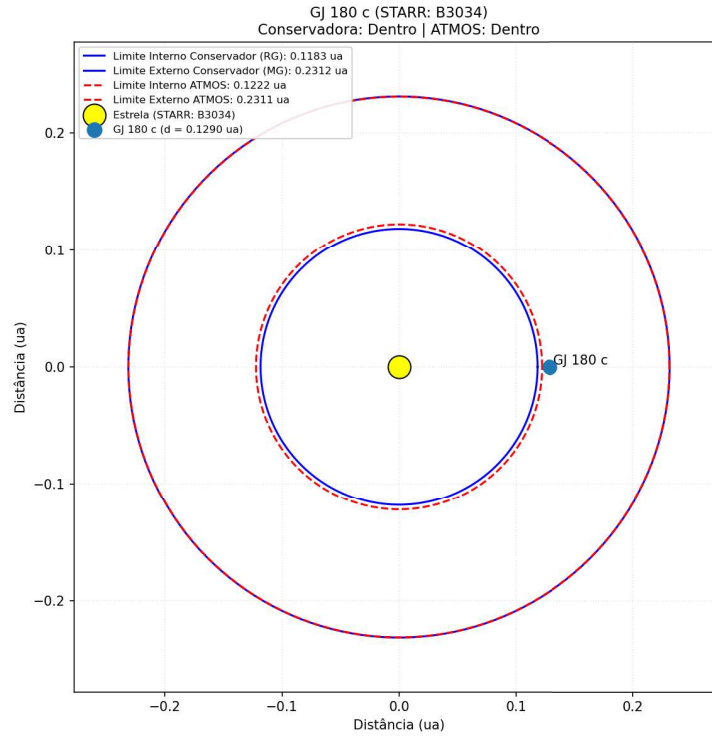


Figura D.15: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 180 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

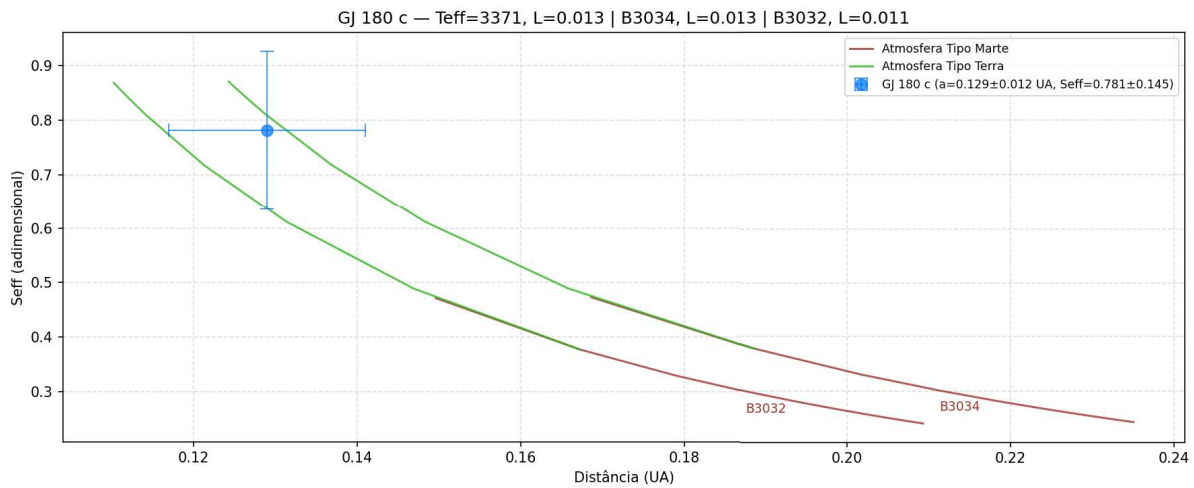


Figura D.16: Análise atmosférica de GJ 180 c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.7 GJ 251 c

O exoplaneta GJ 251 c está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 251 c	$53,65 \pm 0,04$	$0,20 \pm 0,01$	$1,39 \pm 0,26$	$3,5 \pm 1,1$	$7,2 \pm 4,6$	$218,4 \pm 8,5$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 251	3342 ± 24	$0,07 \pm 0,07$	$4,87 \pm 0,05$	$0,36 \pm 0,01$	$0,35 \pm 0,05$	$0,02 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 251 c	$0,19 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,00$	$0,27 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

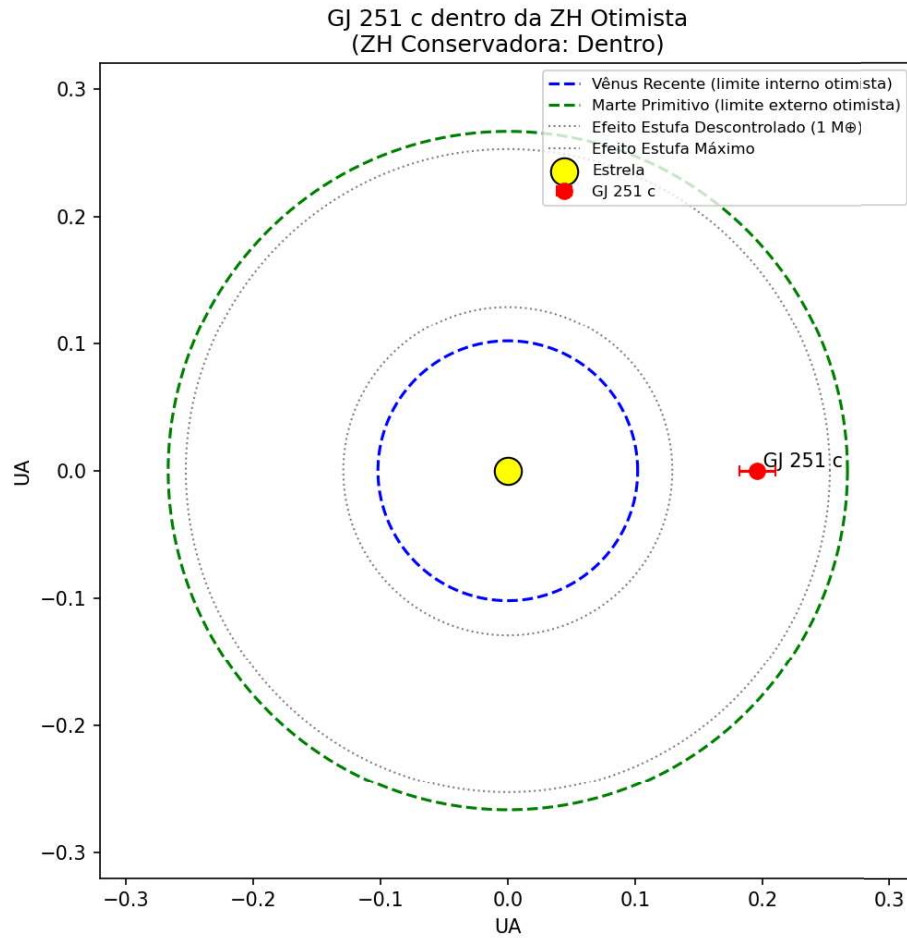


Figura D.17: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 251 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 251 c está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

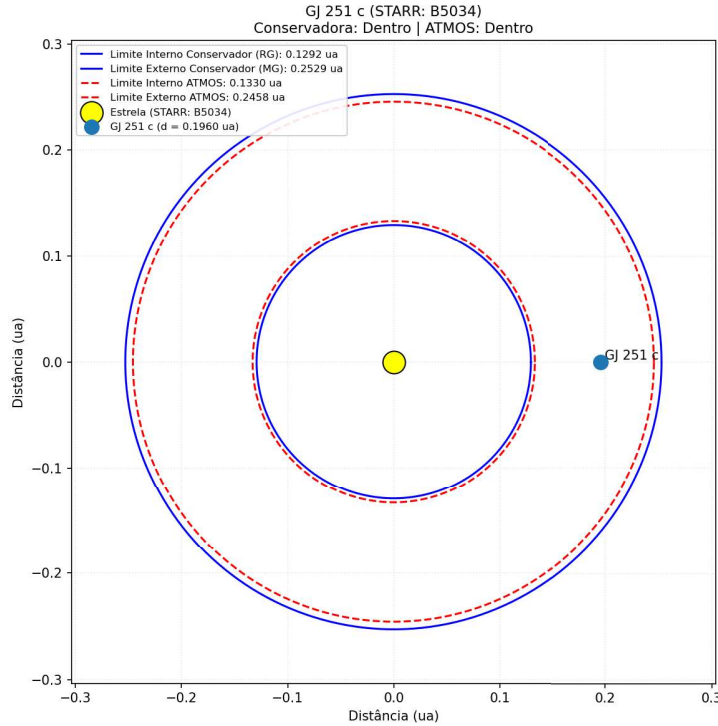


Figura D.18: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 251 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

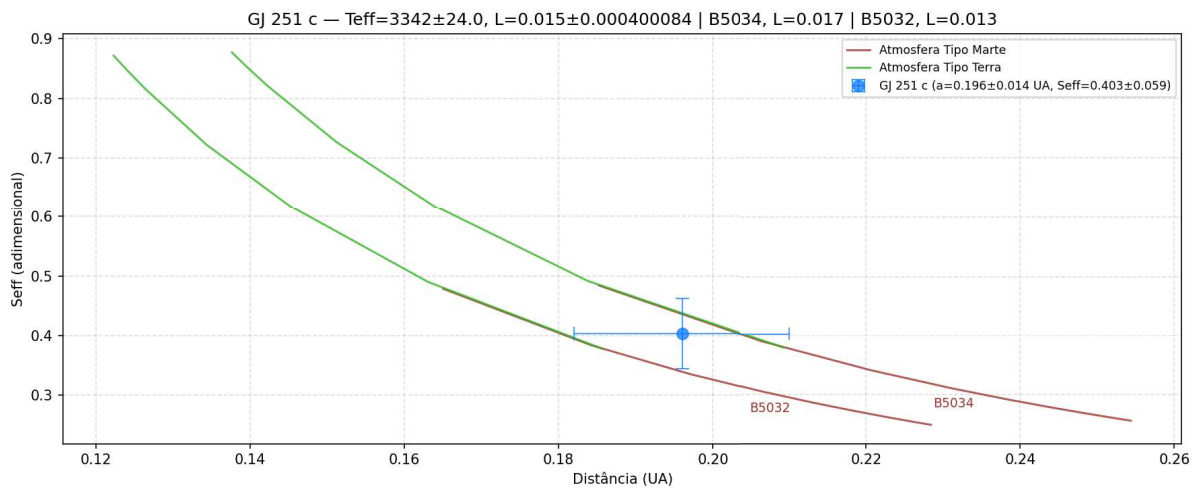


Figura D.19: Análise atmosférica de GJ 251 c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.8 GJ 273 b

O exoplaneta GJ 273 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 273 b	$18,65 \pm 0,00$	$0,091 \pm 0,00$	$1,27 \pm 0,20$	$2,88 \pm 0,27$	$7,7 \pm 3,7$	292 ± 14

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 273	3382 ± 49	$0,09 \pm 0,17$	–	$0,29 \pm 0,03$	0,29	$0,01 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 273 b	$0,09 \pm 0,00$	$0,07 \pm 0,04$	$0,20 \pm 0,10$	$0,10 \pm 0,05$	$0,19 \pm 0,09$	Dentro	Fora

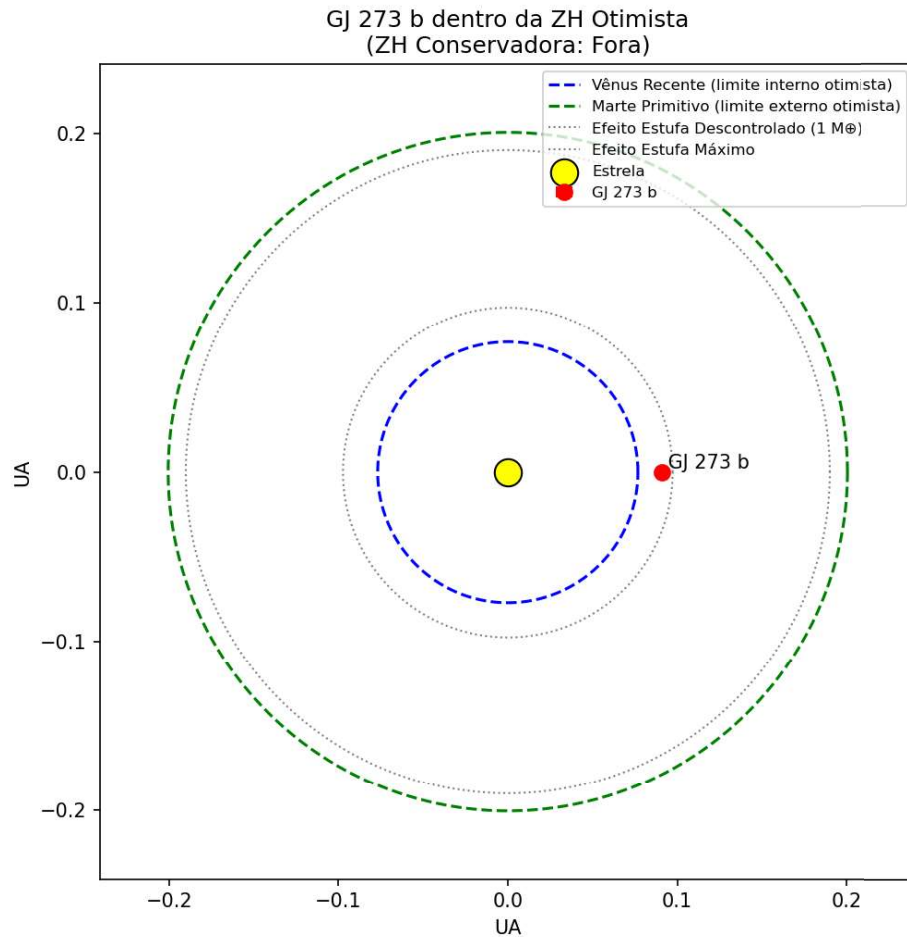


Figura D.20: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 273 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.9 GJ 3293 d

O exoplaneta GJ 3293 d está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 3293 d	$48,13 \pm 0,06$	$0,19 \pm 0,00$	$2,07 \pm 0,47$	$7,4 \pm 1,2$	$4,6 \pm 3,2$	$241,2 \pm 8,8$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
GJ 3293	3466 ± 49	$0,02 \pm 0,09$	–	$0,40 \pm 0,03$	0,42	$0,02 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 3293 d	$0,19 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,03$	Dentro	Dentro

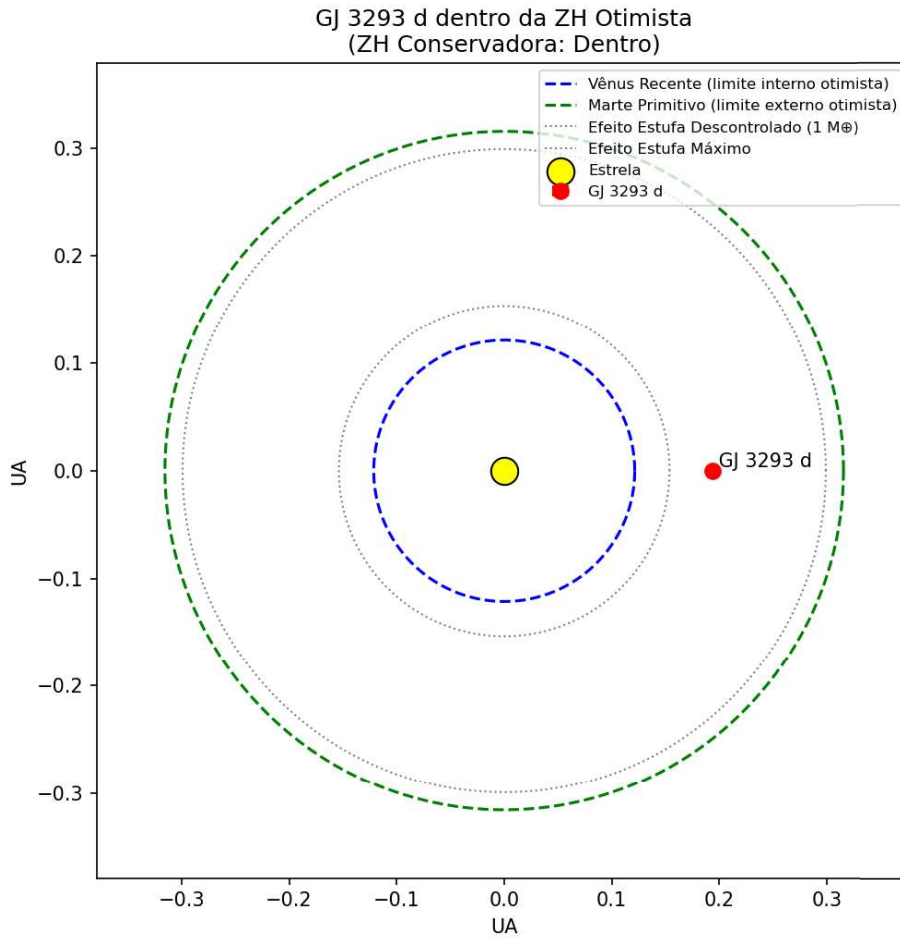


Figura D.21: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 3293 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 3293 d está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

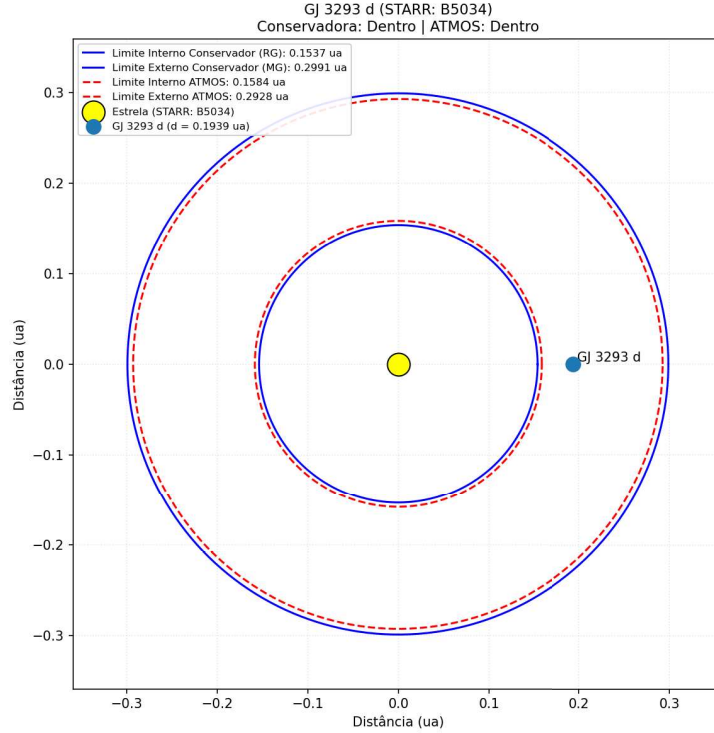


Figura D.22: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 3293 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

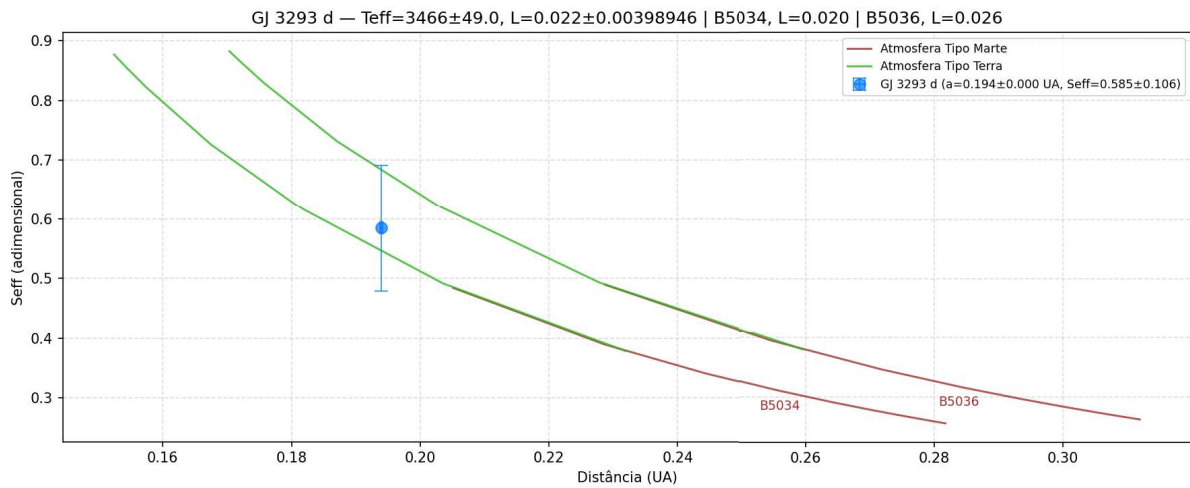


Figura D.23: Análise atmosférica de GJ 3293 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.10 GJ 357 d

O exoplaneta GJ 357 d está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 357 d	$55,70 \pm 0,06$	$0,20 \pm 0,02$	$1,70 \pm 0,36$	$5,7 \pm 1,0$	$6,4 \pm 4,2$	$217,2 \pm 9,9$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 357	3505 ± 51	$-0,12 \pm 0,16$	$4,94 \pm 0,07$	$0,34 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,01$	$0,016 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 357 d	$0,20 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,00$	$0,27 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

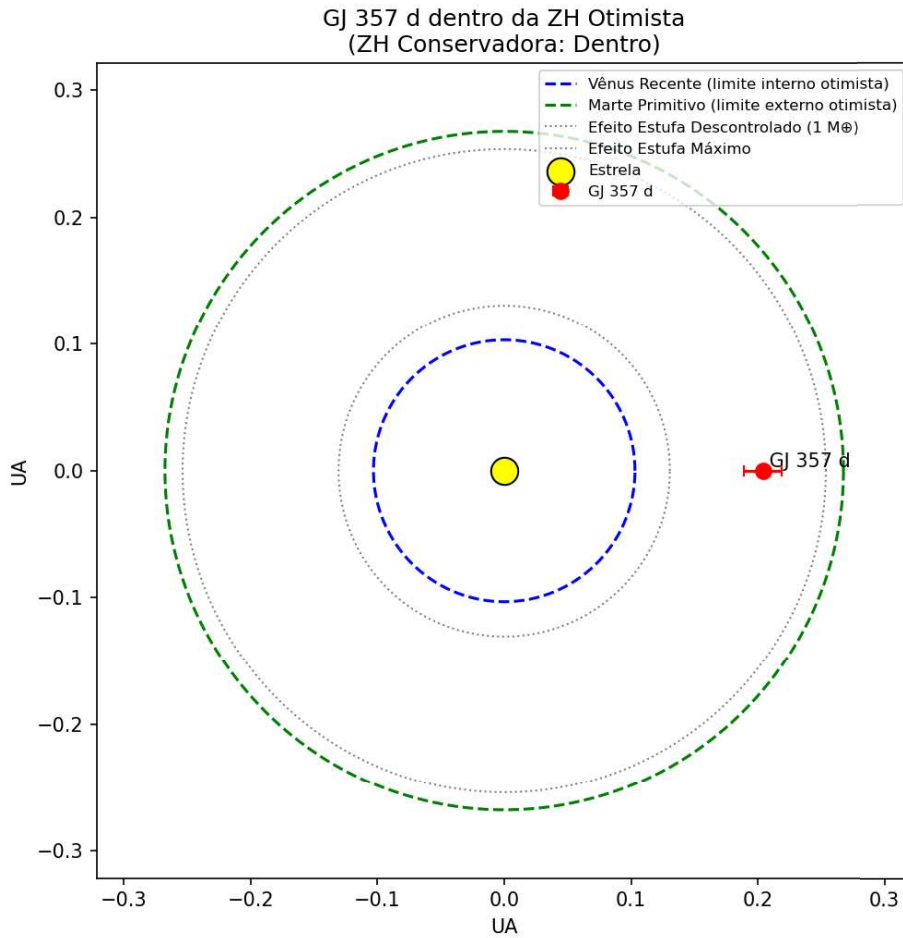


Figura D.24: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 357 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 357 d está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

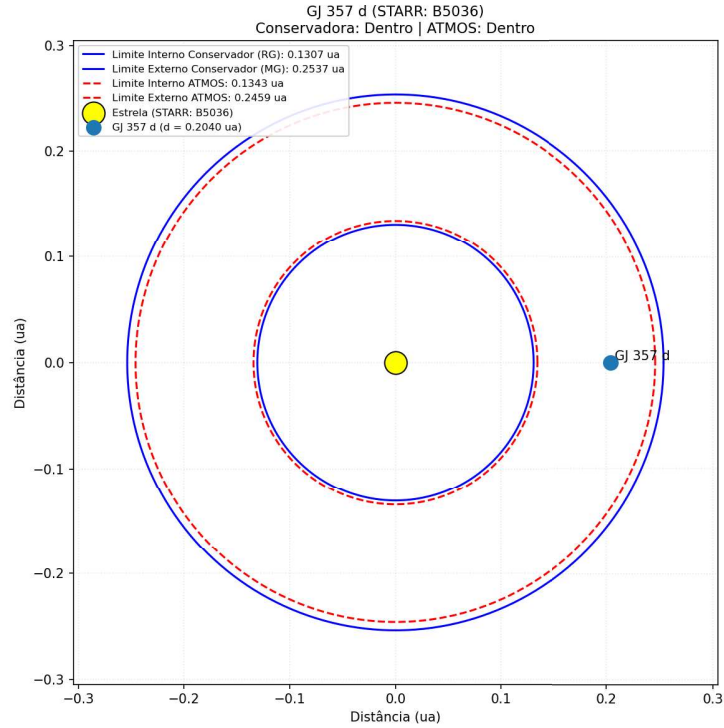


Figura D.25: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 357 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

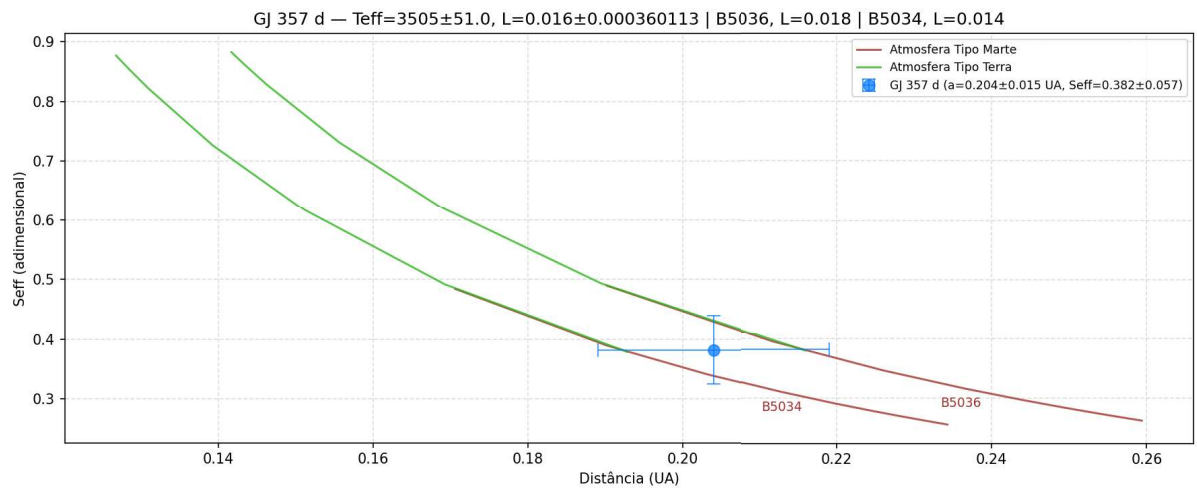


Figura D.26: Análise atmosférica de GJ 357 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.11 GJ 367 d

O exoplaneta GJ 367 d está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 367 d	$34,37 \pm 0,07$	$0,16 \pm 0,00$	$1,80 \pm 0,28$	$5,95 \pm 0,47$	$5,6 \pm 2,7$	$288,1 \pm 7,1$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 367	3522 ± 70	$-0,01 \pm 0,12$	$4,78 \pm 0,03$	$0,46 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 367 d	$0,15 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,02$	$0,17 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,02$	Dentro	Fora

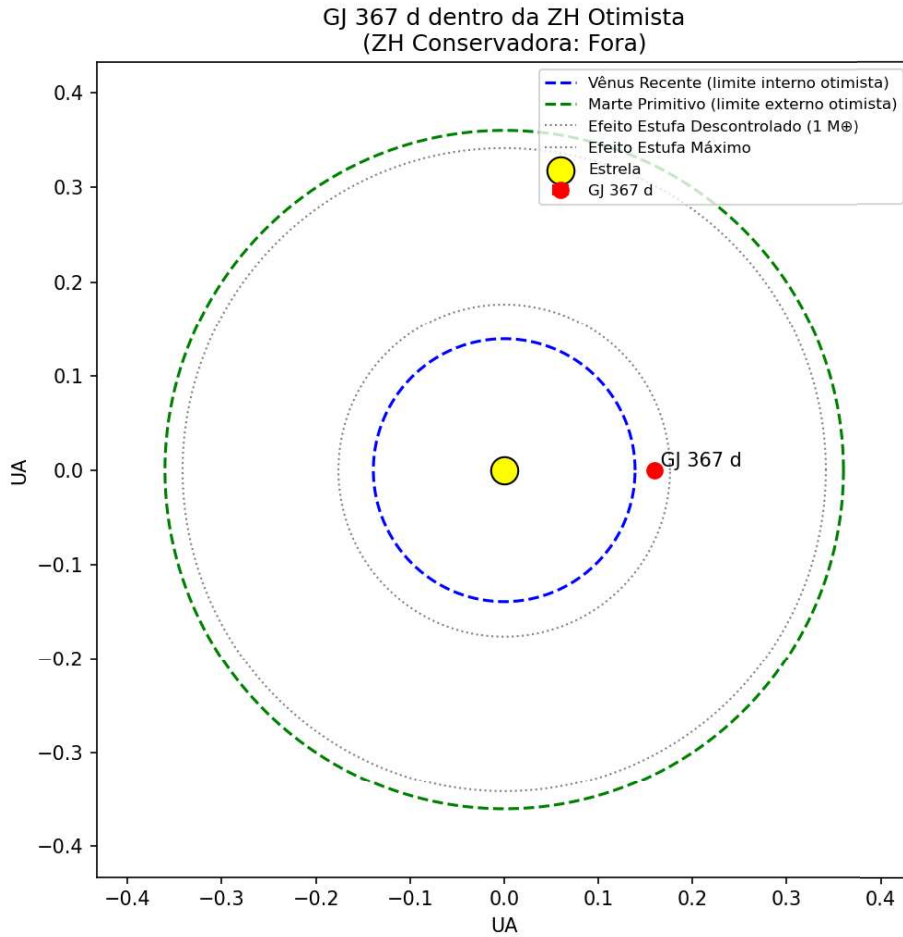


Figura D.27: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 367 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.12 GJ 3998 d

O exoplaneta GJ 3998 d está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 3998 d	$41,78 \pm 0,05$	$0,19 \pm 0,01$	$1,82 \pm 0,41$	$5,9 \pm 1,1$	$5,4 \pm 3,8$	292 ± 16

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
GJ 3998	3726 ± 68	$-0,13 \pm 0,09$	$4,75 \pm 0,04$	$0,50 \pm 0,05$	$0,52 \pm 0,05$	$0,044 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 3998 d	$0,19 \pm 0,00$	$0,17 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,04$	$0,21 \pm 0,02$	$0,41 \pm 0,04$	Dentro	Fora

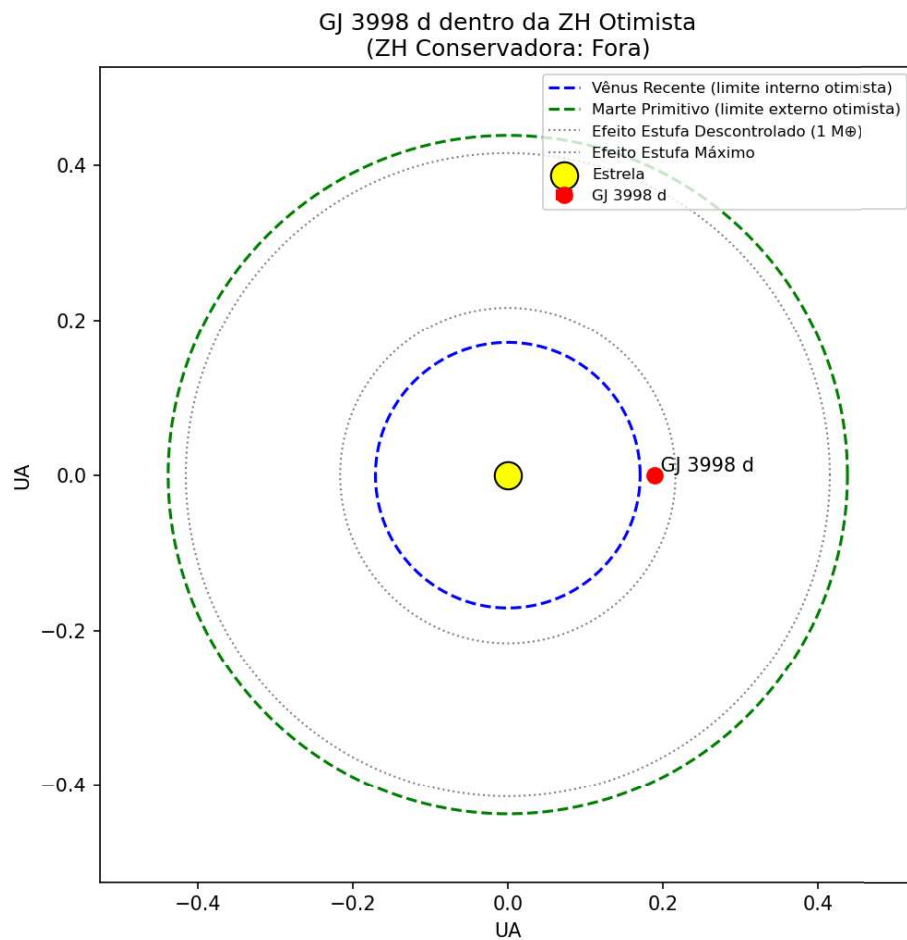


Figura D.28: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 3998 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.13 GJ 433 d

O exoplaneta GJ 433 d está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 433 d	$36,06 \pm 0,016$	$0,18 \pm 0,01$	$1,56 \pm 0,29$	$4,78 \pm 0,96$	$7,0 \pm 4,2$	$279,7 \pm 4,7$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 433	3461	-0,22	4,81	0,5	0,48	0,02

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 433 d	$0,18 \pm 0,01$	0,16	0,30	0,14	0,29	Dentro	Dentro

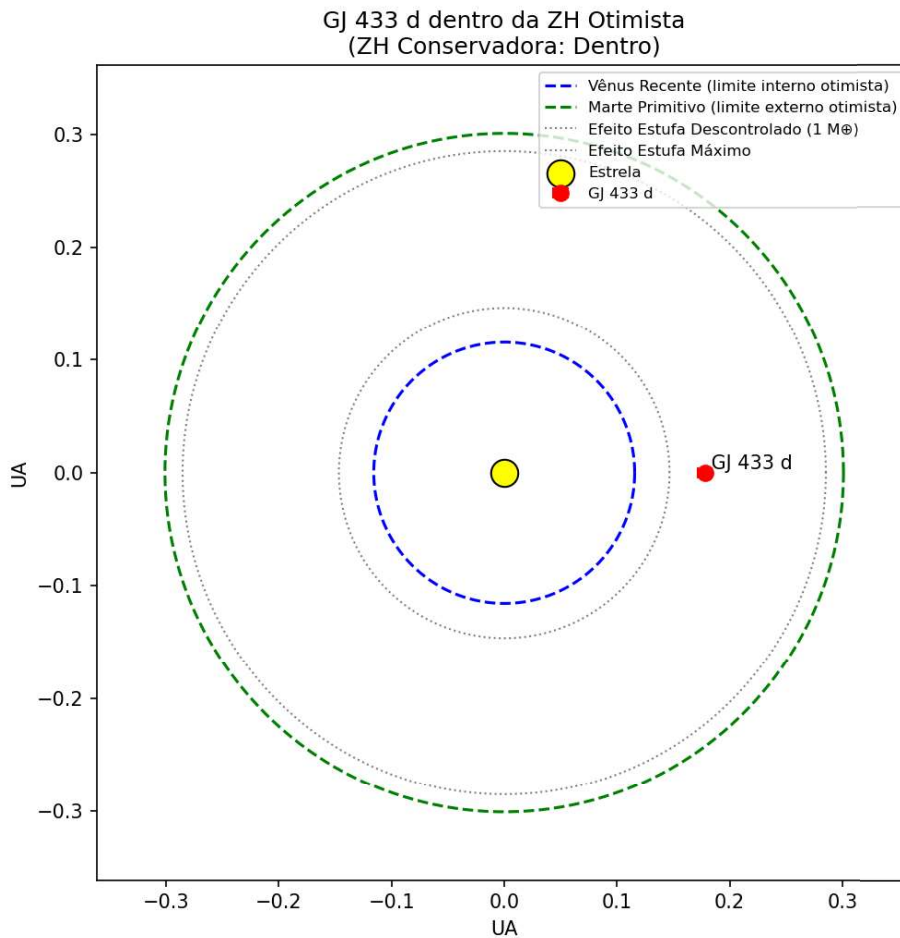


Figura D.29: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 433 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 433 d está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

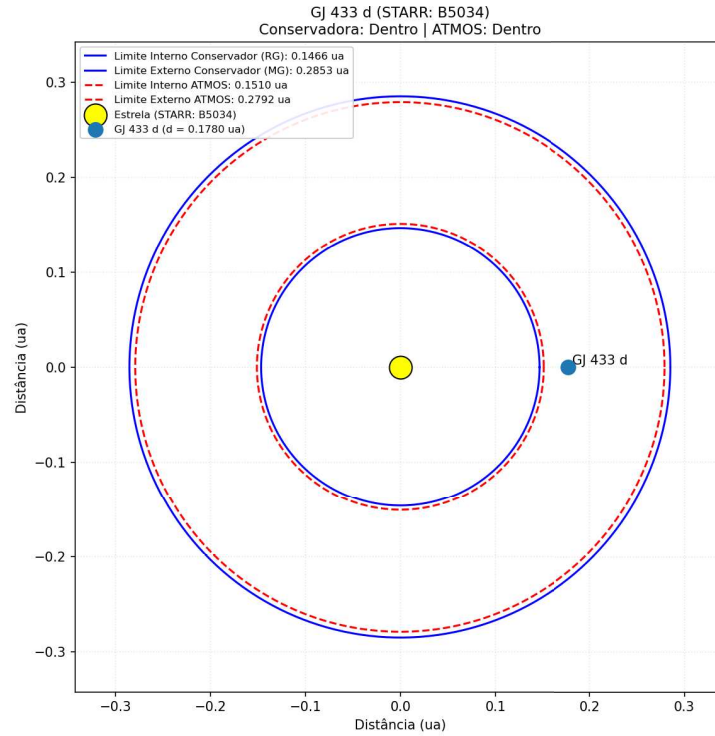


Figura D.30: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 3998 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

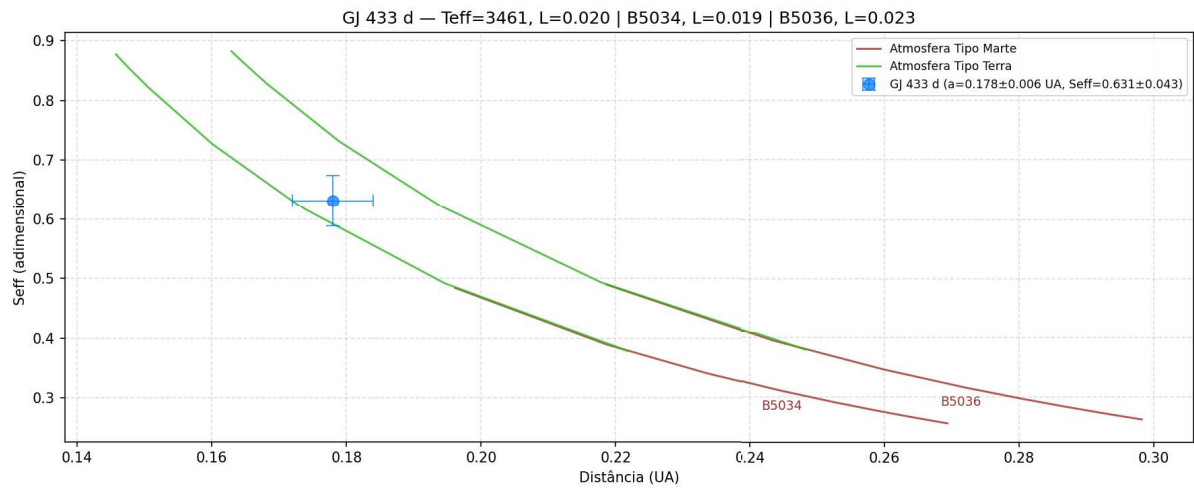


Figura D.31: Análise atmosférica de GJ 433 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.14 GJ 514 b

O exoplaneta GJ 514 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 514 b	$140,43 \pm 0,41$	$0,422 \pm 0,02$	$1,63 \pm 0,32$	$5,25 \pm 0,81$	$6,6 \pm 4,0$	196 ± 10

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 514	3728 ± 68	$-0,14 \pm 0,09$	$4,76 \pm 0,04$	$0,50 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 514 b	$0,42 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,02$	$0,43 \pm 0,05$	$0,21 \pm 0,02$	$0,41 \pm 0,04$	Dentro	Fora

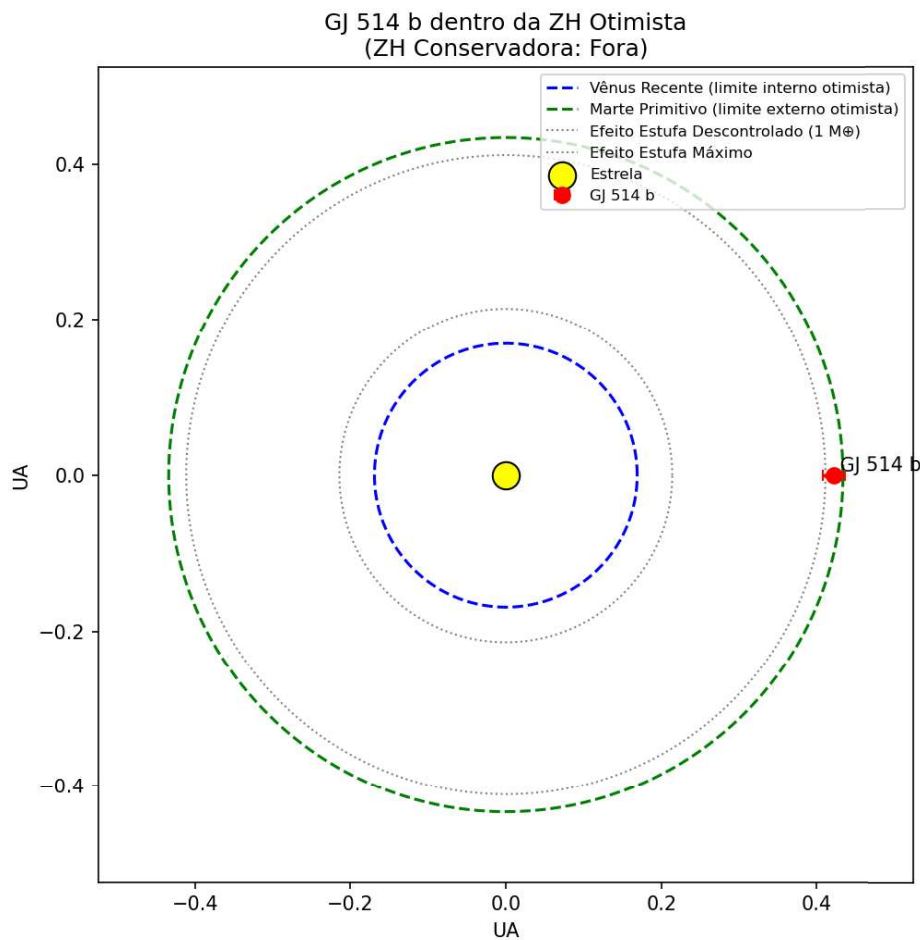


Figura D.32: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 514 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.15 GJ 667 C c

O exoplaneta GJ 667 C c está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 667 C c	$28,14 \pm 0,06$	$0,13 \pm 0,01$	$1,27 \pm 0,28$	$2,7 \pm 1,3$	$7,2 \pm 6,0$	–

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
GJ 667	3350 ± 50	$-0,55 \pm 0,10$	$4,69 \pm 0,10$	–	$0,33 \pm 0,02$	$0,014 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 667 C c	$0,13 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,01$	Dentro	Dentro

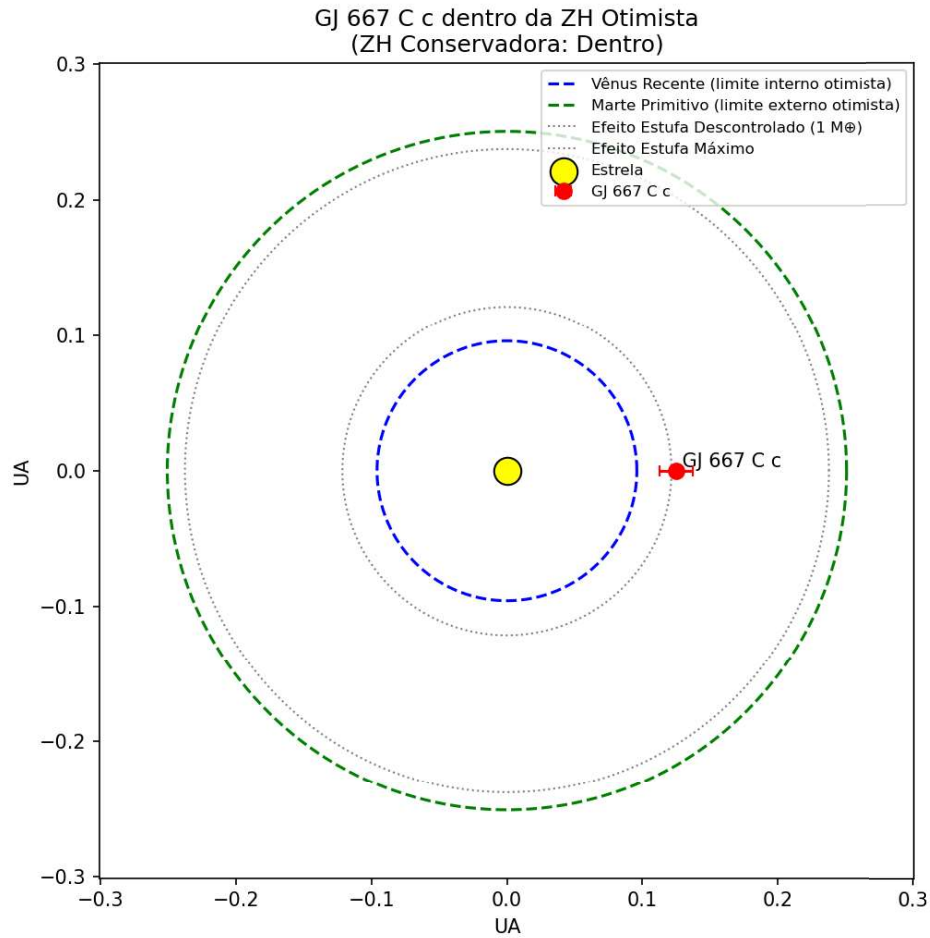


Figura D.33: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 667 C c está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

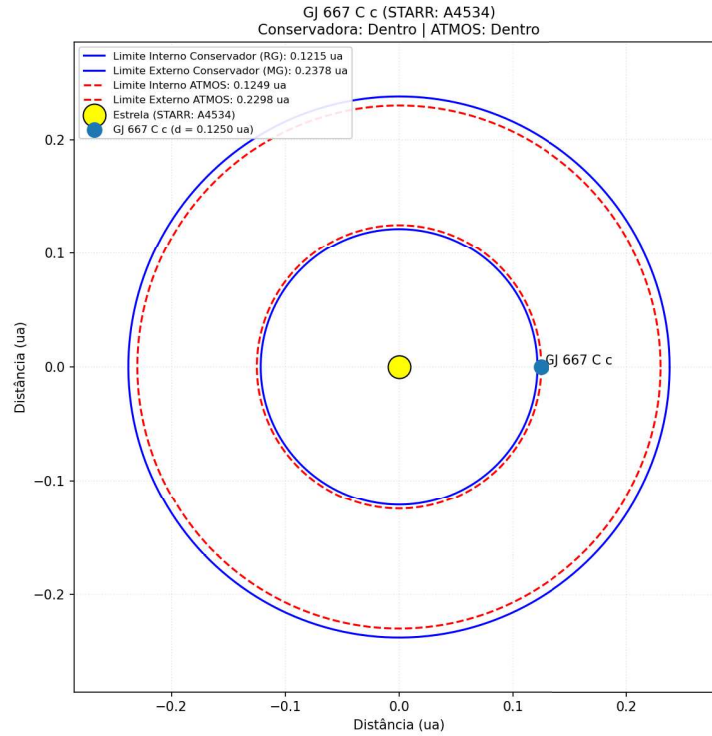


Figura D.34: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

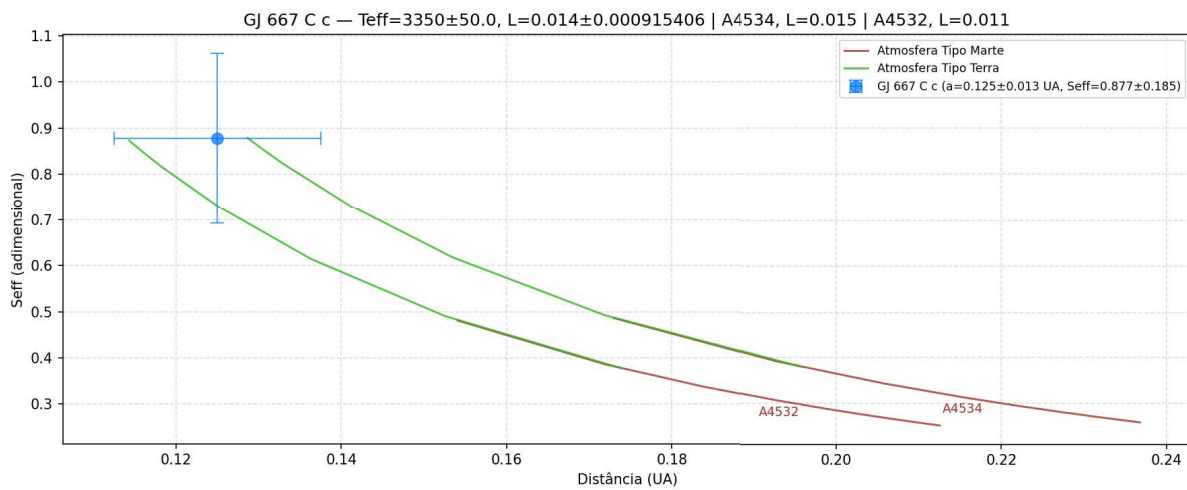


Figura D.35: Análise atmosférica de GJ 667 C c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.16 GJ 667 C e

O exoplaneta GJ 667 C e está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 667 C e	$62,24 \pm 0,55$	$0,21 \pm 0,02$	$1,41 \pm 0,39$	$3,0 \pm 2,0$	$5,9 \pm 6,3$	–

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
GJ 667	3350 ± 50	$-0,55 \pm 0,10$	$4,69 \pm 0,10$	–	$0,33 \pm 0,02$	$0,014 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 667 C e	$0,21 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,01$	Dentro	Dentro

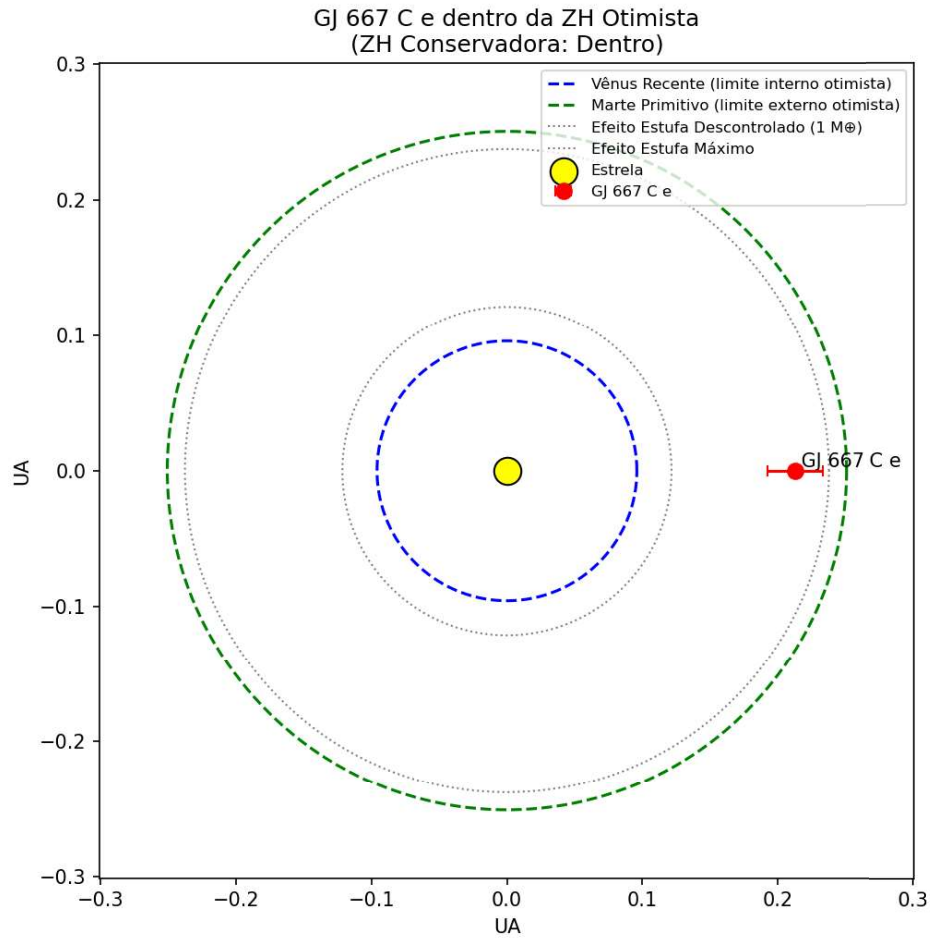


Figura D.36: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 667 C e está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Marte.

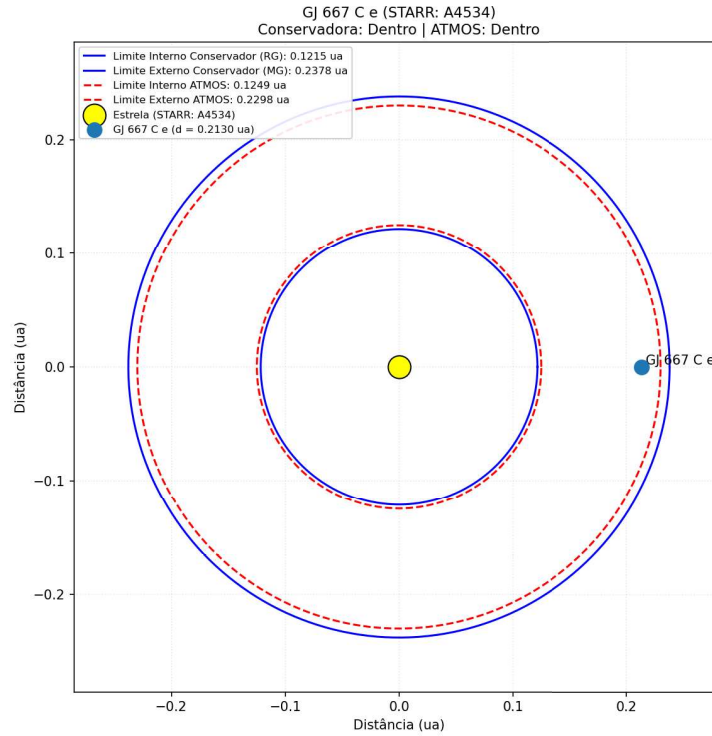


Figura D.37: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

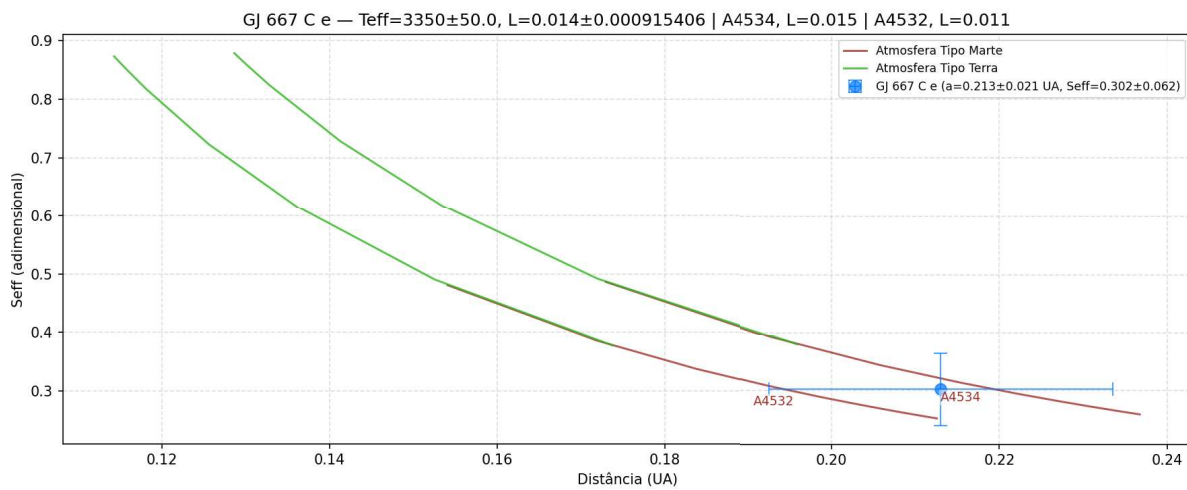


Figura D.38: Análise atmosférica de GJ 667 C e por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.17 GJ 667 C f

O exoplaneta GJ 667 C f está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 667 C f	$39,03 \pm 0,20$	$0,16 \pm 0,02$	$0,99 \pm 0,28$	$0,85 \pm 0,98$	$4,8 \pm 6,9$	–

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
GJ 667	3350 ± 50	$-0,55 \pm 0,10$	$4,69 \pm 0,10$	–	$0,33 \pm 0,02$	$0,014 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 667 C f	$0,16 \pm 0,016$	$0,10 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

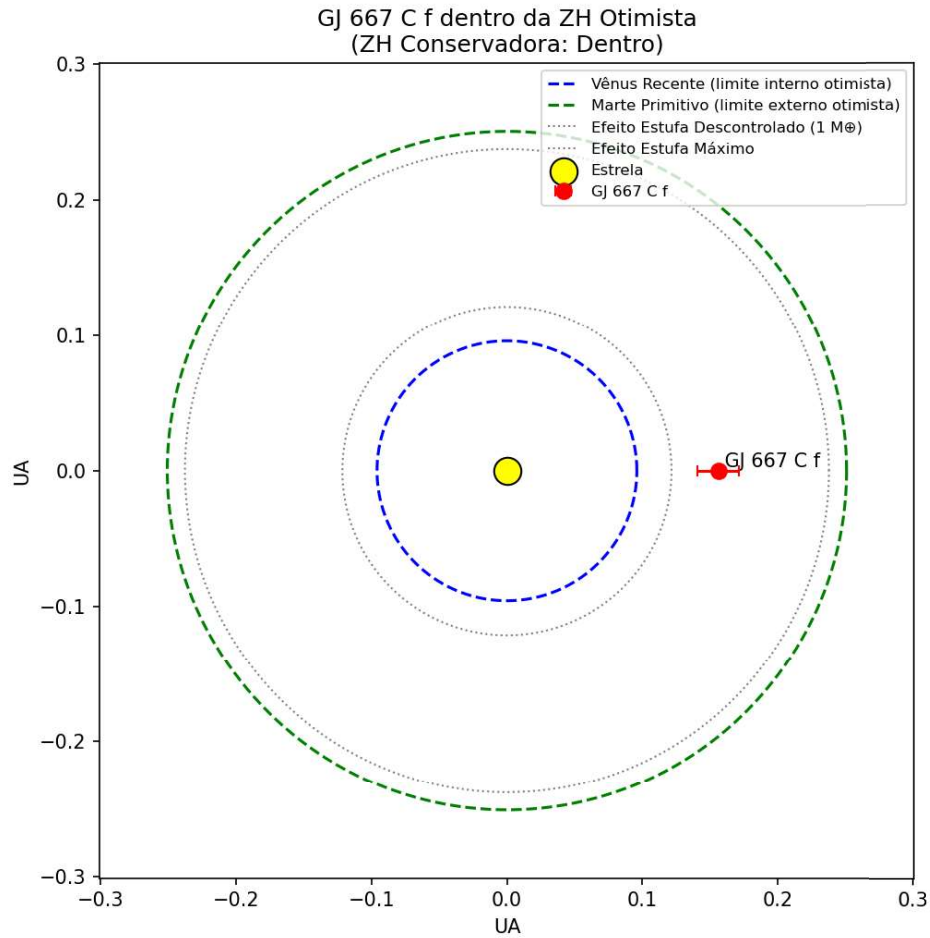


Figura D.39: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 667 C f está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

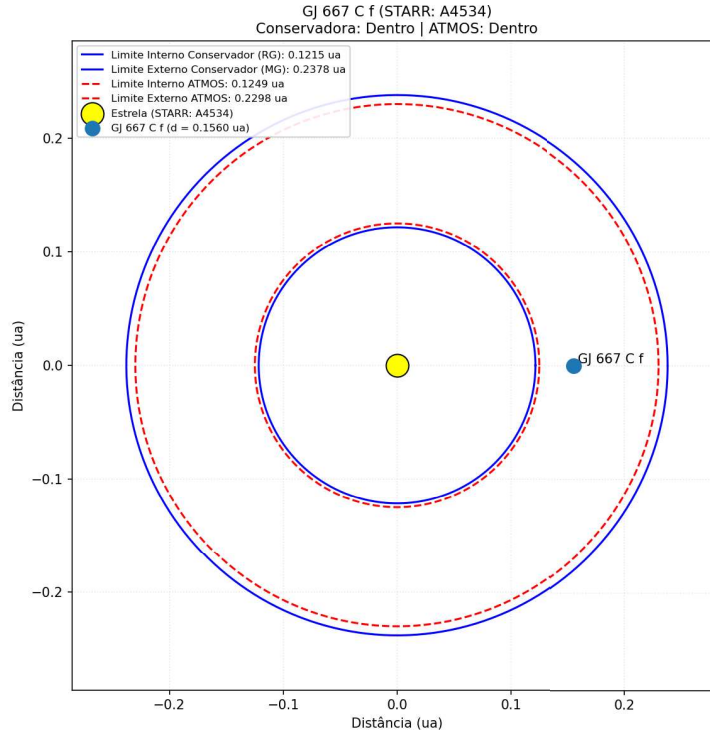


Figura D.40: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 667 C f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

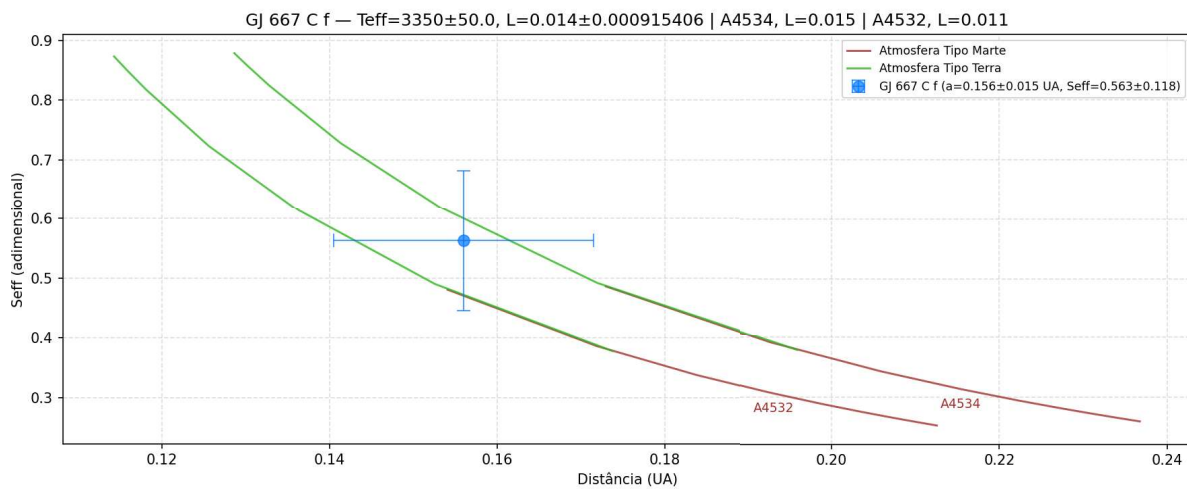


Figura D.41: Análise atmosférica de GJ 667 C f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.18 GJ 682 b

O exoplaneta GJ 682 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 682 b	$17,48 \pm 0,05$	$0,08 \pm 0,01$	$1,56 \pm 0,43$	$4,1 \pm 1,9$	$5,9 \pm 5,6$	–

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 682	3028	–	–	–	0,27	0,002

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 682 b	$0,08 \pm 0,01$	0,04	0,10	0,04	0,09	Dentro	Dentro

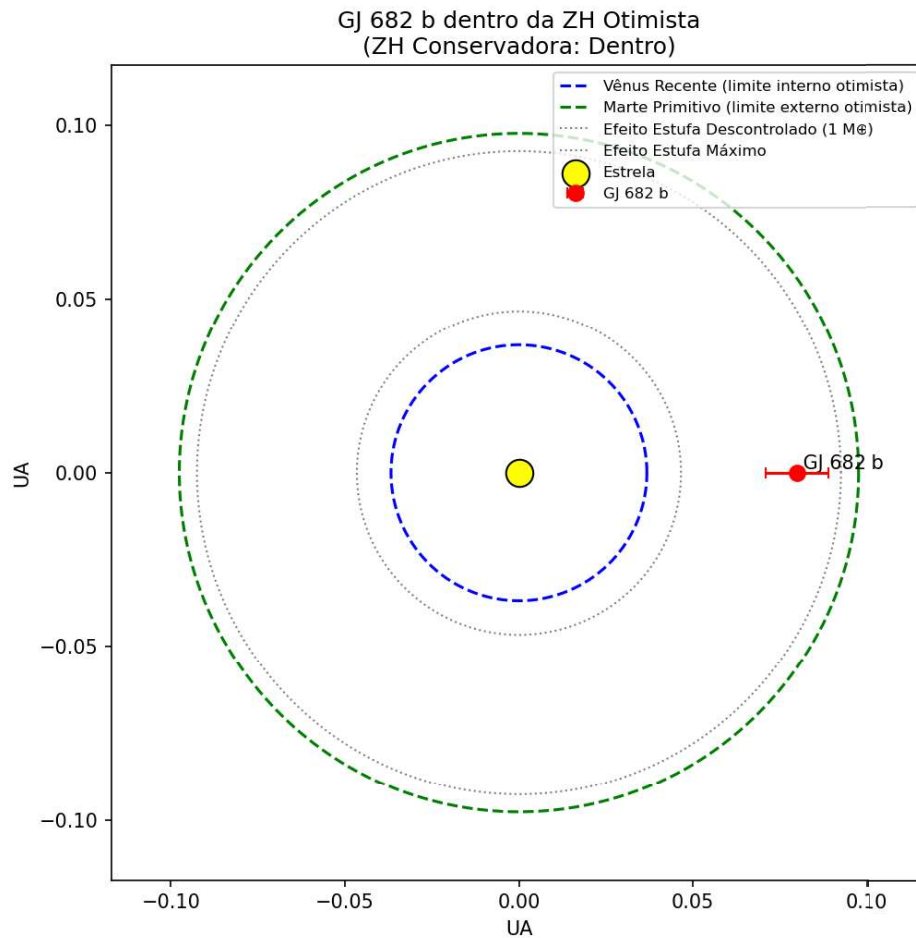


Figura D.42: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 682 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 682 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

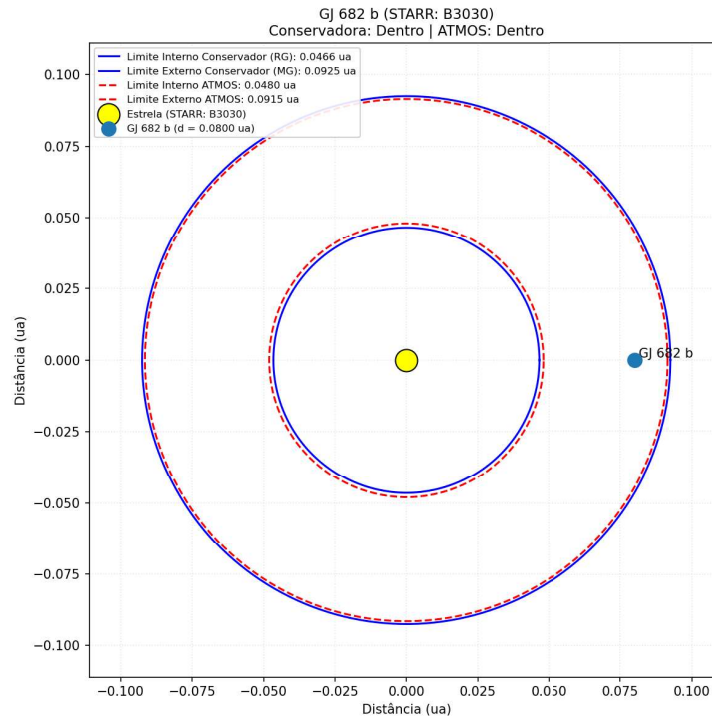


Figura D.43: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 682 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

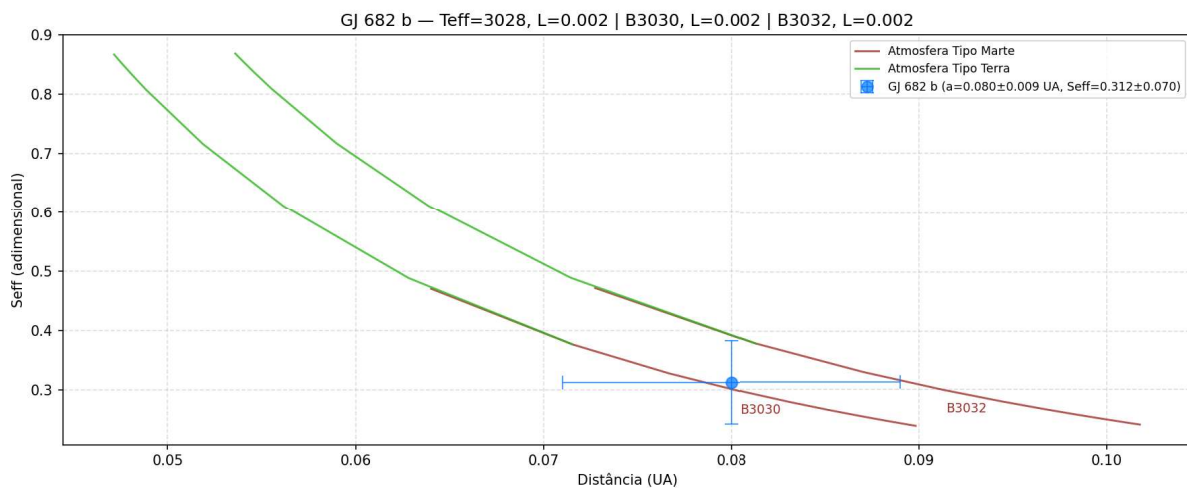


Figura D.44: Análise atmosférica de GJ 682 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.19 GJ 887 d

O exoplaneta GJ 887 d está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
GJ 887 d	$50,77 \pm 0,05$	$0,21 \pm 0,01$	$1,77 \pm 0,42$	$5,9 \pm 1,7$	$5,9 \pm 4,5$	$264,2 \pm 9,9$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
GJ 887	3688 ± 86	$-0,06 \pm 0,08$	$4,16 \pm 0,04$	$0,47 \pm 0,02$	$0,50 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
GJ 887 d	$0,21 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,01$	$0,38 \pm 0,02$	Dentro	Dentro

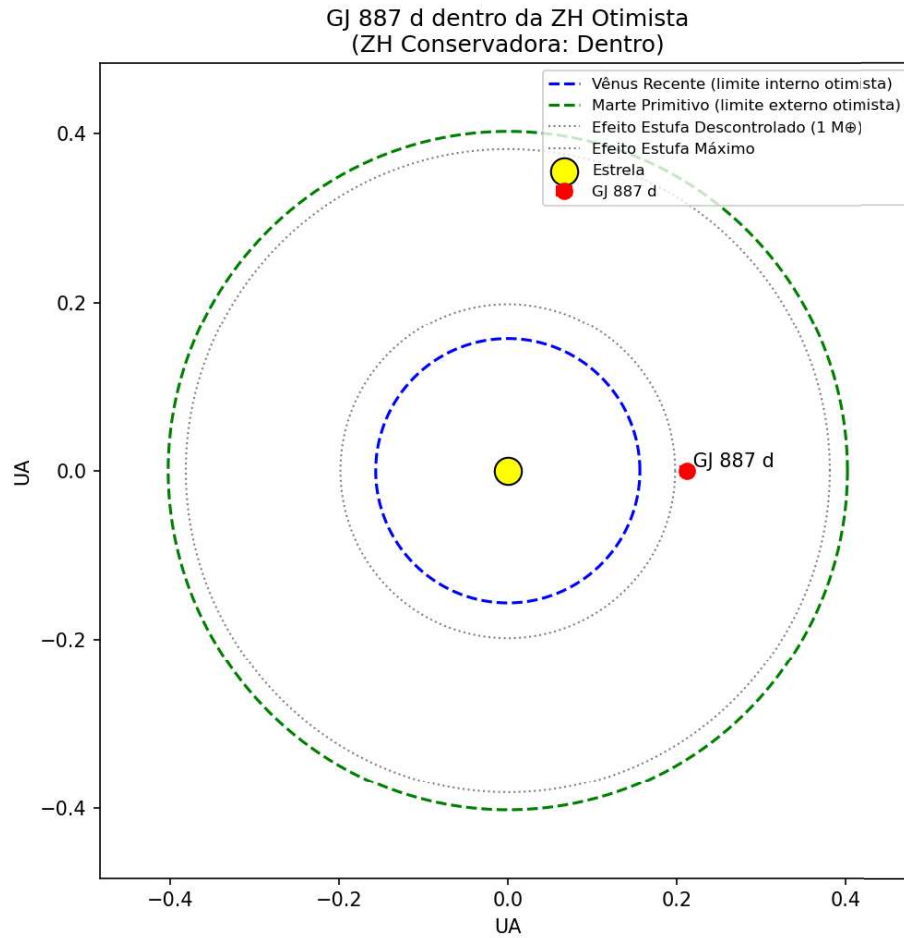


Figura D.45: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 887 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

GJ 887 d está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

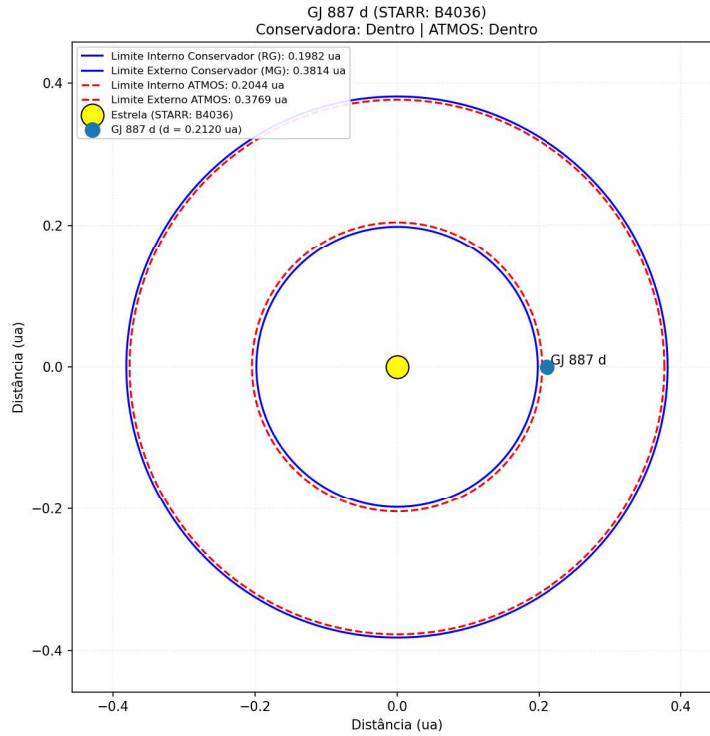


Figura D.46: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta GJ 887 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

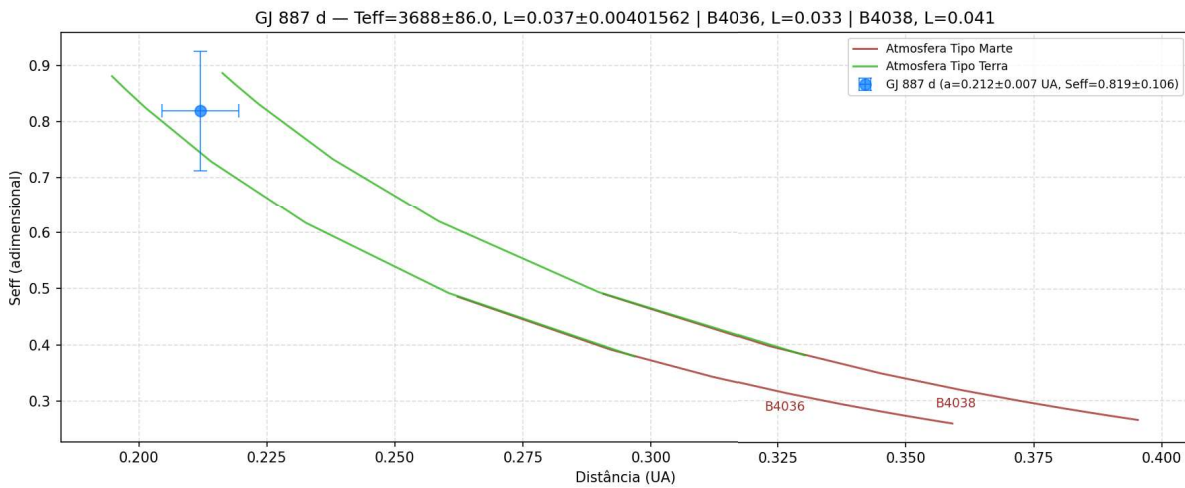


Figura D.47: Análise atmosférica de GJ 887 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.20 HD 20794 f

O exoplaneta HD 20794 f está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
HD 20794 f	$647,6 \pm 2,6$	$1,35 \pm 0,01$	$1,77 \pm 0,31$	$5,71 \pm 0,54$	$5,6 \pm 3,1$	$214,5 \pm 4,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
HD 20794	5368 ± 64	$-0,42 \pm 0,02$	$4,39 \pm 0,03$	$0,93 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
HD 20794 f	$1,35 \pm 0,01$	$0,64 \pm 0,00$	$1,52 \pm 0,01$	$0,78 \pm 0,00$	$1,44 \pm 0,01$	Dentro	Dentro

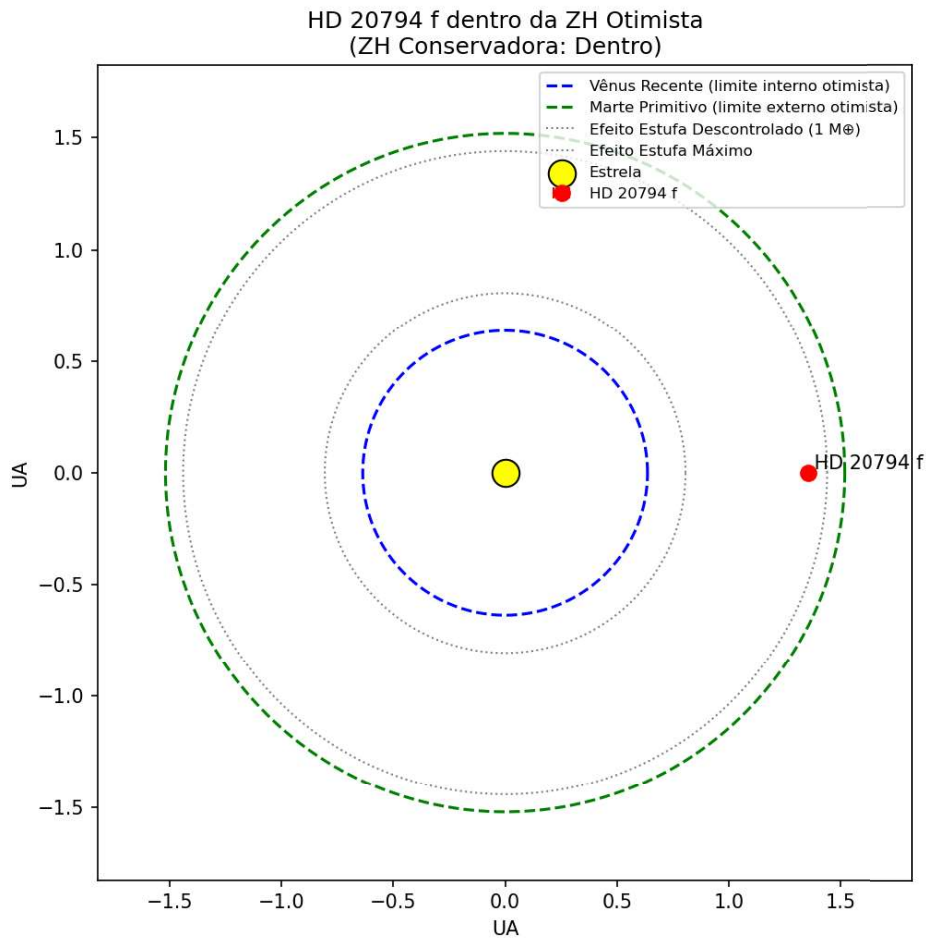


Figura D.48: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 20794 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

HD 20794 f está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Marte.

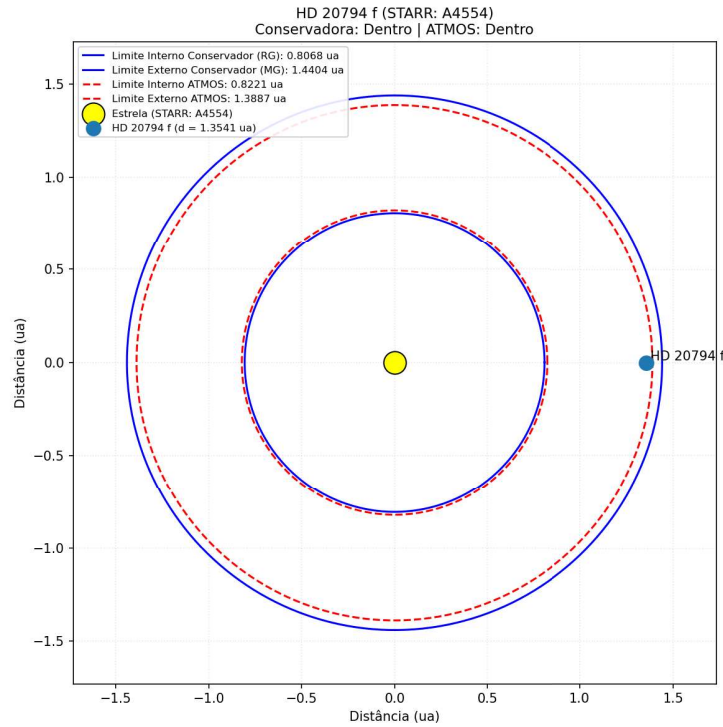


Figura D.49: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 20794 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

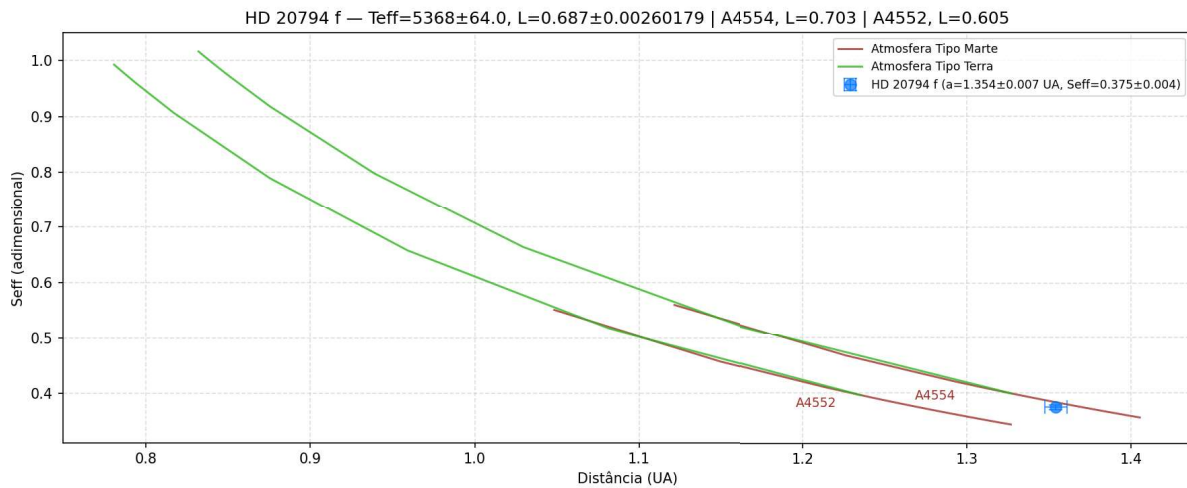


Figura D.50: Análise atmosférica de HD 20794 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.21 HD 216520 c

O exoplaneta HD 216520 c está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
HD 216520 c	$154,43 \pm 0,44$	$0,53 \pm 0,010$	$2,39 \pm 0,52$	$9,2 \pm 1,8$	$3,7 \pm 2,5$	$295,2 \pm 3,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
HD 216520	5103 ± 20	-0,16	$4,54 \pm 0,03$	$0,76 \pm 0,01$	$0,82 \pm 0,04$	$0,35 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
HD 216520 c	$0,53 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,00$	$1,12 \pm 0,01$	$0,57 \pm 0,00$	$1,06 \pm 0,01$	Dentro	Fora

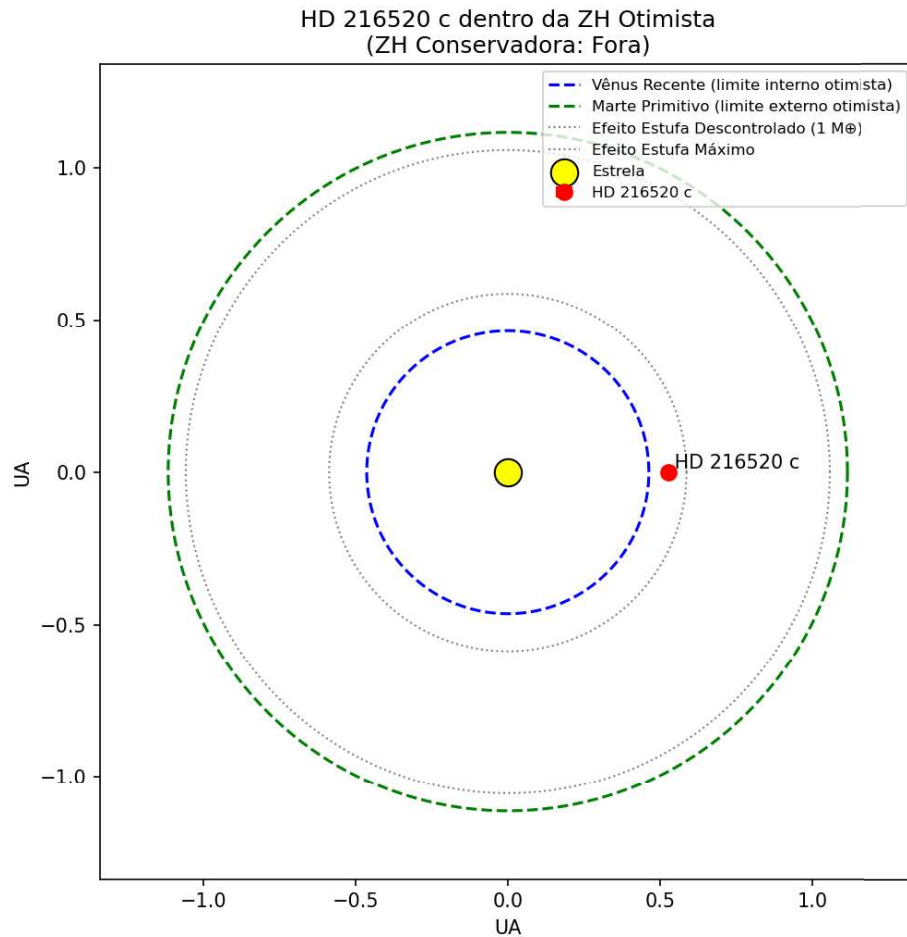


Figura D.51: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 216520 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.22 HD 40307 g

O exoplaneta HD 40307 g está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
HD 40307 g	$197,8 \pm 7,3$	$0,60 \pm 0,03$	$1,88 \pm 0,57$	$6,4 \pm 2,7$	$5,3 \pm 5,4$	261 ± 13

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
HD 40307	4956 ± 50	$-0,31 \pm 0,03$	$4,47 \pm 0,16$	$0,717 \pm 0,05$	$0,77 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,03$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
HD 40307 g	$0,60 \pm 0,03$	$0,38 \pm 0,026$	$0,91 \pm 0,06$	$0,46 \pm 0,03$	$0,86 \pm 0,06$	Dentro	Dentro

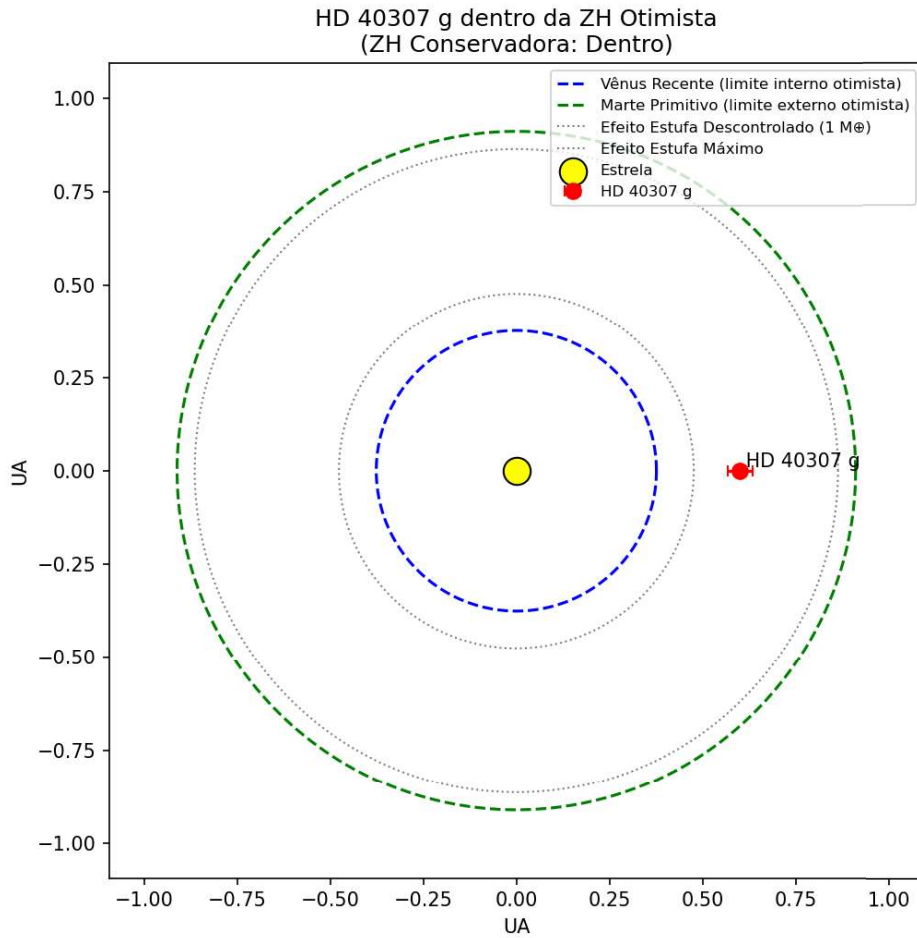


Figura D.52: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 40307 g com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

HD 40307 g está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

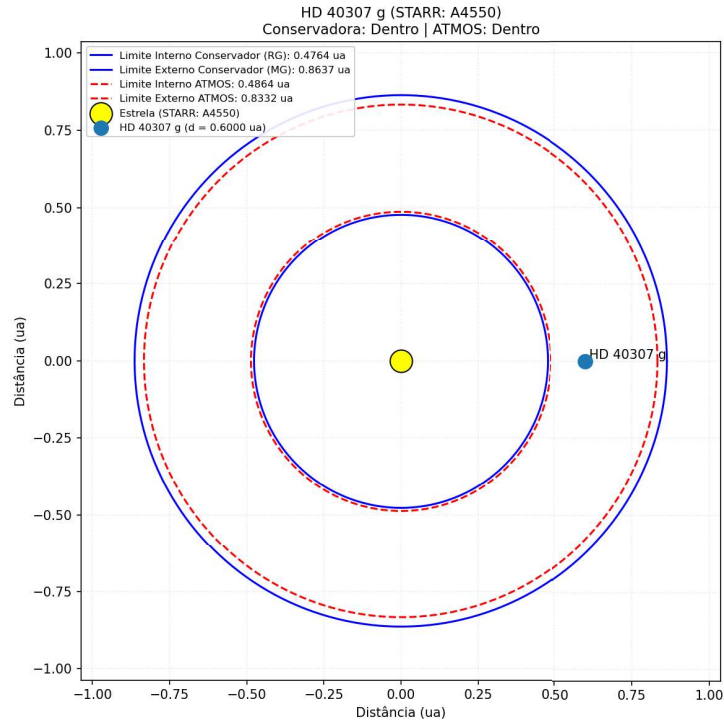


Figura D.53: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HD 40307 g com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

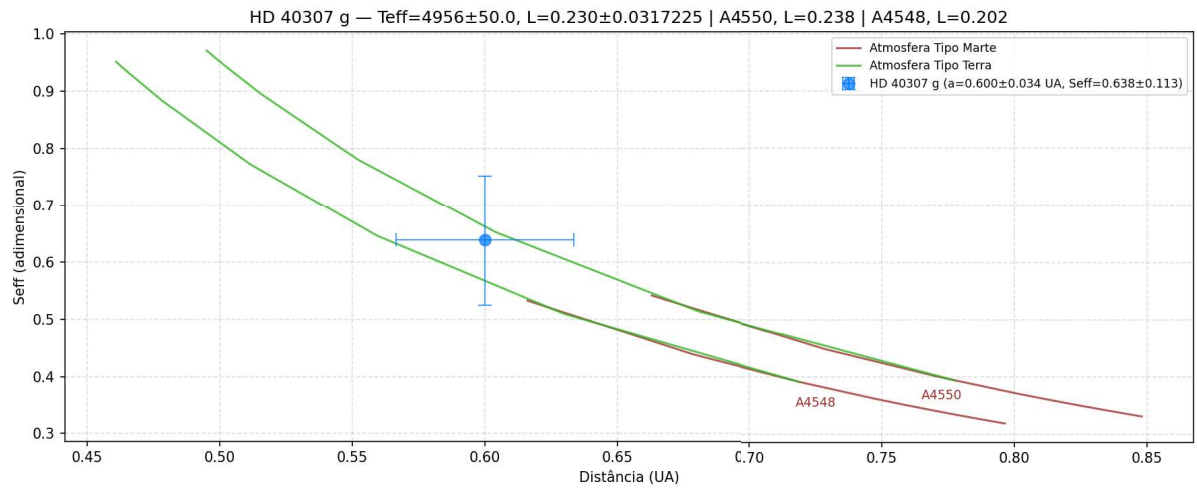


Figura D.54: Análise atmosférica de HD 40307 g por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.23 HN Lib b

O exoplaneta HN Lib b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	R_P [$R_\oplus$]	M_P [$M_\oplus$]	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
HN Lib b	$36,11 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,00$	$1,66 \pm 0,34$	$5,32 \pm 0,86$	$6,4 \pm 4,1$	$234,4 \pm 5,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
HN Lib	3347 ± 50	$-0,18 \pm 0,15$	$4,76 \pm 0,13$	$0,30 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
HN Lib b	$0,14 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,22 \pm 0,00$	$0,10 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

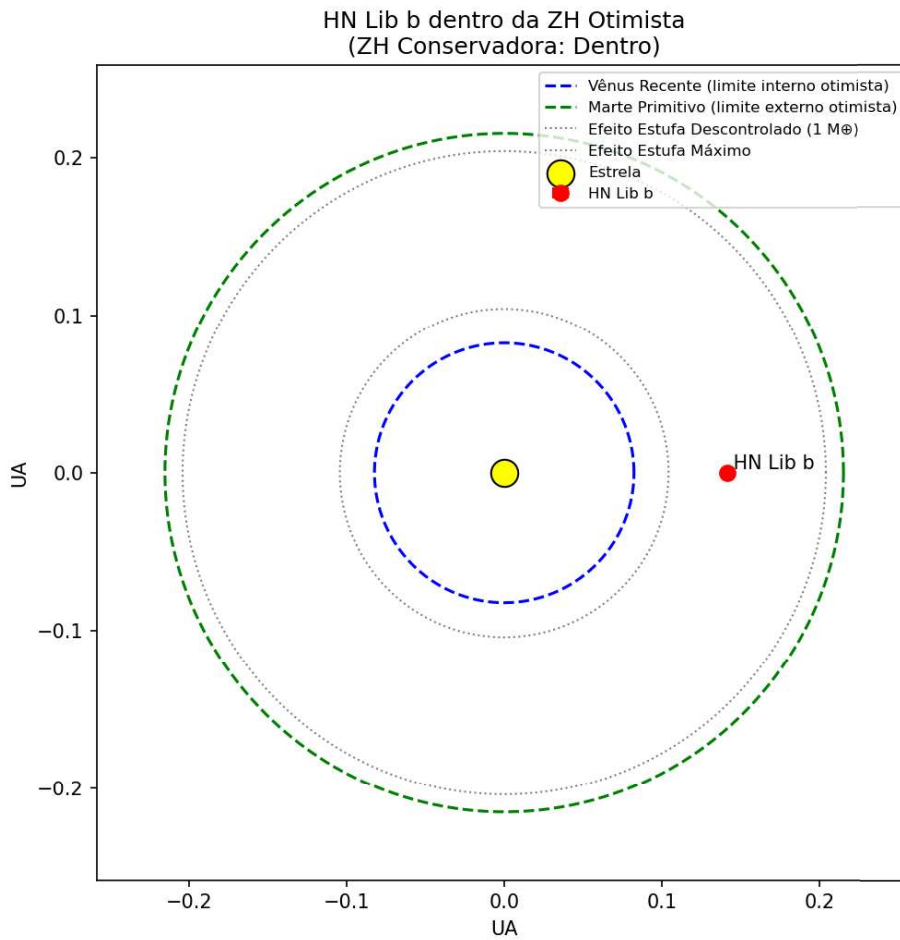


Figura D.55: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HN Lib b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

HN Lib b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

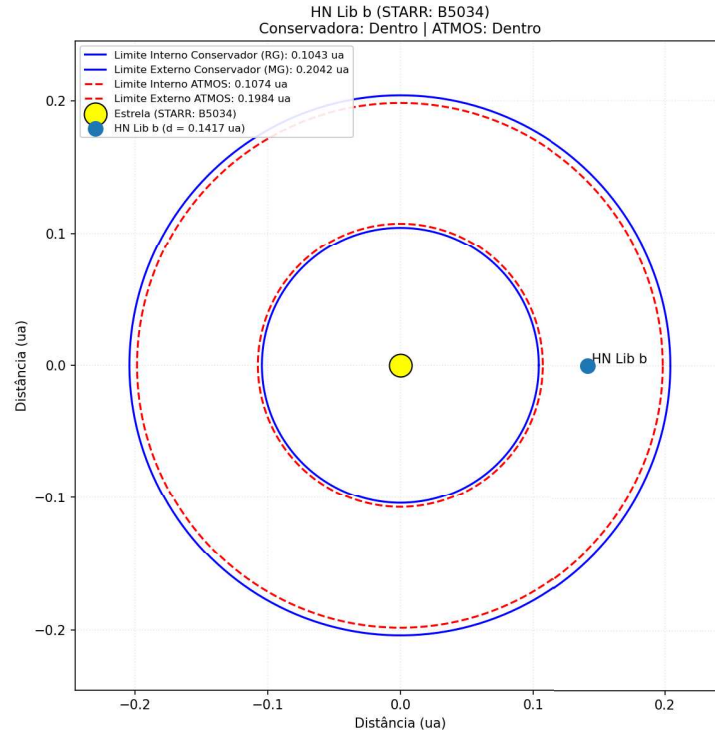


Figura D.56: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta HN Lib b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

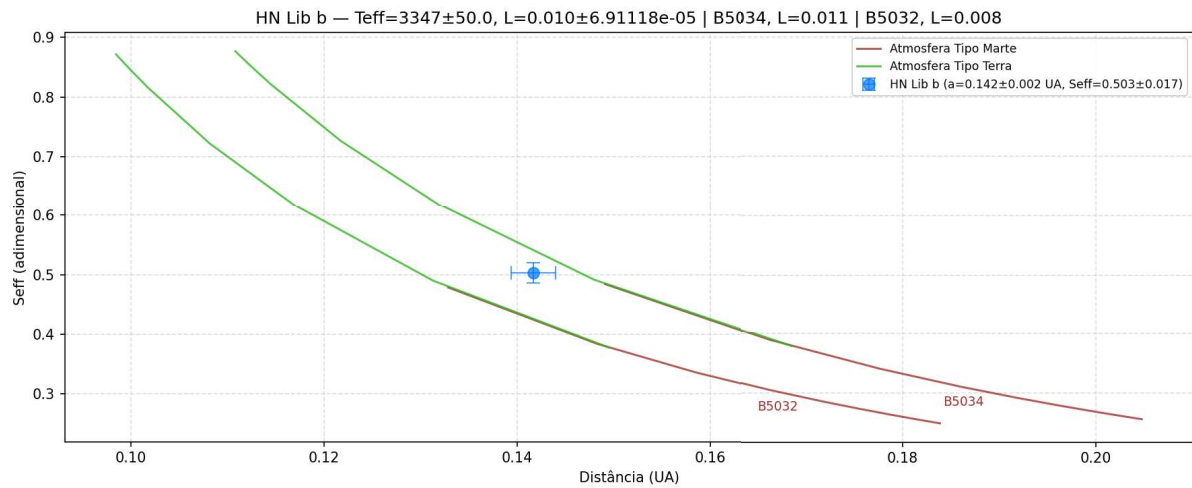


Figura D.57: Análise atmosférica de HN Lib b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.24 K2-18 b

O exoplaneta K2-18 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
K2-18 b	$32,94 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	$2,37 \pm 0,22$	$8,9 \pm 1,6$	$4,1 \pm 1,4$	283 ± 15

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
K2-18	3457 ± 39	$0,12 \pm 0,16$	$4,79 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,04$	$0,36 \pm 0,05$	$0,03 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
K2-18 b	$0,14 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,03$	$0,16 \pm 0,014$	$0,32 \pm 0,03$	Dentro	Fora

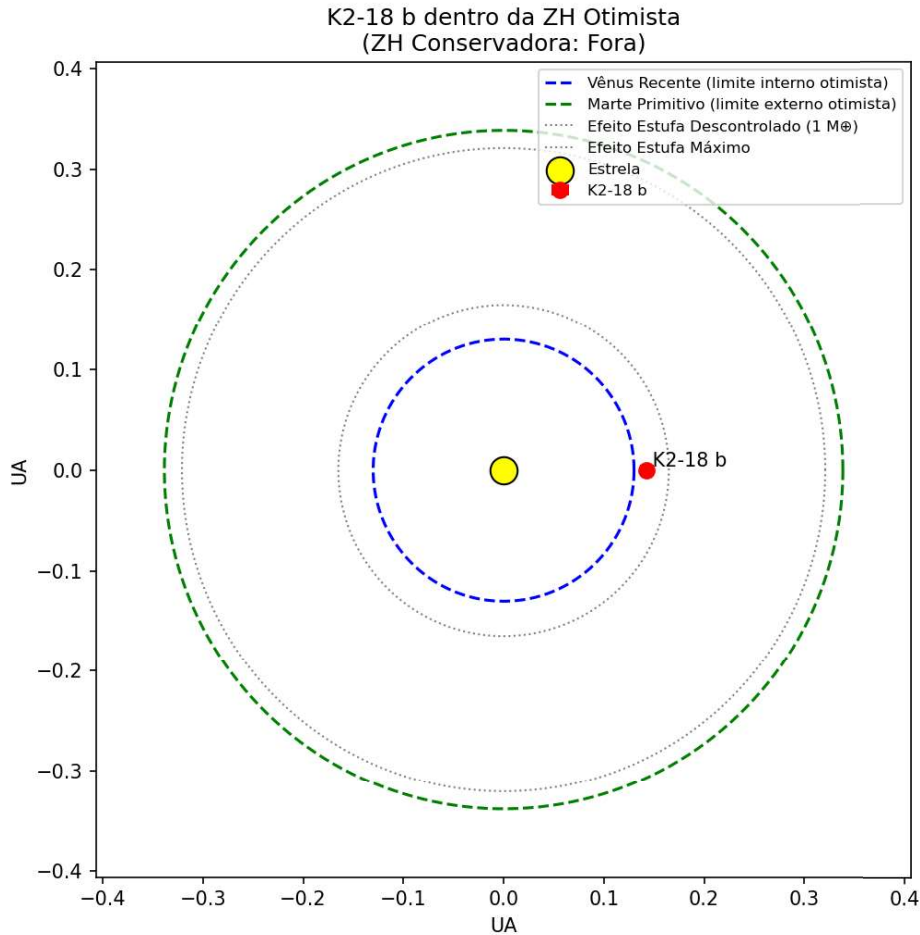


Figura D.58: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-18 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.25 K2-288 B b

O exoplaneta K2-288 B b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
K2-288 B b	$31,39 \pm 0,00$	$0,16 \pm 0,03$	$1,72 \pm 0,31$	$4,9 \pm 2,5$	$5,4 \pm 4,0$	225 ± 30

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
K2-288	3341 ± 276	$-0,21 \pm 0,09$	$4,96 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,03$	$0,33 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
K2-288 B b	$0,16 \pm 0,03$	$0,09 \pm 0,00$	$0,23 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,00$	$0,22 \pm 0,01$	Dentro	Dentro

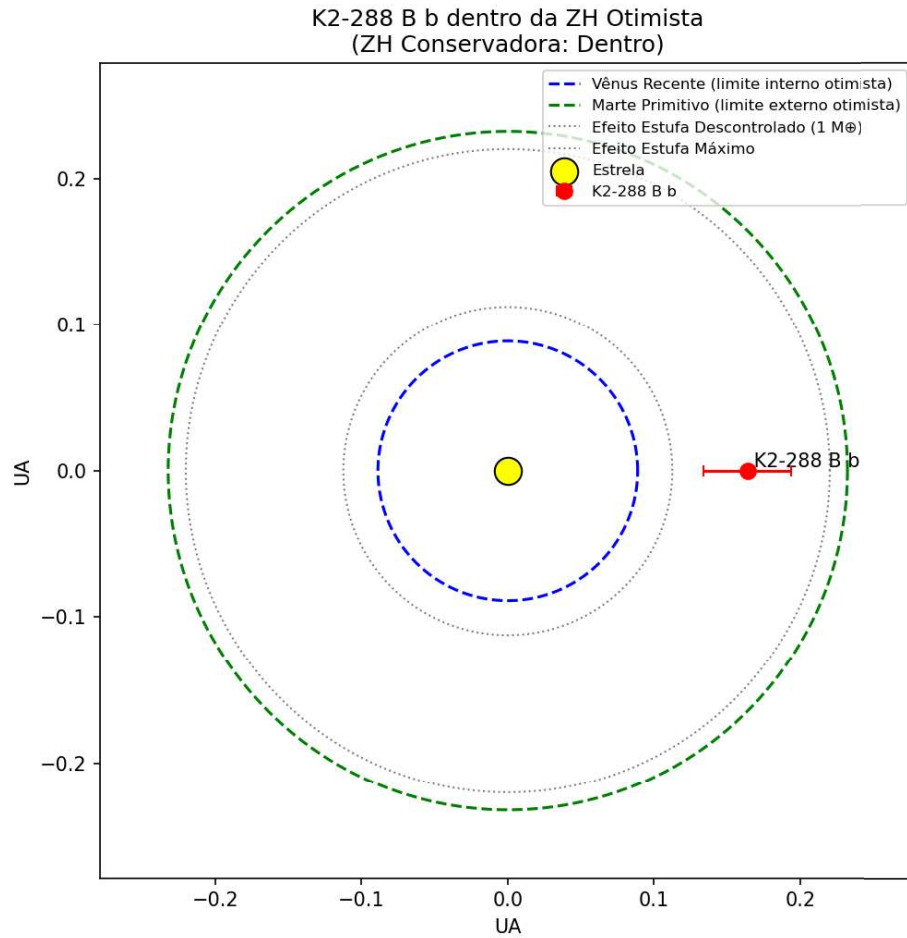


Figura D.59: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-288 B b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

K2-288 B b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

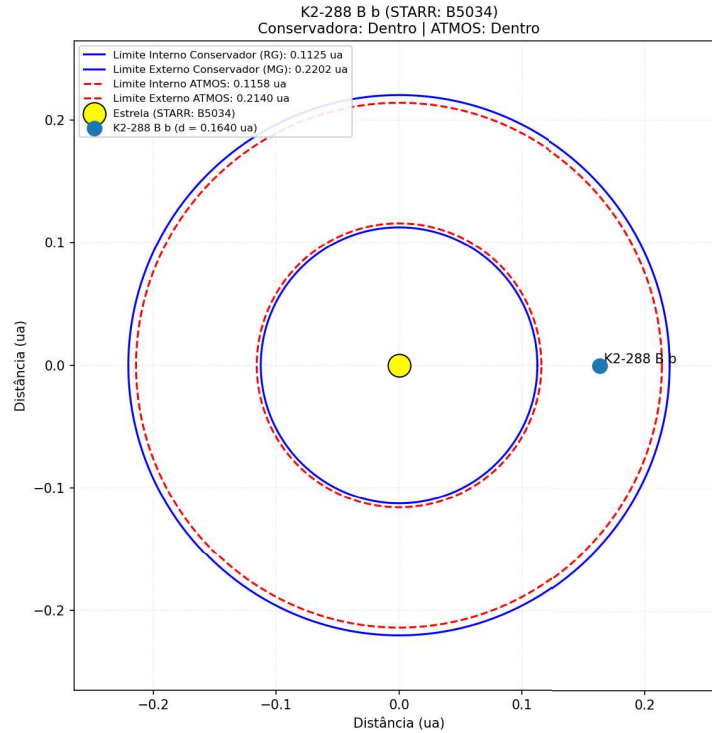


Figura D.60: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-288 B b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

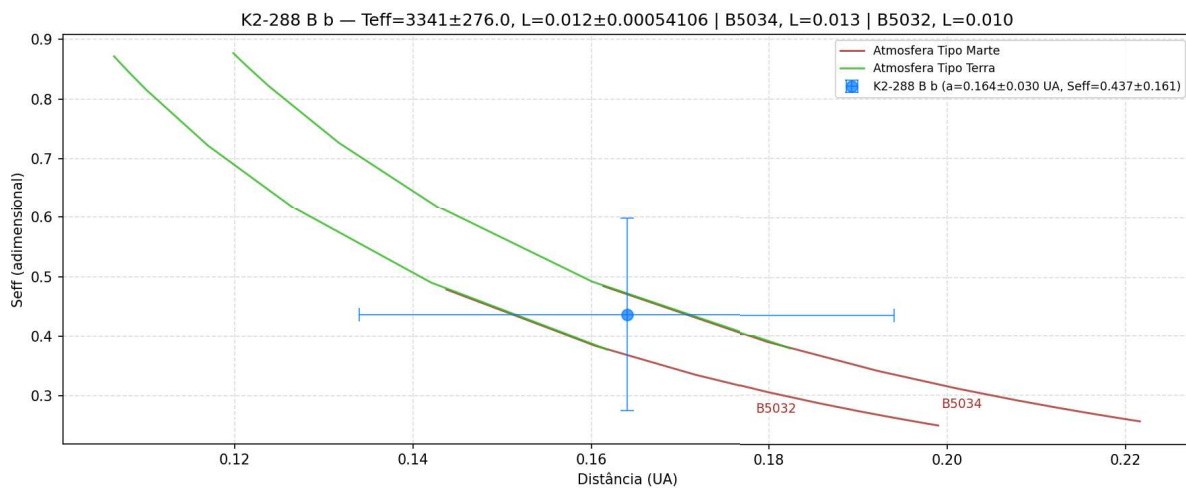


Figura D.61: Análise atmosférica de K2-288 B b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.26 K2-3 d

O exoplaneta K2-3 d está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
K2-3 d	$44,56 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,00$	$1,46 \pm 0,05$	$2,2 \pm 3,2$	$5,6 \pm 6,5$	$305,2 \pm 7,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
K2-3	3844 ± 62	$-0,16 \pm 0,08$	$4,70 \pm 0,03$	$0,55 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
K2-3 d	$0,20 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,00$	$0,50 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,00$	$0,48 \pm 0,01$	Dentro	Fora

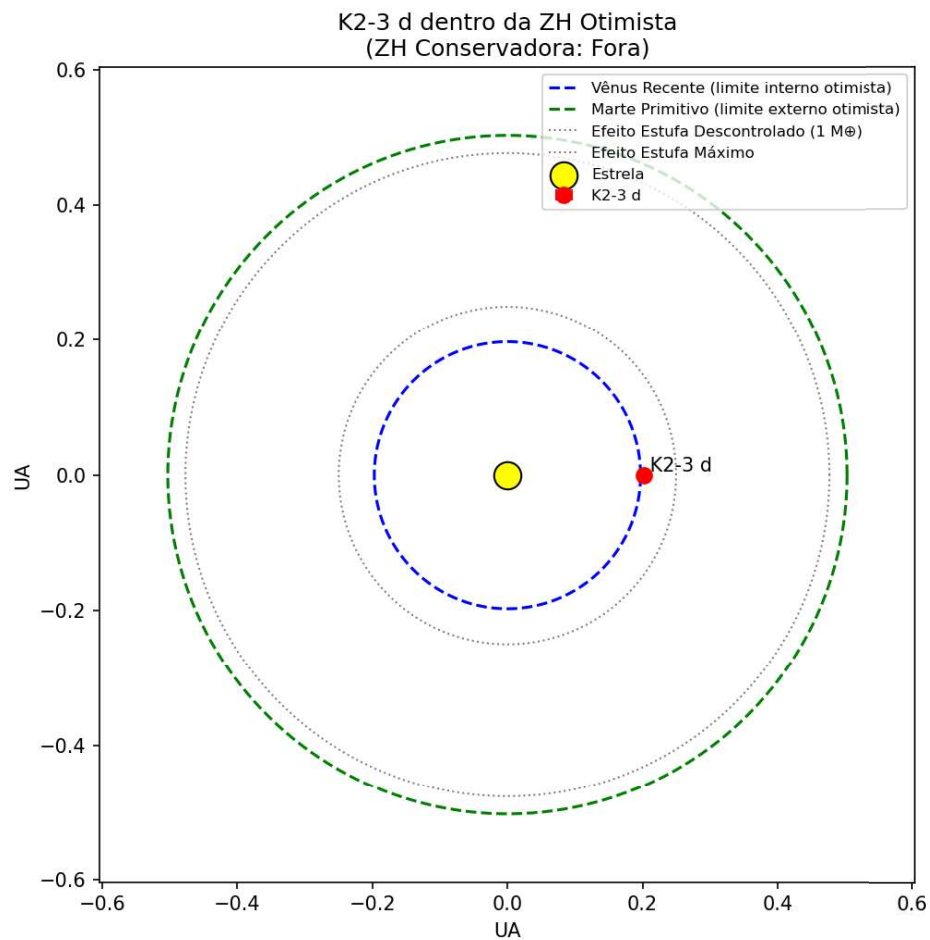


Figura D.62: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-3 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.27 K2-332 b

O exoplaneta K2-332 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
K2-332 b	$17,71 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$2,21 \pm 0,17$	$8,3 \pm 2,0$	$4,2 \pm 1,4$	289 ± 15

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
K2-332	3315 ± 144	$0,09 \pm 0,16$	$4,97 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
K2-332 b	$0,09 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,012$	$0,19 \pm 0,02$	Dentro	Fora

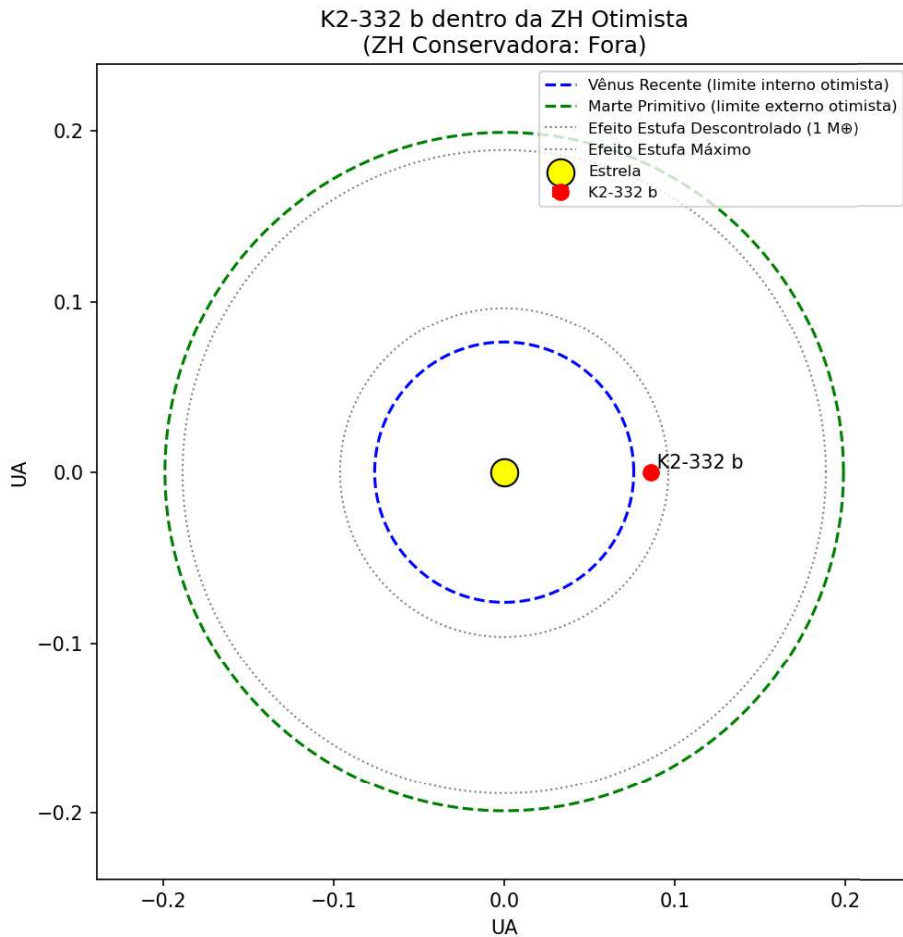


Figura D.63: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-332 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.28 K2-72 e

O exoplaneta K2-72 e está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
K2-72 e	$24,16 \pm 0,00$	$0,10 \pm 0,01$	$1,28 \pm 0,13$	$3,2 \pm 1,5$	$8,4 \pm 4,7$	286 ± 21

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
K2-72	3360 ± 87	—	$5,05 \pm 0,08$	$0,33 \pm 0,030$	$0,27 \pm 0,09$	$0,013 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
K2-72 e	$0,11 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,02$	Dentro	Fora

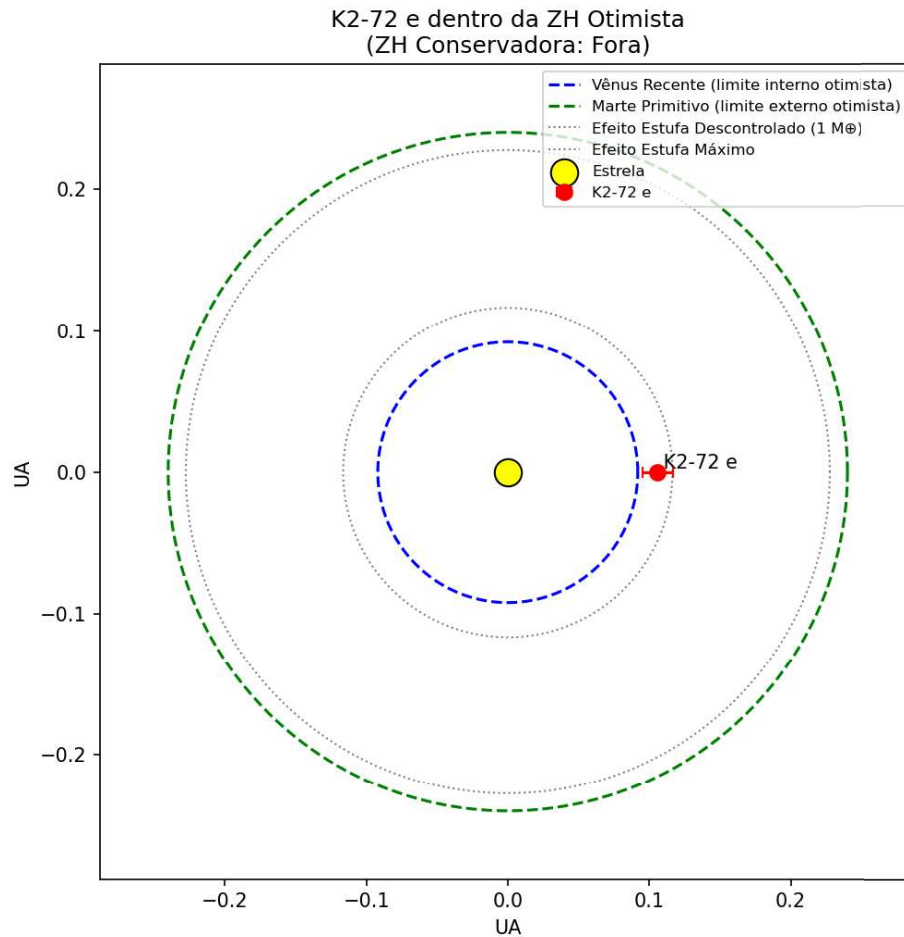


Figura D.64: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-72 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.29 K2-9 b

O exoplaneta K2-9 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
K2-9 b	$18,45 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,02$	$2,26 \pm 0,58$	$8,6 \pm 3,7$	$4,1 \pm 3,6$	302 ± 60

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
K2-9	3390 ± 150	$-0,25 \pm 0,20$	$4,81 \pm 0,07$	$0,31 \pm 0,11$	$0,30 \pm 0,14$	$0,012 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
K2-9 b	$0,09 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,14$	$0,11 \pm 0,07$	$0,22 \pm 0,13$	Dentro	Fora

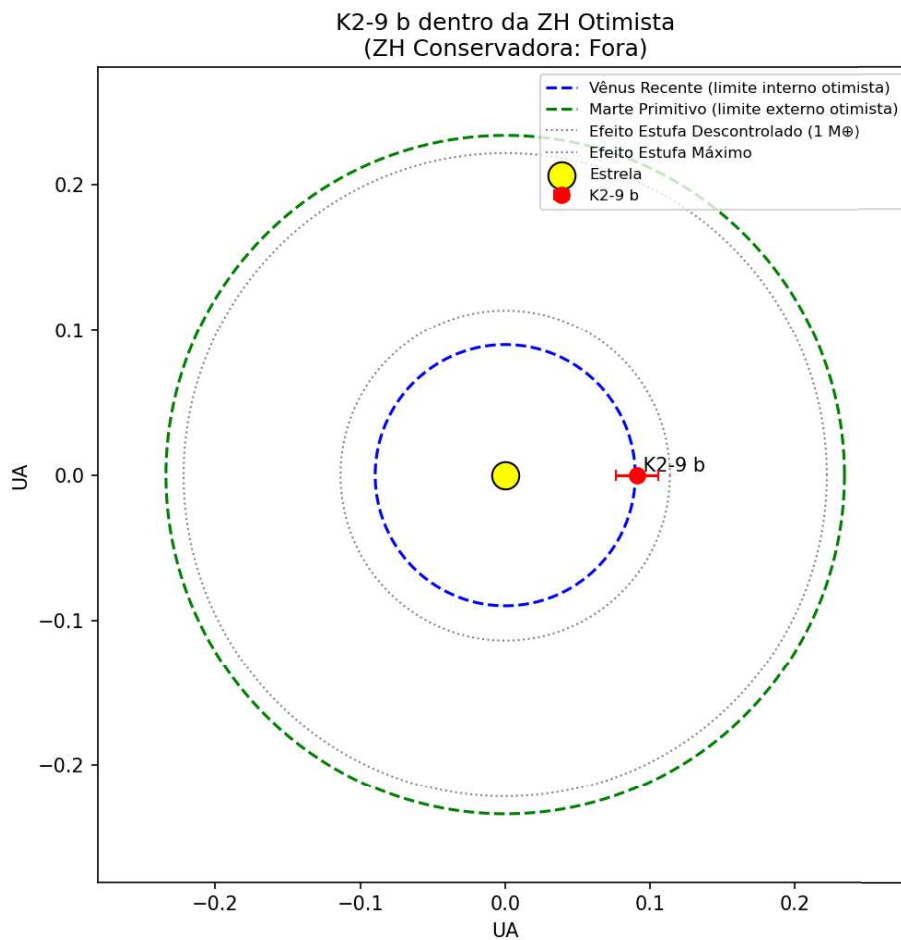


Figura D.65: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta K2-9 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.30 Kepler-1229 b

O exoplaneta Kepler-1229 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1229 b	$86,83 \pm 0,00$	$0,29 \pm 0,01$	$1,40 \pm 0,11$	$3,5 \pm 1,4$	$7,1 \pm 3,4$	$242,0 \pm 8,0$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-1229	3784 ± 39	$-0,06 \pm 0,10$	$4,75 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,03$	$0,54 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1229 b	$0,29 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,02$	$0,50 \pm 0,059$	$0,24 \pm 0,03$	$0,48 \pm 0,06$	Dentro	Dentro

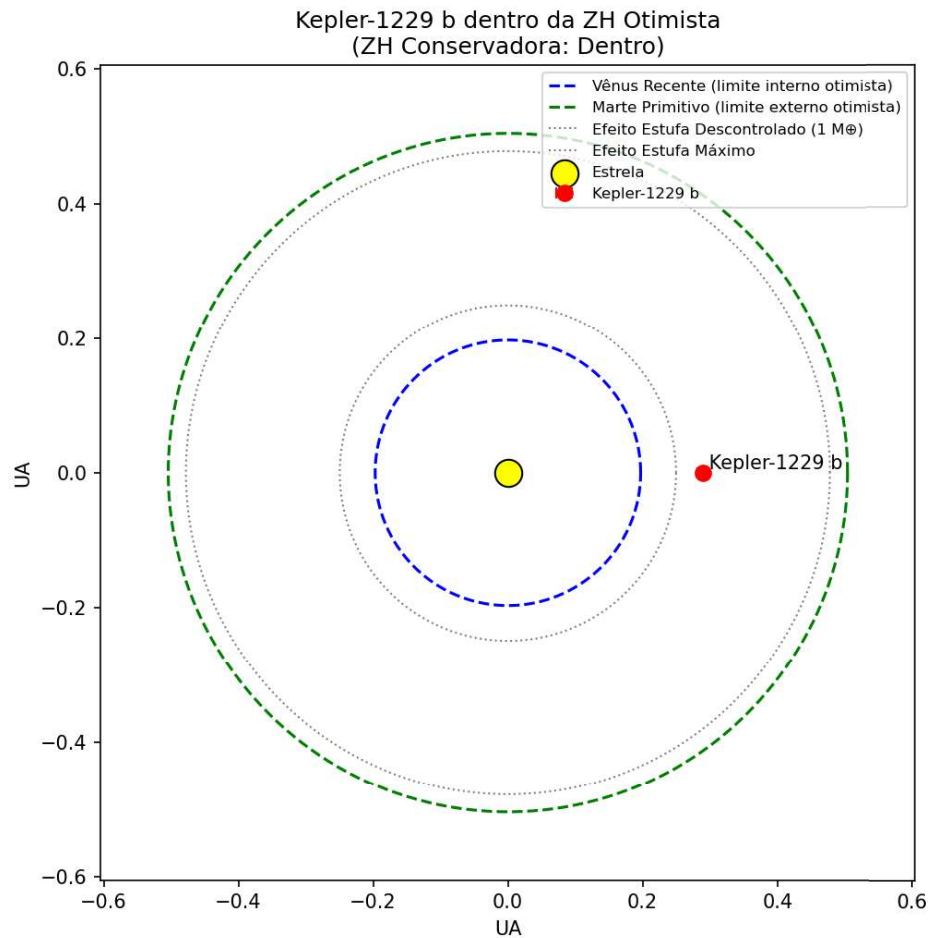


Figura D.66: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1229 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-1229 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

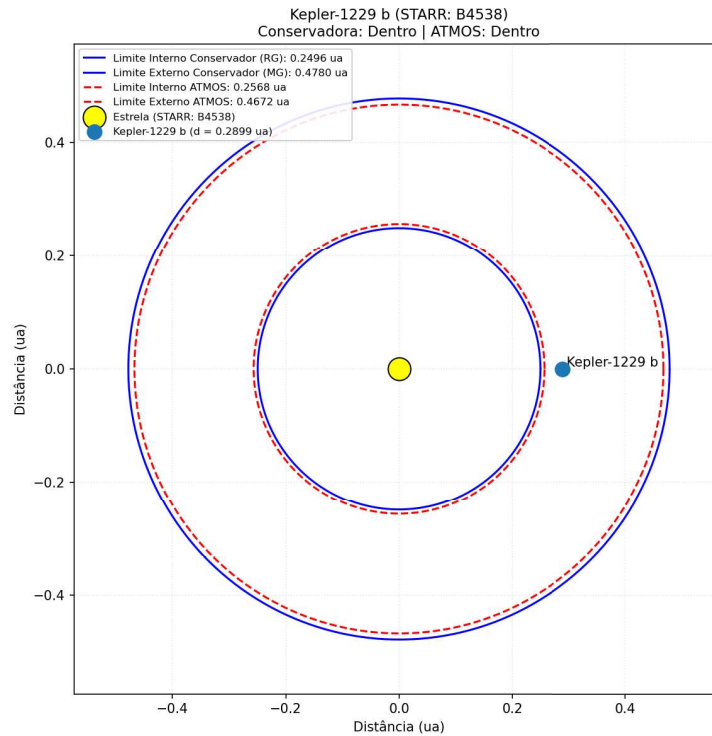


Figura D.67: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1229 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

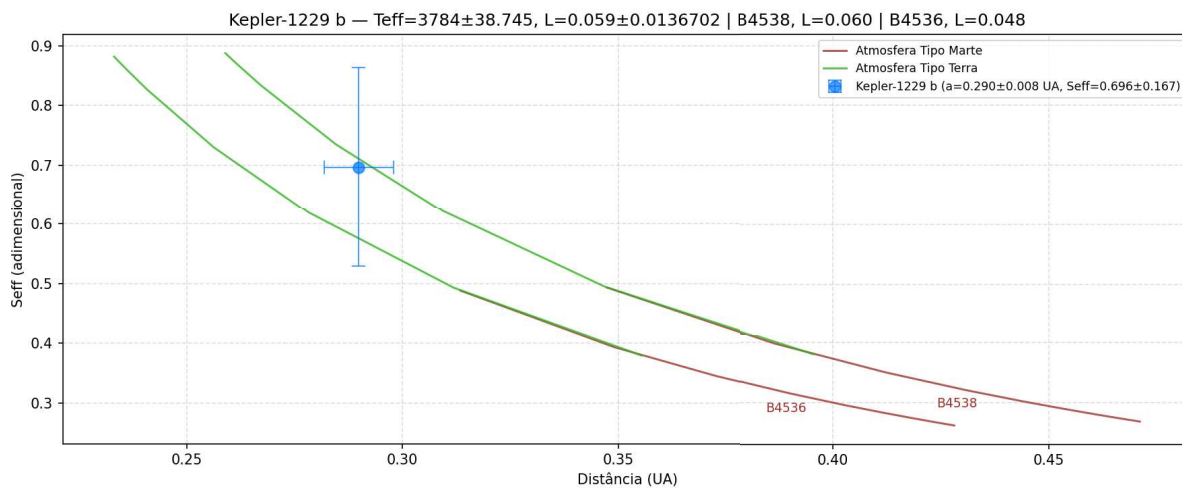


Figura D.68: Análise atmosférica de Kepler-1229 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.31 Kepler-1410 b

O exoplaneta Kepler-1410 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1410 b	$60,87 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,00$	$1,76 \pm 0,15$	$6,0 \pm 2,3$	$6,0 \pm 2,7$	308 ± 11

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-1410	4092 ± 89	$0,01 \pm 0,15$	$4,67 \pm 0,03$	$0,60 \pm 0,03$	$0,63 \pm 0,04$	$0,07 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1410 b	$0,25 \pm 0,00$	$0,21 \pm 0,02$	$0,54 \pm 0,04$	$0,26 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,04$	Dentro	Fora

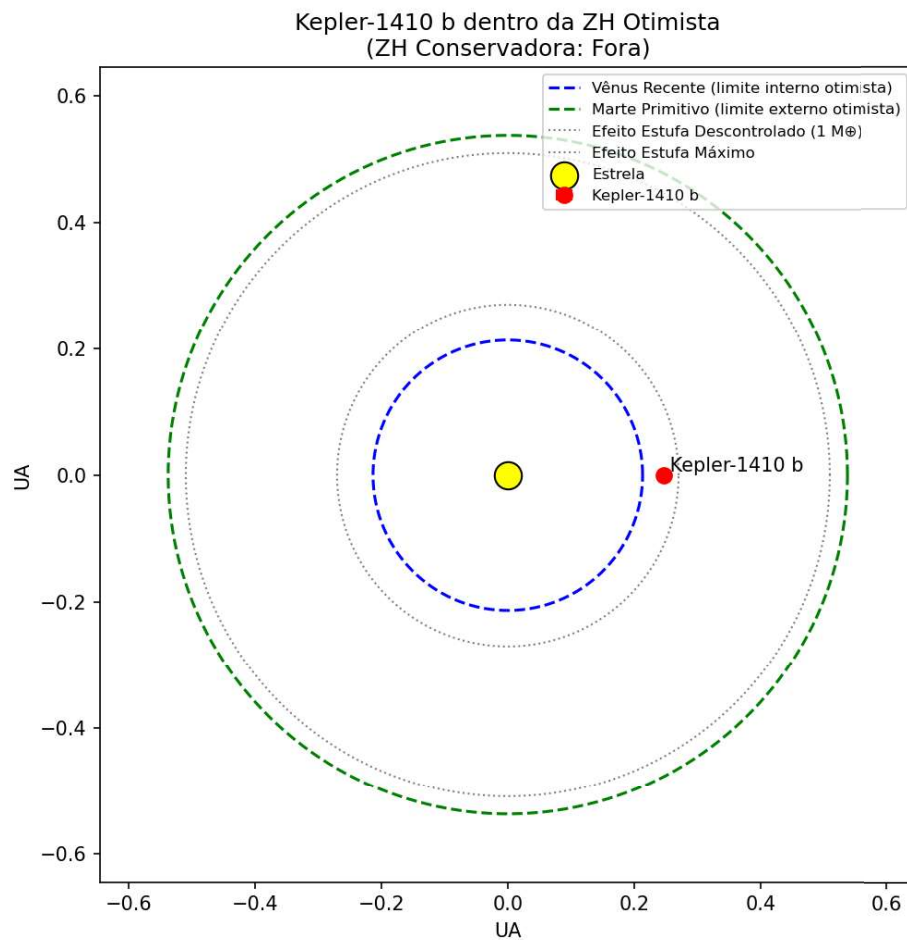


Figura D.69: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1410 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.32 Kepler-1512 b

O exoplaneta Kepler-1512 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1512 b	$20,36 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$1,20 \pm 0,09$	$2,4 \pm 1,2$	$7,6 \pm 4,1$	480 ± 17

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-1512	4372 ± 61	$0,20 \pm 0,25$	$4,64 \pm 0,01$	$0,67 \pm 0,04$	$0,73 \pm 0,06$	$0,02 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1512 b	$0,13 \pm 0,00$	$0,11 \pm 0,02$	$0,28 \pm 0,06$	$0,14 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,06$	Dentro	Fora

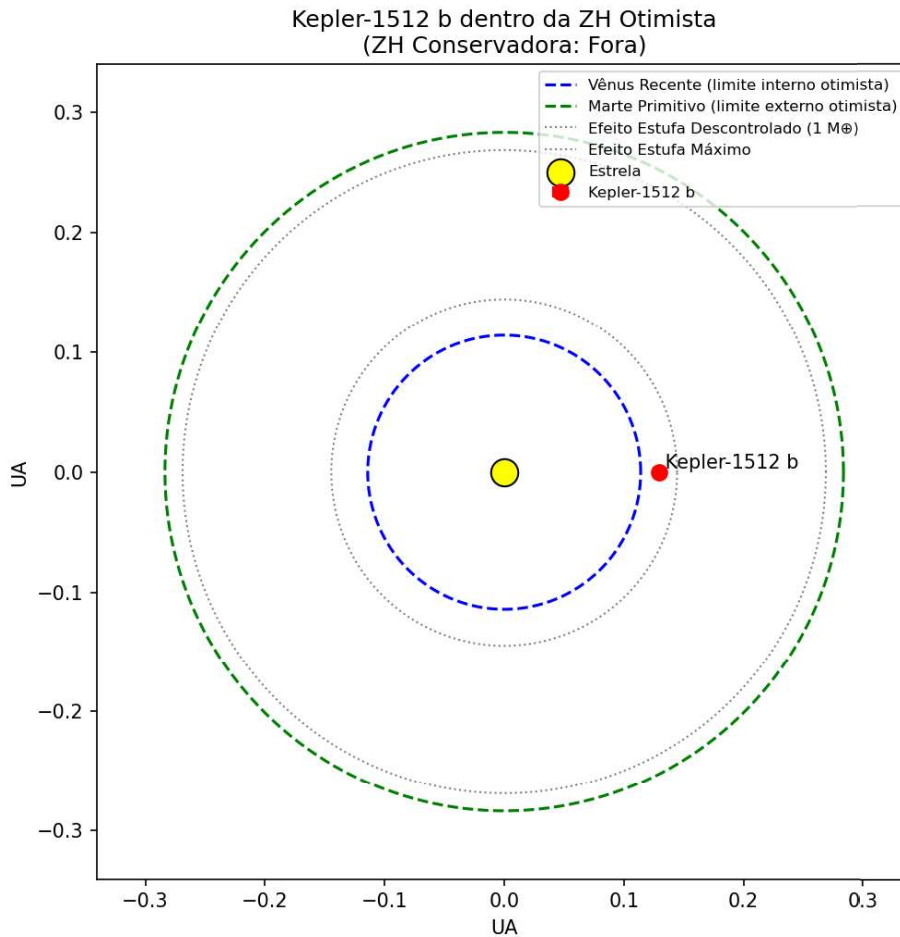


Figura D.70: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1512 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.33 Kepler-1544 b

O exoplaneta Kepler-1544 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1544 b	$168,81 \pm 0,00$	$0,54 \pm 0,01$	$1,79 \pm 0,075$	$6,4 \pm 1,3$	$6,2 \pm 1,5$	$275,8 \pm 5,2$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-1544	4886 ± 65	$0,02 \pm 0,11$	$4,61 \pm 0,01$	$0,74 \pm 0,02$	$0,81 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,04$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1544 b	$0,54 \pm 0,01$	$0,41 \pm 0,03$	$0,99 \pm 0,08$	$0,50 \pm 0,04$	$0,94 \pm 0,07$	Dentro	Dentro

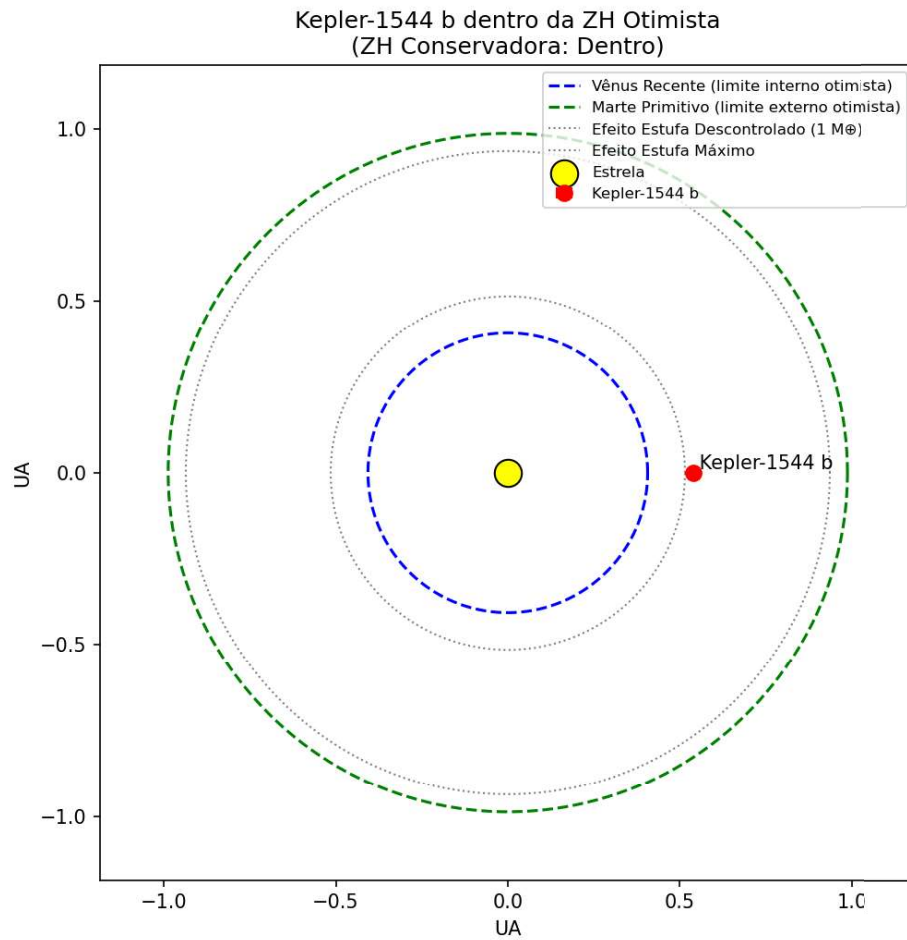


Figura D.71: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1544 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-1544 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

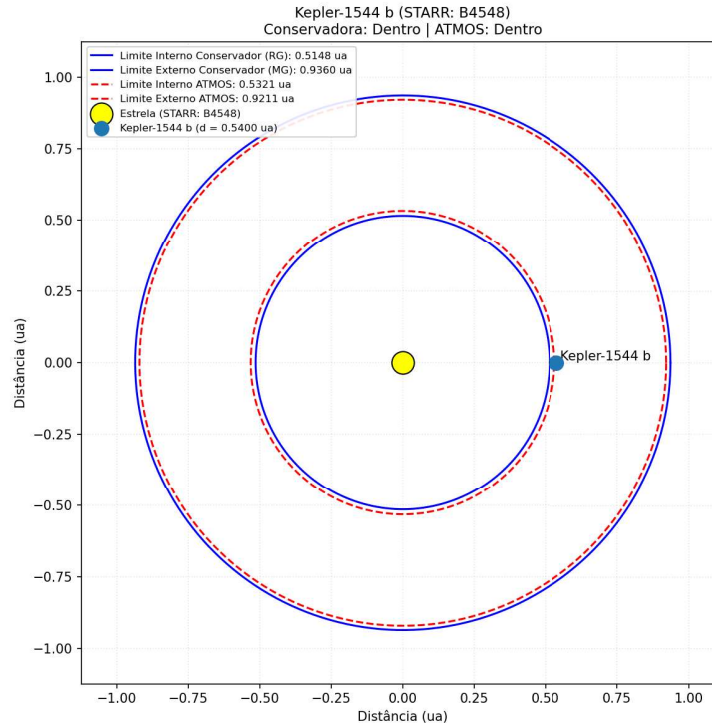


Figura D.72: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1544 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

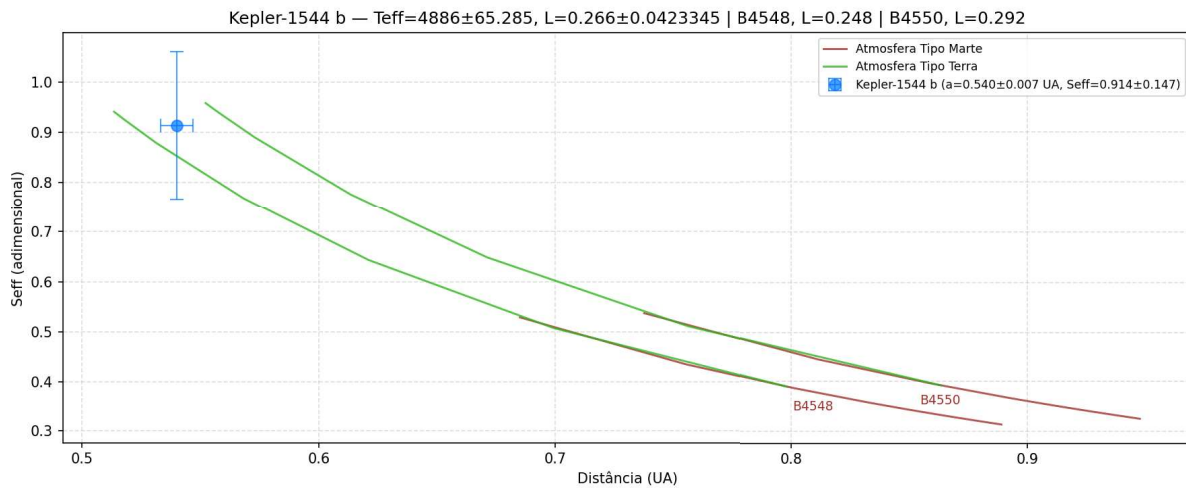


Figura D.73: Análise atmosférica de Kepler-1544 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.34 Kepler-1606 b

O exoplaneta Kepler-1606 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1606 b	$196,43 \pm 0,00$	$0,64 \pm 0,01$	$2,03 \pm 0,20$	$6,9 \pm 1,8$	$4,6 \pm 1,8$	304 ± 12

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-1606	5422 ± 62	$0,01 \pm 0,15$	$4,53 \pm 0,06$	$0,86 \pm 0,06$	$0,90 \pm 0,04$	$0,52 \pm 0,12$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1606 b	$0,64 \pm 0,01$	$0,56 \pm 0,06$	$1,32 \pm 0,15$	$0,68 \pm 0,079$	$1,25 \pm 0,14$	Dentro	Fora

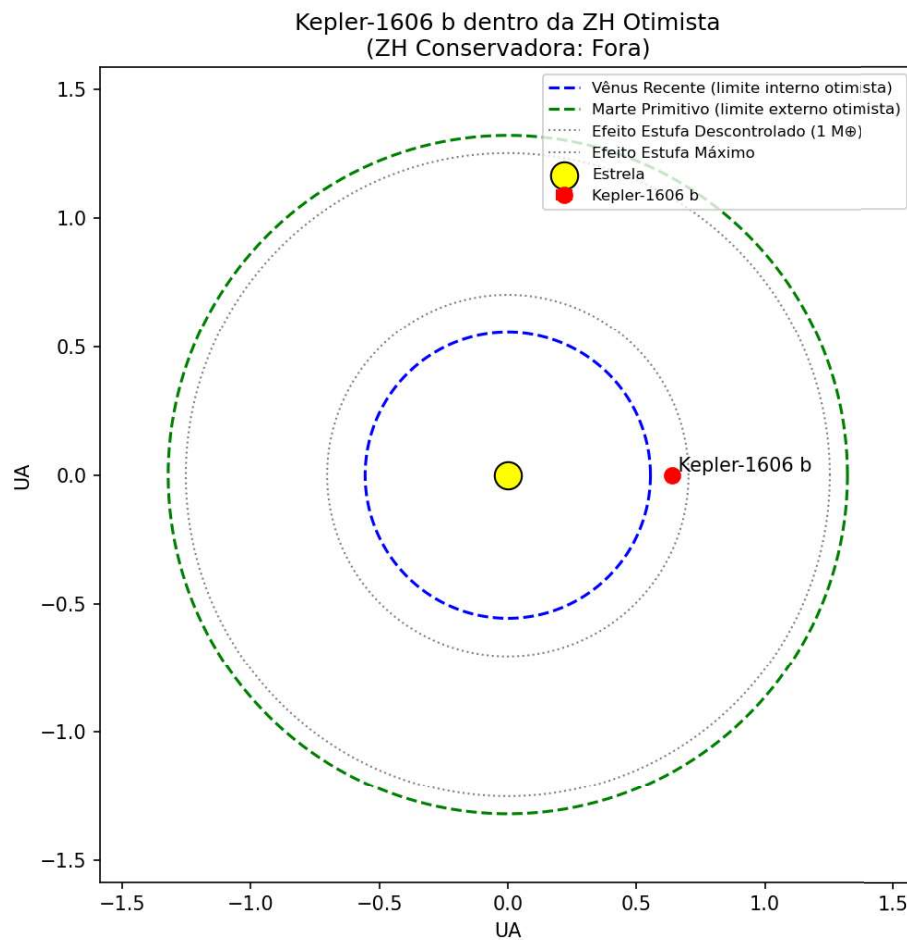


Figura D.74: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1606 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.35 Kepler-1649 c

O exoplaneta Kepler-1649 c está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1649 c	$19,54 \pm 0,00$	0,065	$0,97 \pm 0,12$	$0,57 \pm 0,43$	$3,5 \pm 2,9$	$295,2 \pm 6,4$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-1649	3240 ± 61	$-0,15 \pm 0,11$	$5,00 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1649 c	0,06	$0,06 \pm 0,00$	$0,15 \pm 0,00$	$0,07 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,00$	Dentro	Fora

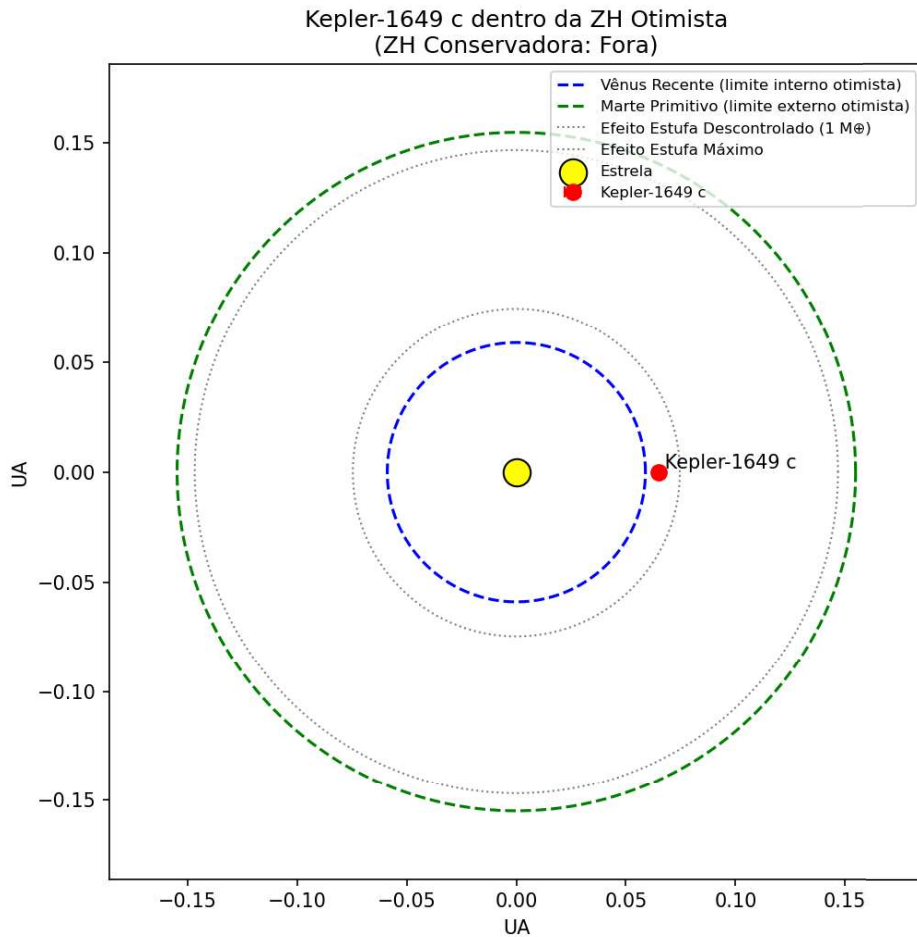


Figura D.75: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1649 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.36 Kepler-1652 b

O exoplaneta Kepler-1652 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1652 b	$38,10 \pm 0,00$	$0,17 \pm 0,01$	$1,47 \pm 0,17$	$2,4 \pm 1,3$	$4,1 \pm 2,7$	267 ± 15

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-1652	3638 ± 51	$-0,30 \pm 0,12$	$4,88 \pm 0,04$	$0,38 \pm 0,04$	$0,40 \pm 0,04$	$0,023 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1652 b	$0,17 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,04$	$0,16 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,04$	Dentro	Dentro

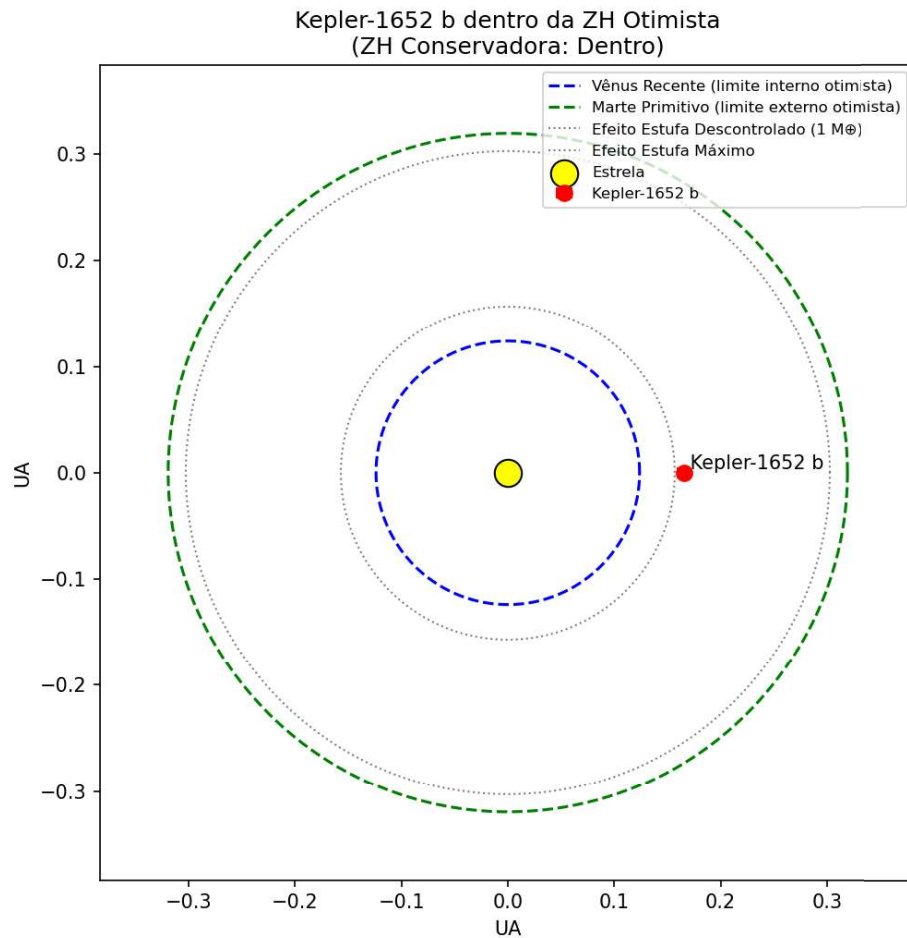


Figura D.76: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1652 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-1652 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

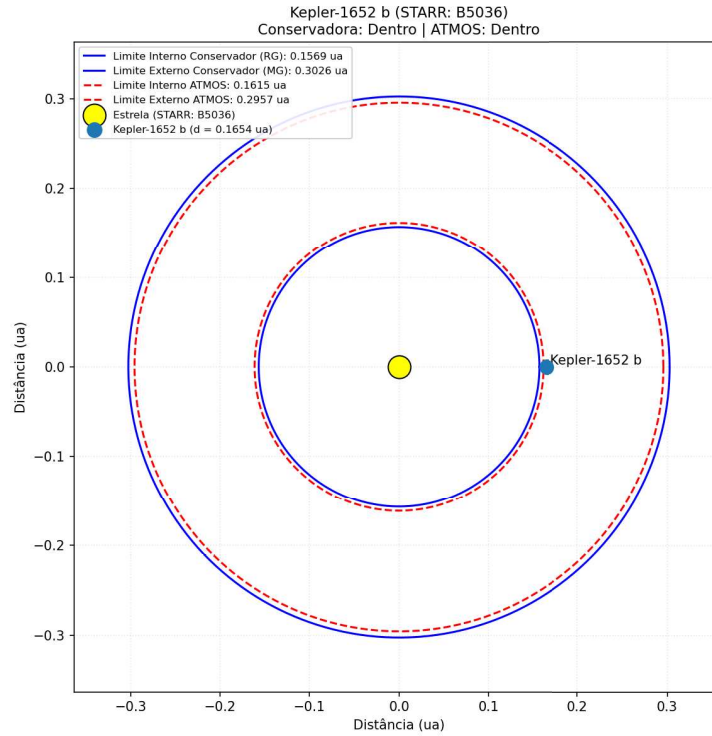


Figura D.77: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1652 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

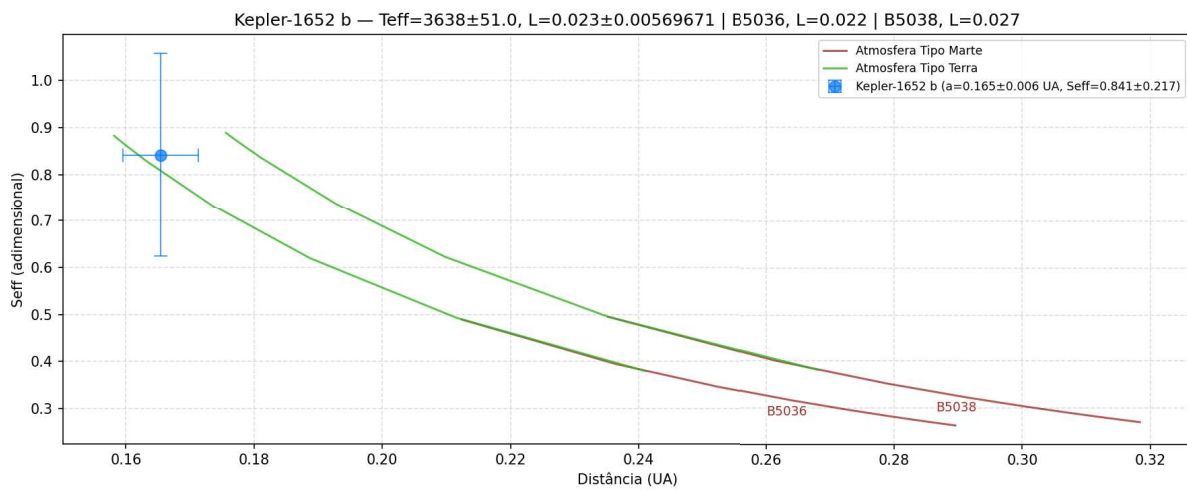


Figura D.78: Análise atmosférica de Kepler-1652 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.37 Kepler-1653 b

O exoplaneta Kepler-1653 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1653 b	$140,25 \pm 0,00$	$0,47 \pm 0,01$	$2,14 \pm 0,20$	$7,5 \pm 2,2$	$4,2 \pm 1,8$	$281,3 \pm 8,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-1653	4807 ± 100	$-0,18 \pm 0,10$	$4,6 \pm 0,02$	$0,69 \pm 0,03$	$0,72 \pm 0,03$	$0,23 \pm 0,04$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1653 b	$0,47 \pm 0,01$	$0,38 \pm 0,03$	$0,93 \pm 0,07$	$0,46 \pm 0,04$	$0,88 \pm 0,07$	Dentro	Fora

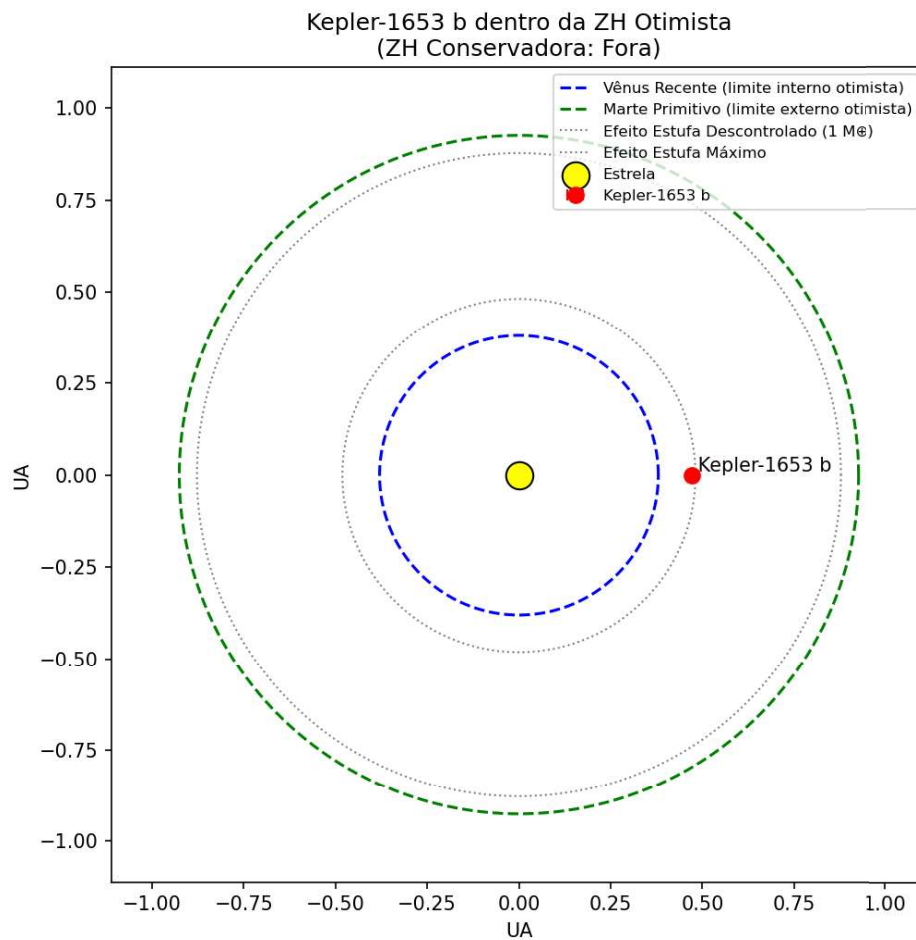


Figura D.79: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1653 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.38 Kepler-1701 b

O exoplaneta Kepler-1701 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-1701 b	$169,13 \pm 0,00$	$0,57 \pm 0,00$	$2,11 \pm 0,50$	$6,8 \pm 4,1$	$4,0 \pm 3,7$	302 ± 27

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-1701	5146 ± 25	$0,03 \pm 0,10$	$4,53 \pm 0,11$	$0,84 \pm 0,15$	$0,870 \pm 0,088$	0,446

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-1701 b	$0,57 \pm 0,00$	0,52	1,25	0,64	1,18	Dentro	Fora

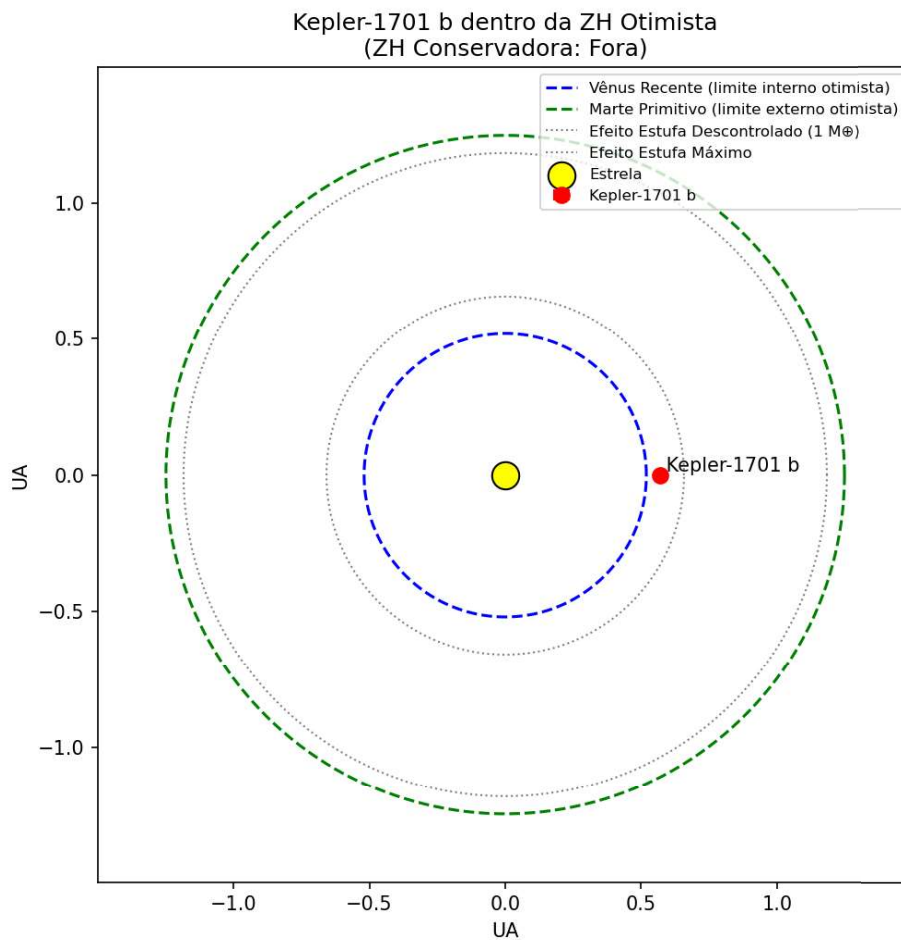


Figura D.80: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-1701 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.39 Kepler-174 d

O exoplaneta Kepler-174 d está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-174 d	$247,35 \pm 0,00$	0,68	$2,19 \pm 0,12$	$8,0 \pm 1,8$	$4,2 \pm 1,2$	$225,6 \pm 8,2$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-174	4880 ± 126	$-0,44 \pm 0,10$	$4,68 \pm 0,15$	$0,62 \pm 0,03$	$0,76 \pm 0,02$	0,27

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-174 d	0,68	0,41	0,99	0,50	0,94	Dentro	Dentro

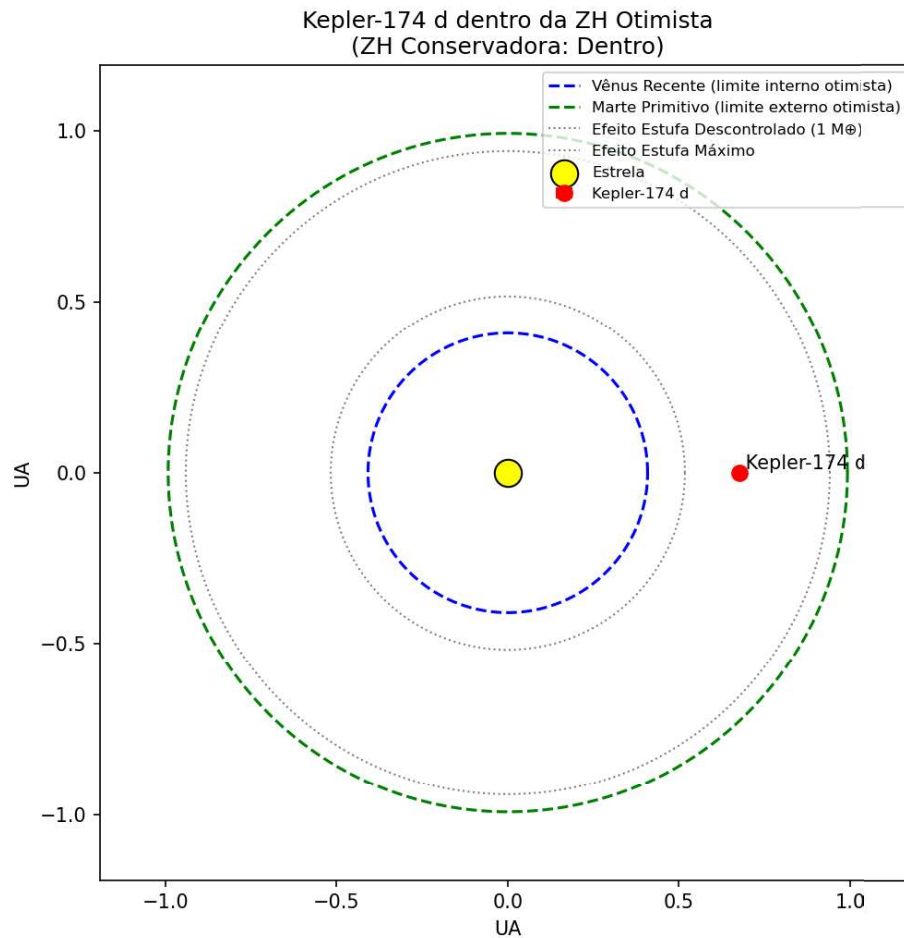


Figura D.81: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-174 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-174 d está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

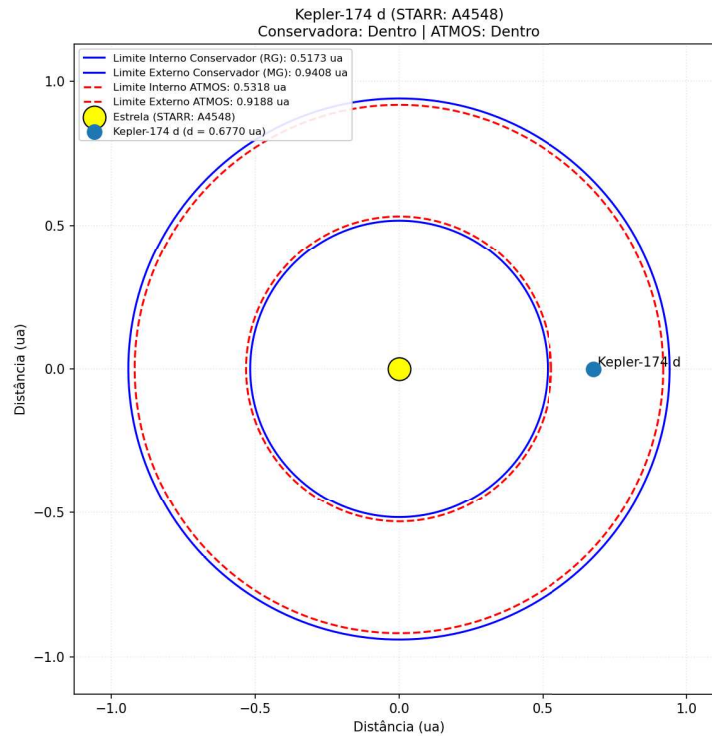


Figura D.82: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-174 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

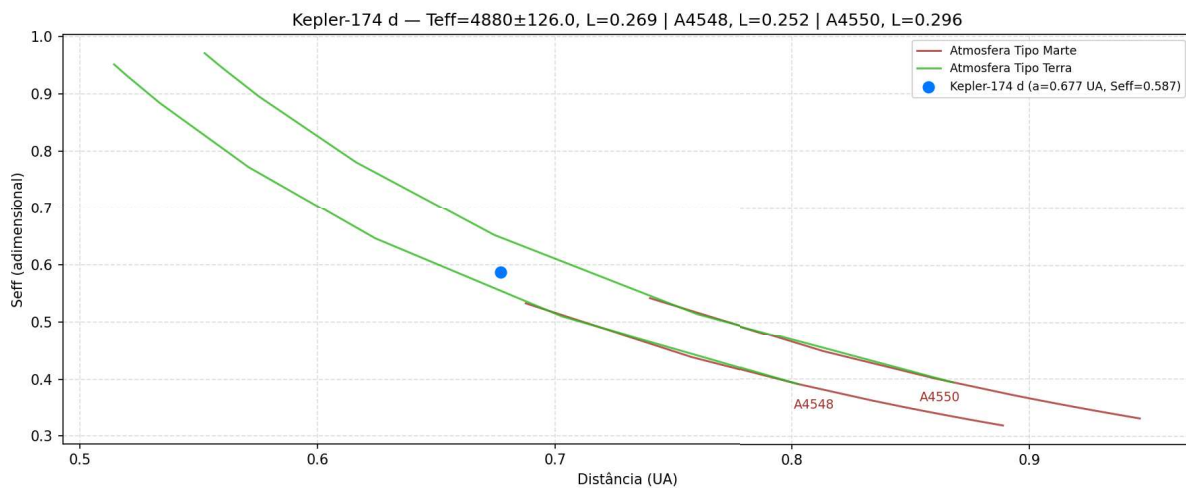


Figura D.83: Análise atmosférica de Kepler-174 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.40 Kepler-186 f

O exoplaneta Kepler-186 f está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-186 f	$129,94 \pm 0,00$	$0,43 \pm 0,11$	$1,16 \pm 0,08$	$1,8 \pm 1,5$	$6,3 \pm 5,5$	199 ± 27

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-186	3755 ± 90	$-0,26 \pm 0,12$	$4,73 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,02$	$0,54 \pm 0,02$	$0,055 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-186 f	$0,43 \pm 0,11$	$0,19 \pm 0,01$	$0,49 \pm 0,037$	$0,24 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,03$	Dentro	Dentro

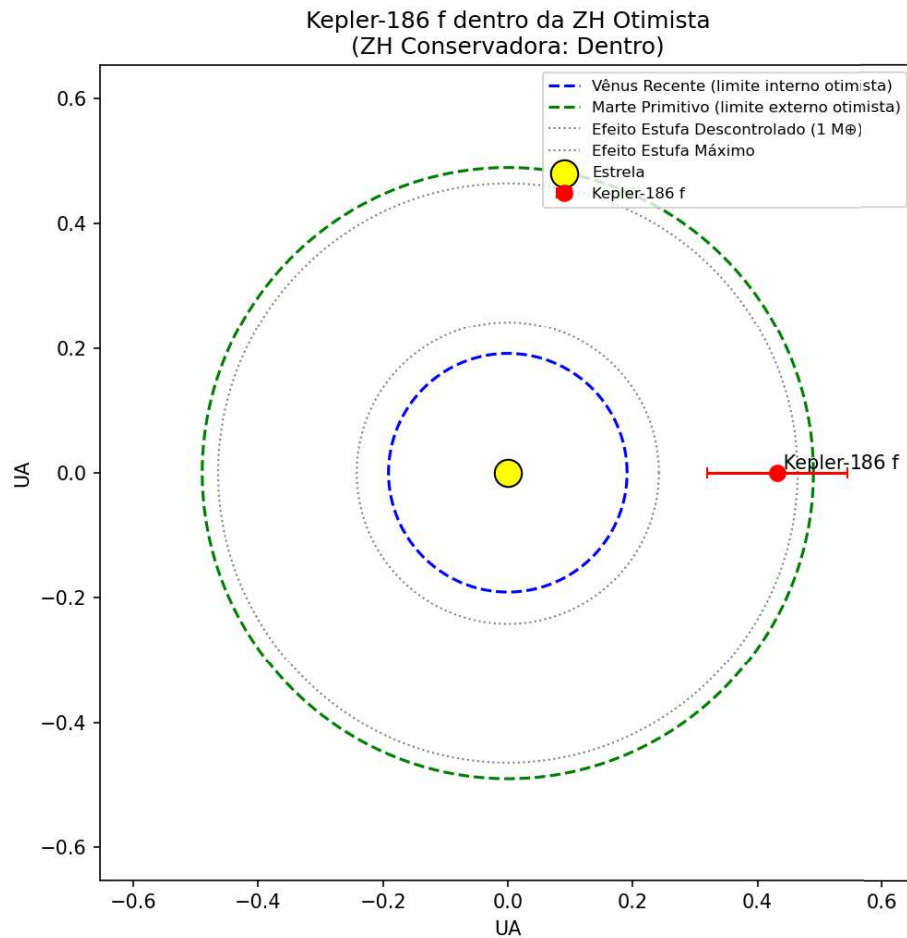


Figura D.84: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-186 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-186 f está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Marte.

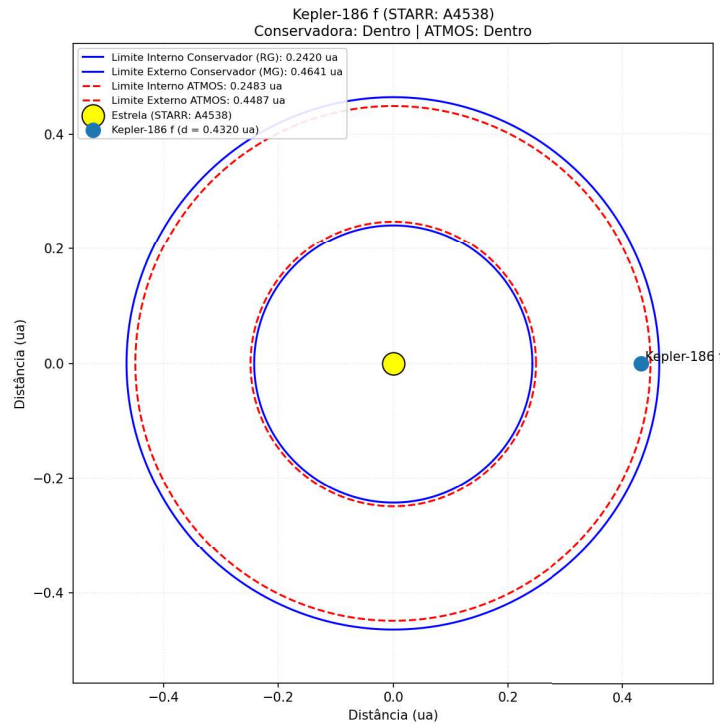


Figura D.85: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-186 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

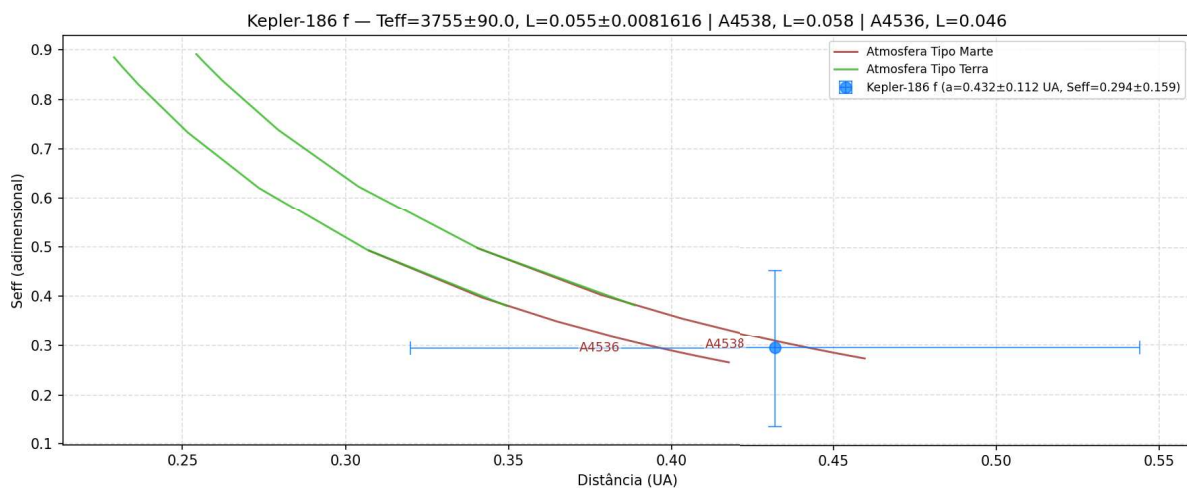


Figura D.86: Análise atmosférica de Kepler-186 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.41 Kepler-22 b

O exoplaneta Kepler-22 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-22 b	$289,86 \pm 0,00$	$0,81 \pm 0,01$	$2,10 \pm 0,12$	9,1	5,2	$279,2 \pm 4,1$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-22	5596 ± 61	$-0,26 \pm 0,07$	$4,44 \pm 0,03$	$0,87 \pm 0,01$	$0,86 \pm 0,05$	$0,65 \pm 0,02$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-22 b	$0,81 \pm 0,01$	$0,61 \pm 0,01$	$1,44 \pm 0,02$	$0,75 \pm 0,01$	$1,37 \pm 0,019$	Dentro	Dentro

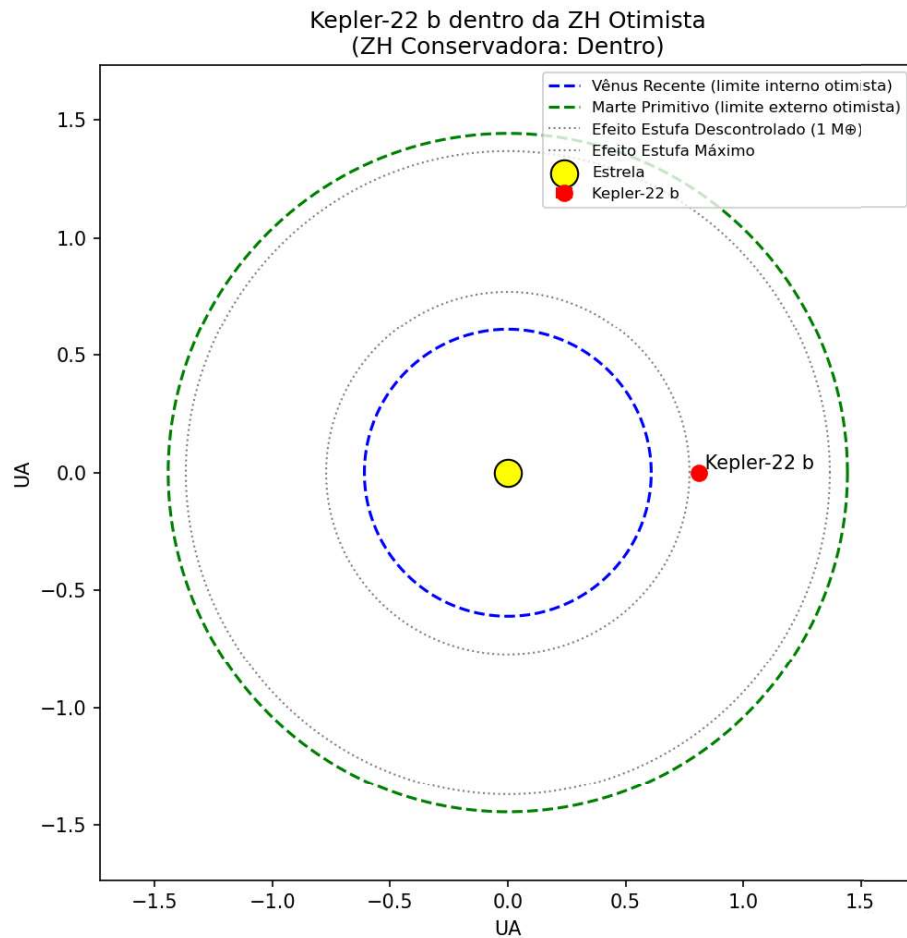


Figura D.87: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-22 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-22 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

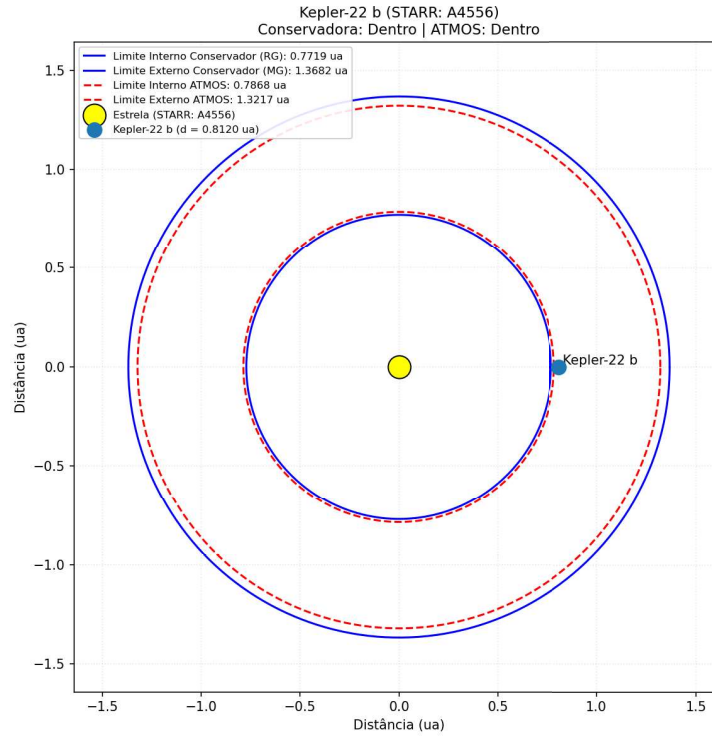


Figura D.88: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-22 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

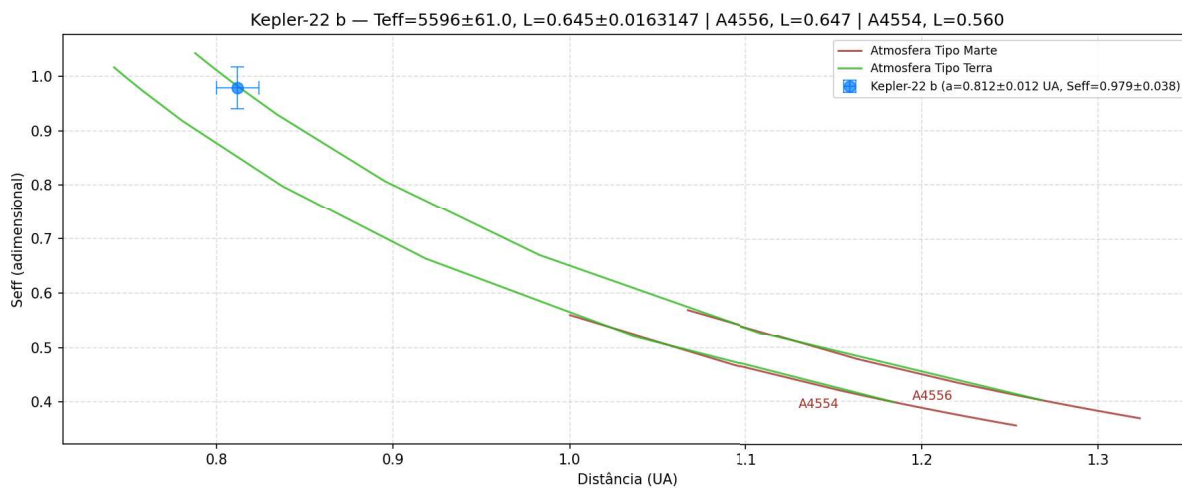


Figura D.89: Análise atmosférica de Kepler-22 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.42 Kepler-283 c

O exoplaneta Kepler-283 c está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-283 c	$92,74 \pm 0,00$	0,34	$1,81 \pm 0,13$	$5,5 \pm 2,1$	$5,1 \pm 2,2$	$270,3 \pm 8,5$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-283	4351 ± 100	$-0,37 \pm 0,14$	$4,72 \pm 0,15$	$0,57 \pm 0,02$	$0,66 \pm 0,12$	$0,12 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-283 c	0,34	$0,28 \pm 0,02$	$0,68 \pm 0,04$	$0,33 \pm 0,02$	$0,65 \pm 0,04$	Dentro	Fora

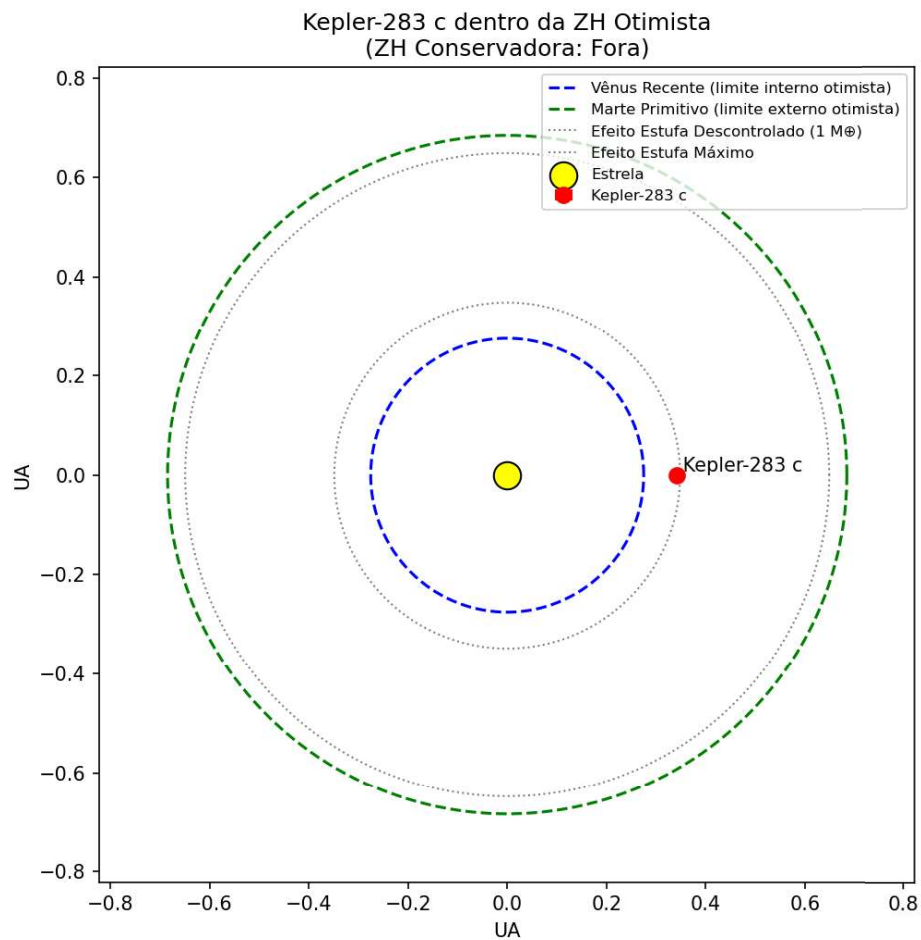


Figura D.90: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-283 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.43 Kepler-296 e

O exoplaneta Kepler-296 e está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-296 e	$34,14 \pm 0,00$	$0,17 \pm 0,03$	$1,16 \pm 0,18$	$1,07 \pm 0,63$	4,1	304 ± 37

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-296	3740 ± 130	$-0,08 \pm 0,29$	$4,77 \pm 0,08$	$0,48 \pm 0,08$	$0,50 \pm 0,08$	$0,027 \pm 0,0057$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-296 e	$0,17 \pm 0,03$	$0,13 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,03$	$0,17 \pm 0,018$	$0,33 \pm 0,03$	Dentro	Fora

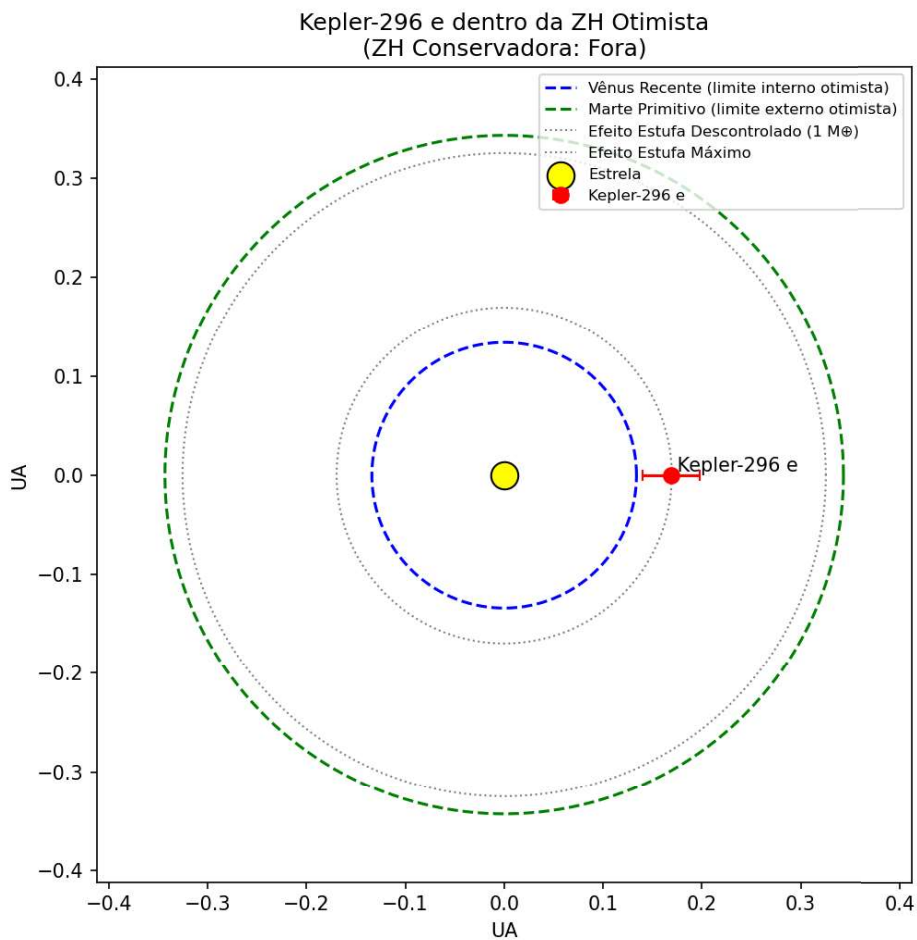


Figura D.91: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-296 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.44 Kepler-296 f

O exoplaneta Kepler-296 f está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-296 f	$63,34 \pm 0,00$	$0,26 \pm 0,043$	$1,58 \pm 0,42$	$2,3 \pm 2,2$	3,2	247 ± 30

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-296	3740 ± 130	$-0,08 \pm 0,29$	$4,78 \pm 0,08$	$0,48 \pm 0,08$	$0,50 \pm 0,08$	$0,03 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-296 f	$0,26 \pm 0,04$	$0,13 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,03$	$0,17 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,03$	Dentro	Dentro

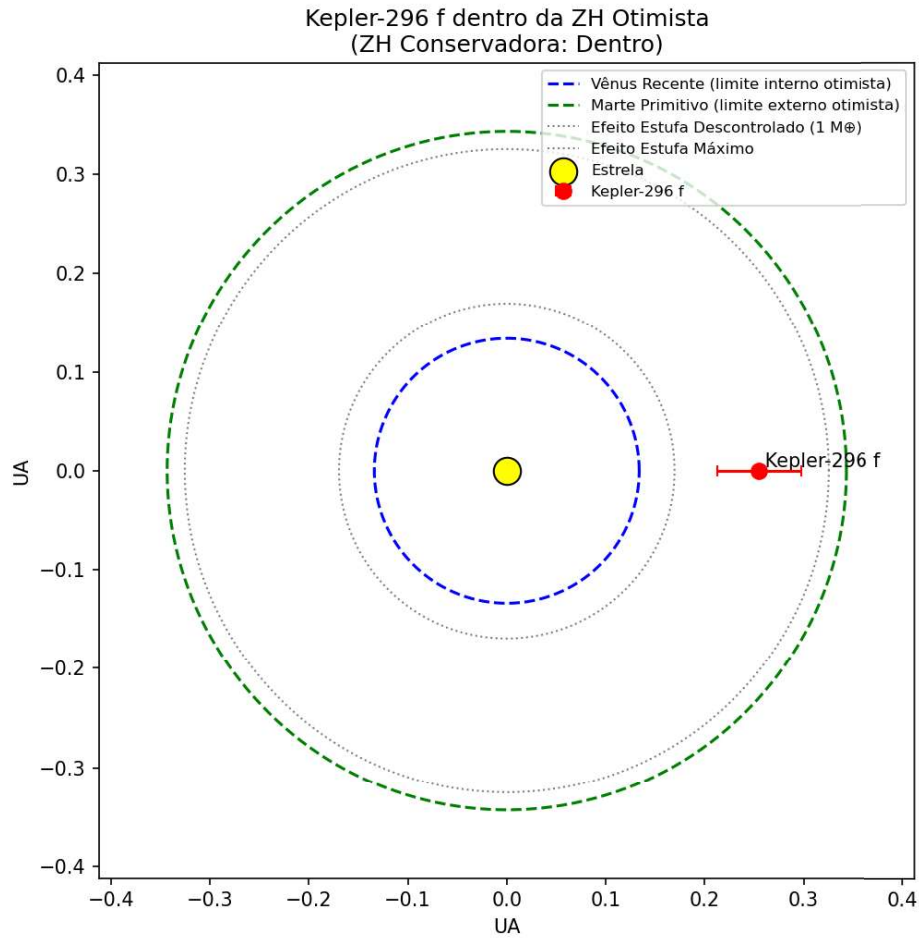


Figura D.92: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-296 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-296 f está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

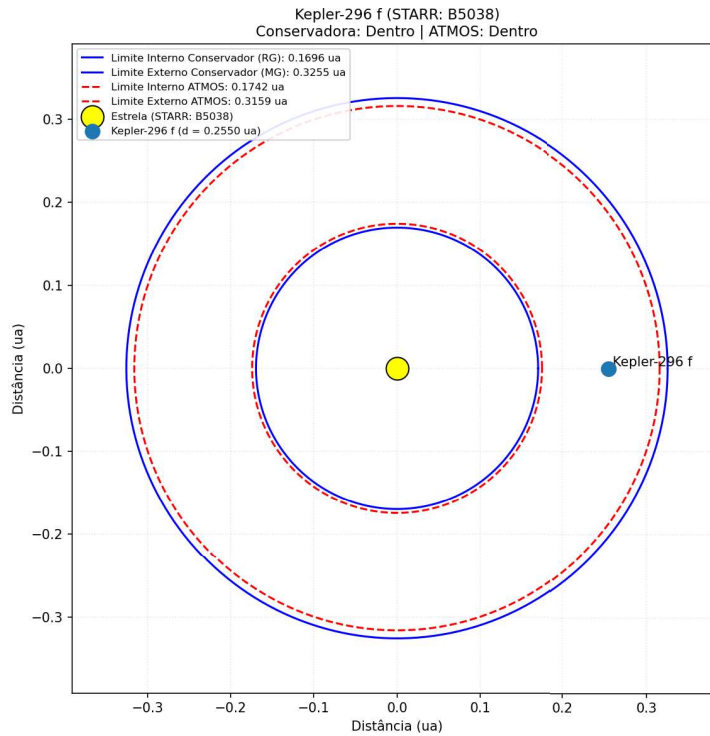


Figura D.93: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-296 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

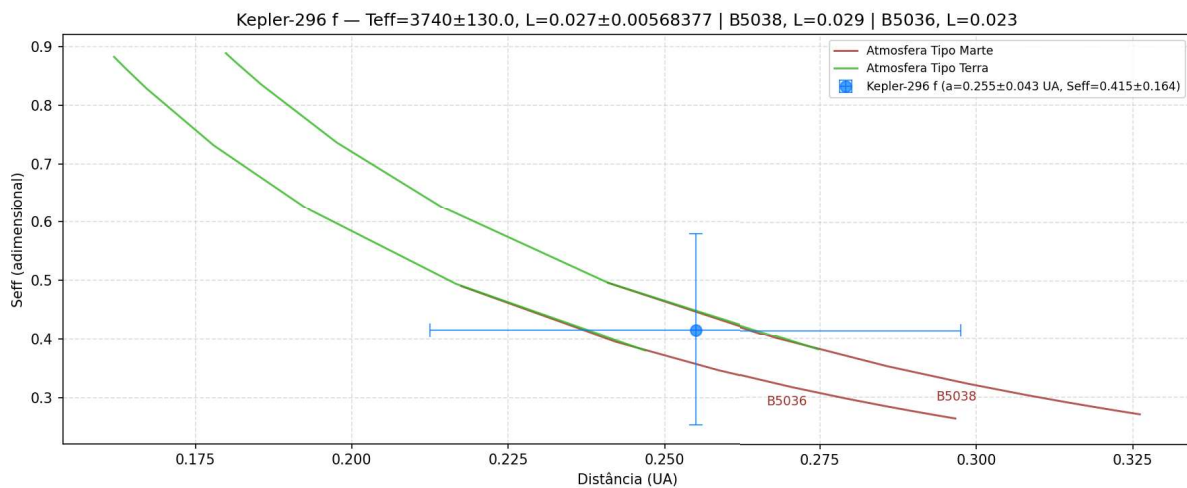


Figura D.94: Análise atmosférica de Kepler-296 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.45 Kepler-440 b

O exoplaneta Kepler-440 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-440 b	$101,11 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,05$	$1,79 \pm 0,18$	$5,7 \pm 1,6$	$5,5 \pm 2,3$	303 ± 37

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-440	4134 ± 154	$-0,30 \pm 0,15$	$4,70 \pm 0,03$	$0,56 \pm 0,04$	$0,58 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,02$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-440 b	$0,24 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,03$	$0,57 \pm 0,08$	$0,27 \pm 0,04$	$0,54 \pm 0,08$	Dentro	Fora

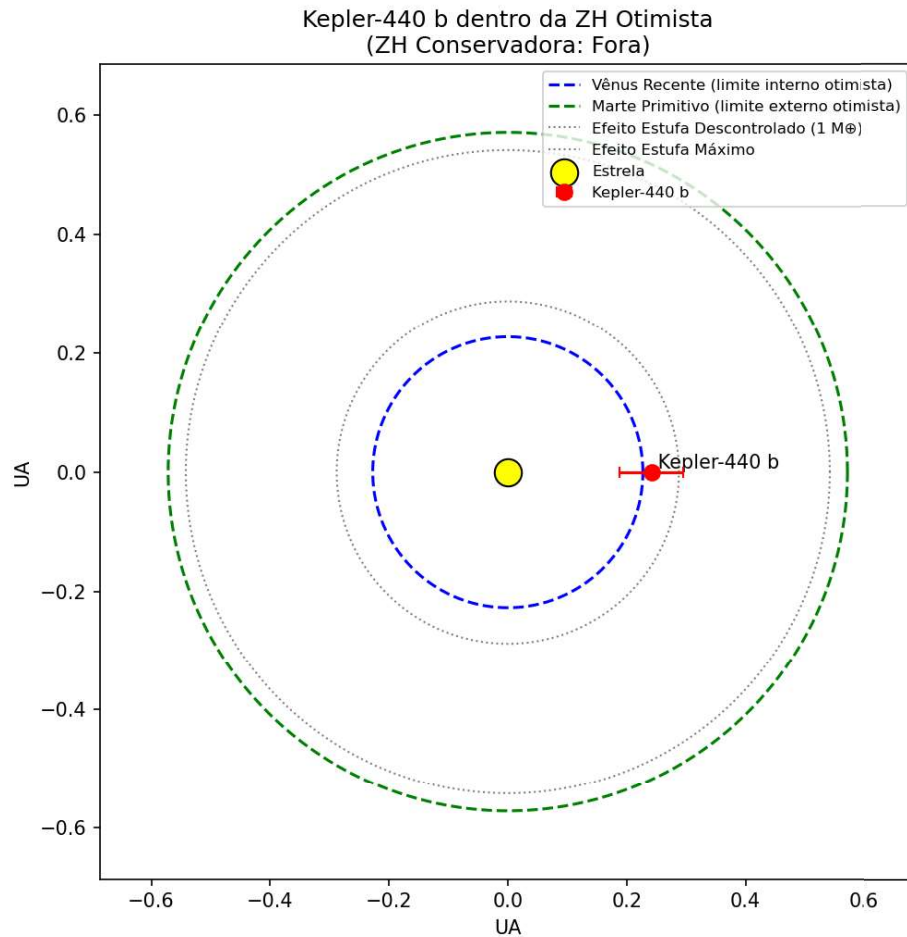


Figura D.95: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-440 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.46 Kepler-442 b

O exoplaneta Kepler-442 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-442 b	$112,31 \pm 0,00$	$0,41 \pm 0,13$	$1,30 \pm 0,14$	$2,4 \pm 1,6$	$6,0 \pm 4,6$	257 ± 43

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-442	4402 ± 100	$-0,37 \pm 0,10$	$4,67 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,02$	$0,61 \pm 0,02$	$0,12 \pm 0,02$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-442 b	$0,41 \pm 0,13$	$0,27 \pm 0,02$	$0,68 \pm 0,06$	$0,35 \pm 0,03$	$0,65 \pm 0,05$	Dentro	Dentro

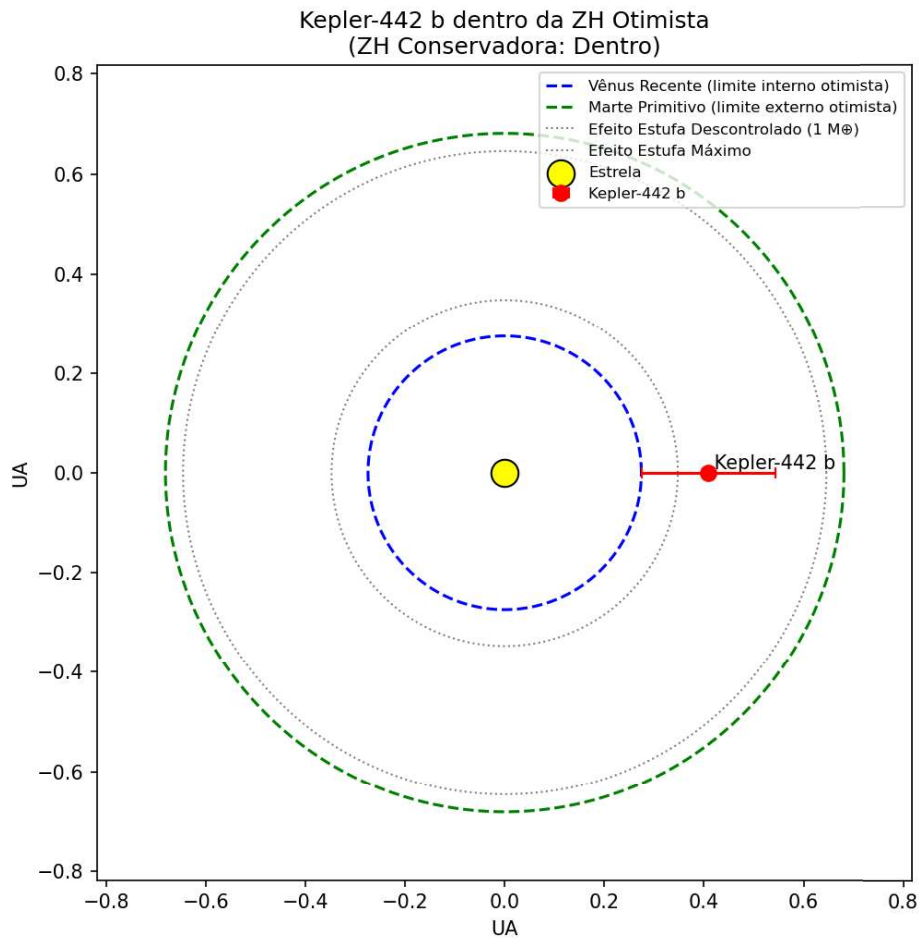


Figura D.96: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-442 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-442 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

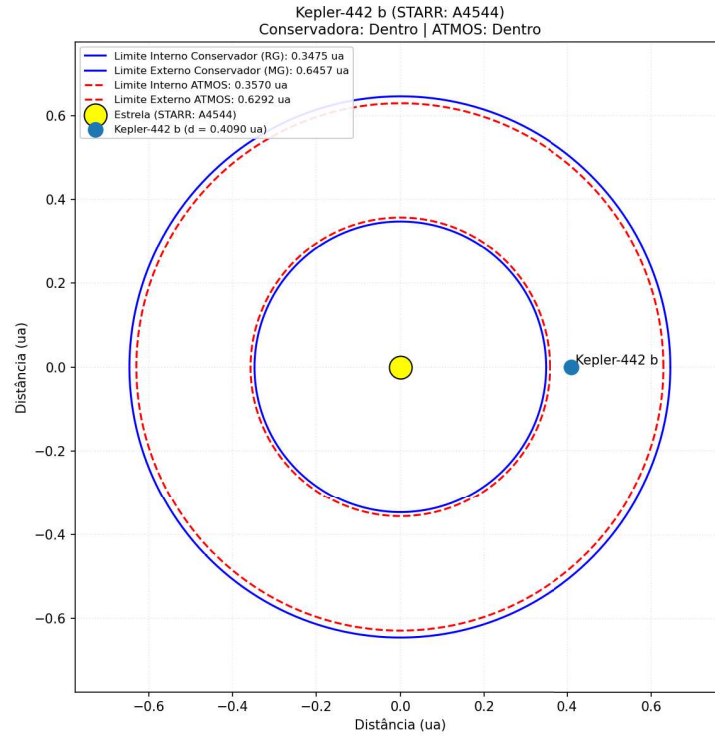


Figura D.97: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-442 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

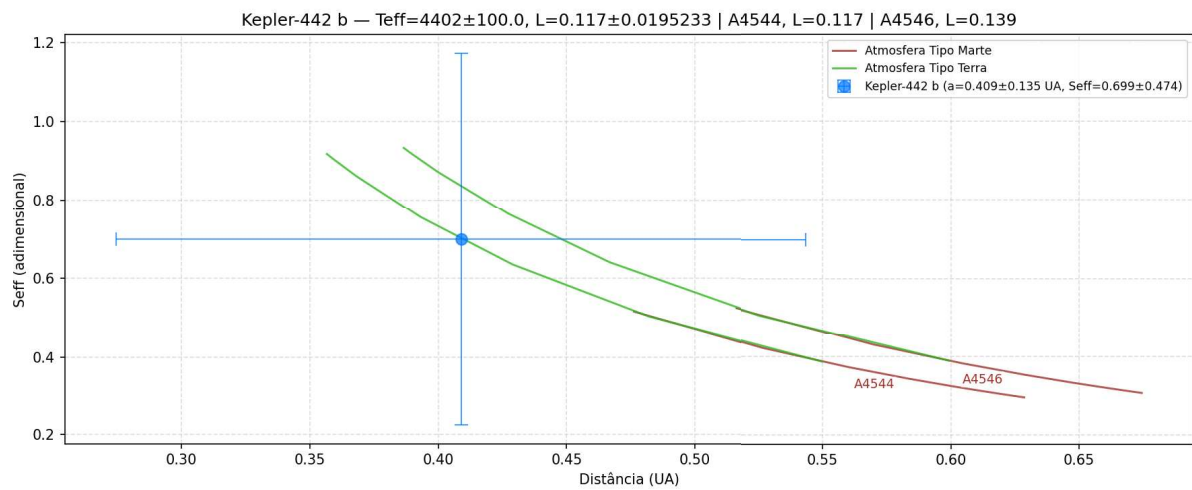


Figura D.98: Análise atmosférica de Kepler-442 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.47 Kepler-443 b

O exoplaneta Kepler-443 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-443 b	$177,67 \pm 0,00$	$0,49 \pm 0,13$	$2,29 \pm 0,20$	$7,8 \pm 1,9$	$3,6 \pm 1,3$	272 ± 37

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-443	4723 ± 100	$-0,01 \pm 0,10$	$4,61 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,03$	$0,74 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,03$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-443 b	$0,50 \pm 0,13$	$0,37 \pm 0,03$	$0,90 \pm 0,07$	$0,45 \pm 0,036$	$0,86 \pm 0,07$	Dentro	Dentro

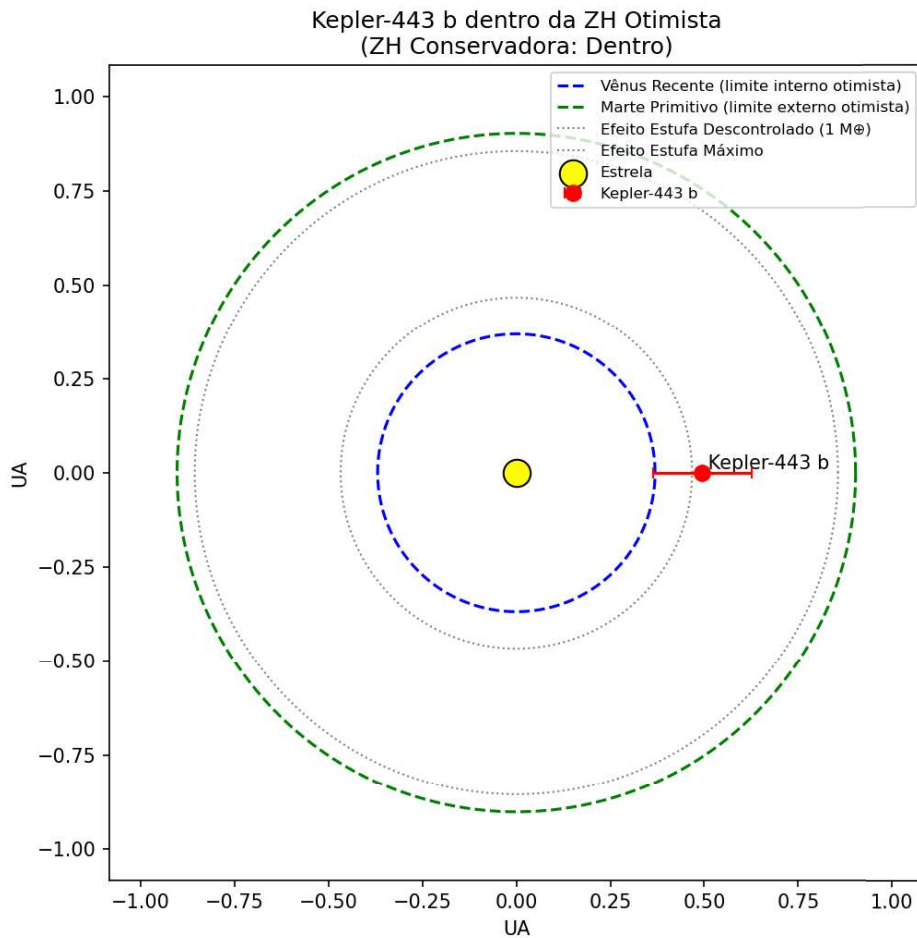


Figura D.99: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-443 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-443 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

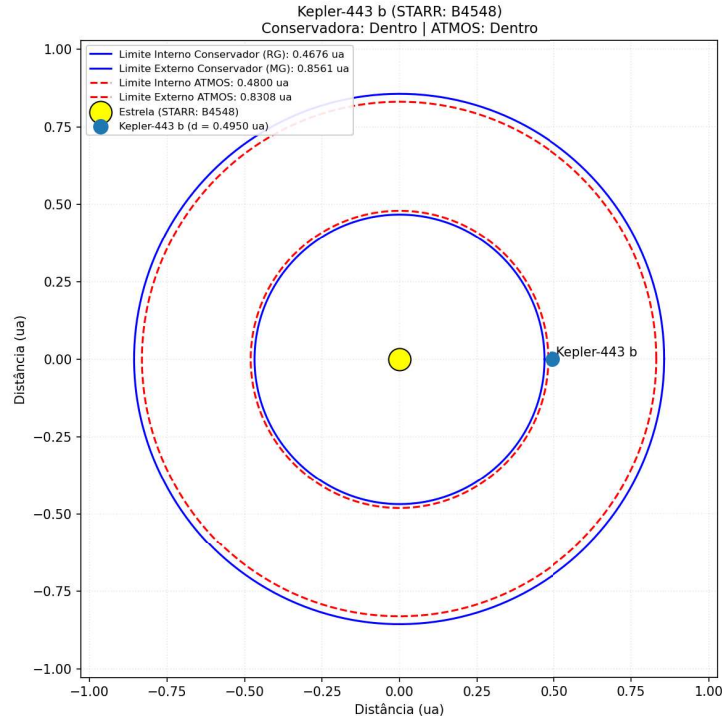


Figura D.100: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-443 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

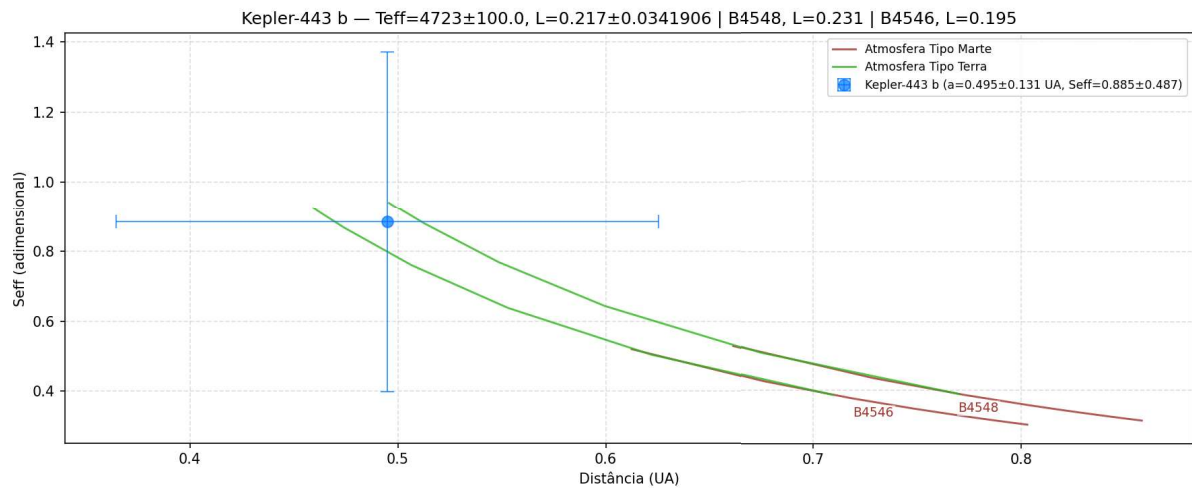


Figura D.101: Análise atmosférica Kepler-443 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.48 Kepler-452 b

O exoplaneta Kepler-452 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-452 b	$384,84 \pm 0,01$	$1,05 \pm 0,02$	$1,51 \pm 0,19$	$3,6 \pm 1,7$	$5,7 \pm 3,4$	286 ± 16

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-452	5757 ± 85	$0,21 \pm 0,09$	$4,32 \pm 0,09$	$1,11 \pm 0,12$	$1,04 \pm 0,05$	$1,22 \pm 0,05$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-452 b	$1,05 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,02$	$1,95 \pm 0,04$	$1,01 \pm 0,02$	$1,85 \pm 0,04$	Dentro	Fora

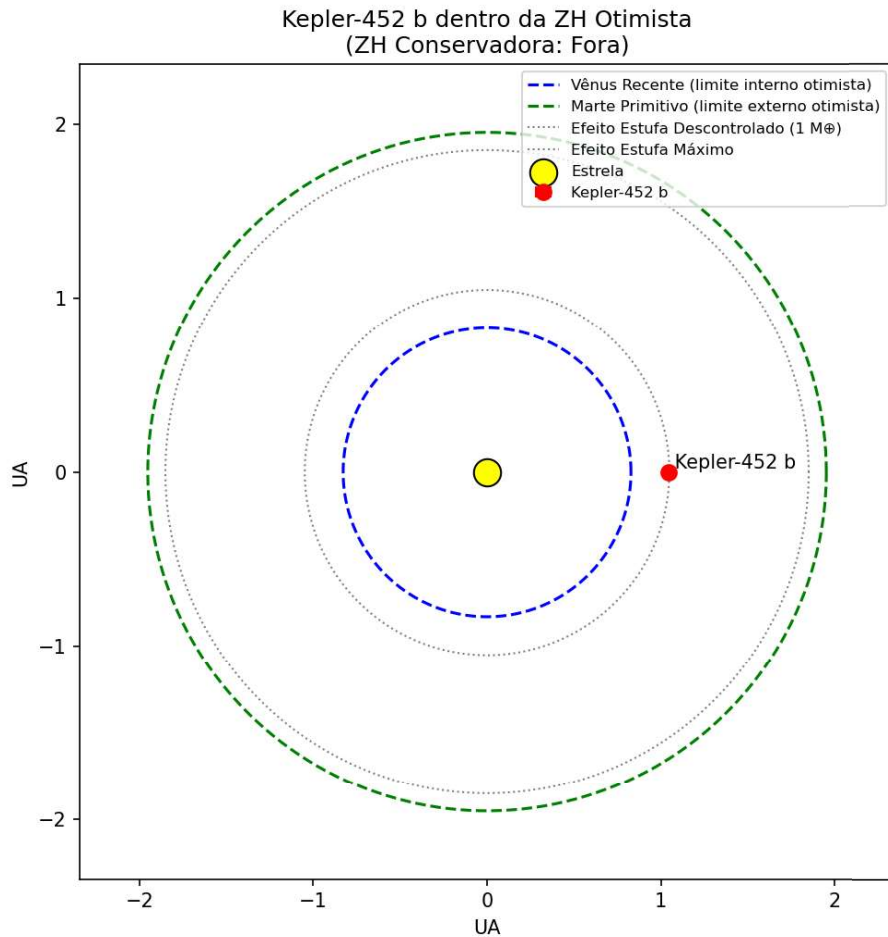


Figura D.102: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-452 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.49 Kepler-51 e

O exoplaneta Kepler-51 e está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-51 e	$264,28 \pm 0,91$	$0,80 \pm 0,01$	$1,66 \pm 0,37$	$4,9 \pm 1,5$	$6,0 \pm 4,3$	$286,2 \pm 7,0$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-51	5674	0,05	4,51	$0,87 \pm 0,04$	$0,96 \pm 0,05$	0,72

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-51 e	$0,80 \pm 0,014$	0,64	1,52	0,78	1,44	Dentro	Fora

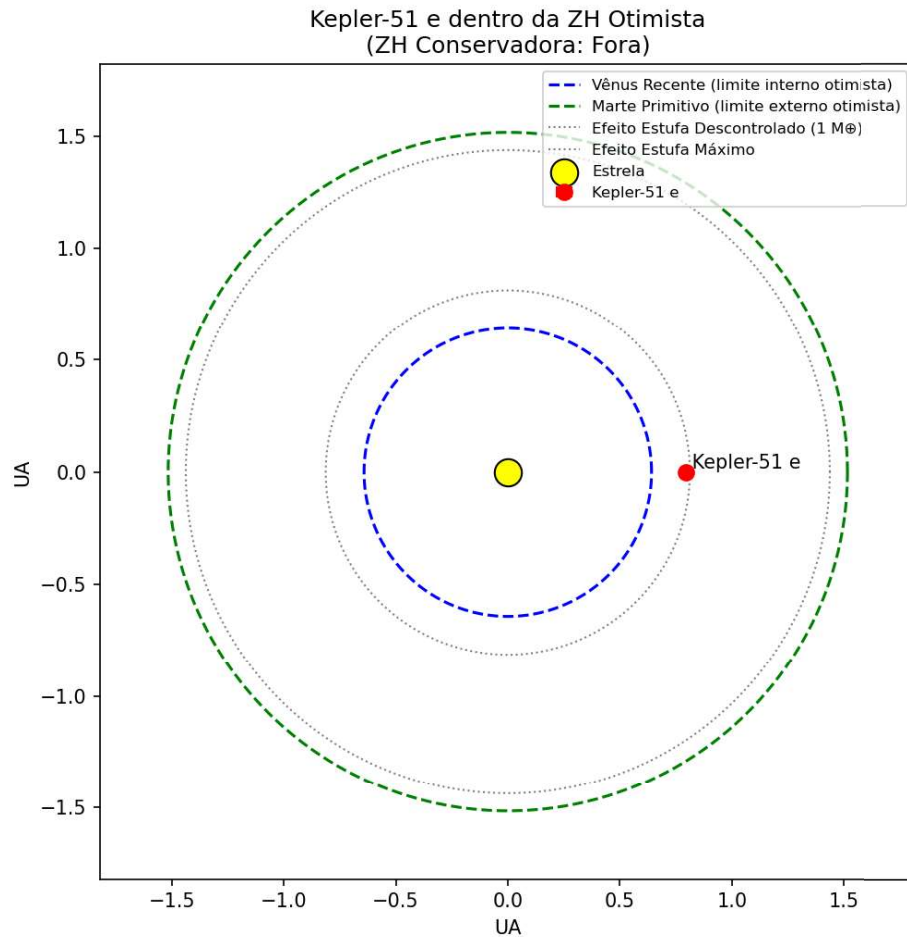


Figura D.103: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-51 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.50 Kepler-62 e

O exoplaneta Kepler-62 e está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-62 e	$122,39 \pm 0,00$	$0,43 \pm 0,00$	$1,61 \pm 0,05$	$4,7 \pm 2,1$	$6,3 \pm 2,9$	$290,7 \pm 6,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-62	4925 ± 70	$-0,37 \pm 0,04$	$4,68 \pm 0,04$	$0,64 \pm 0,02$	$0,69 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,02$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-62 e	$0,43 \pm 0,00$	$0,36 \pm 0,02$	$0,87 \pm 0,04$	$0,44 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,04$	Dentro	Fora

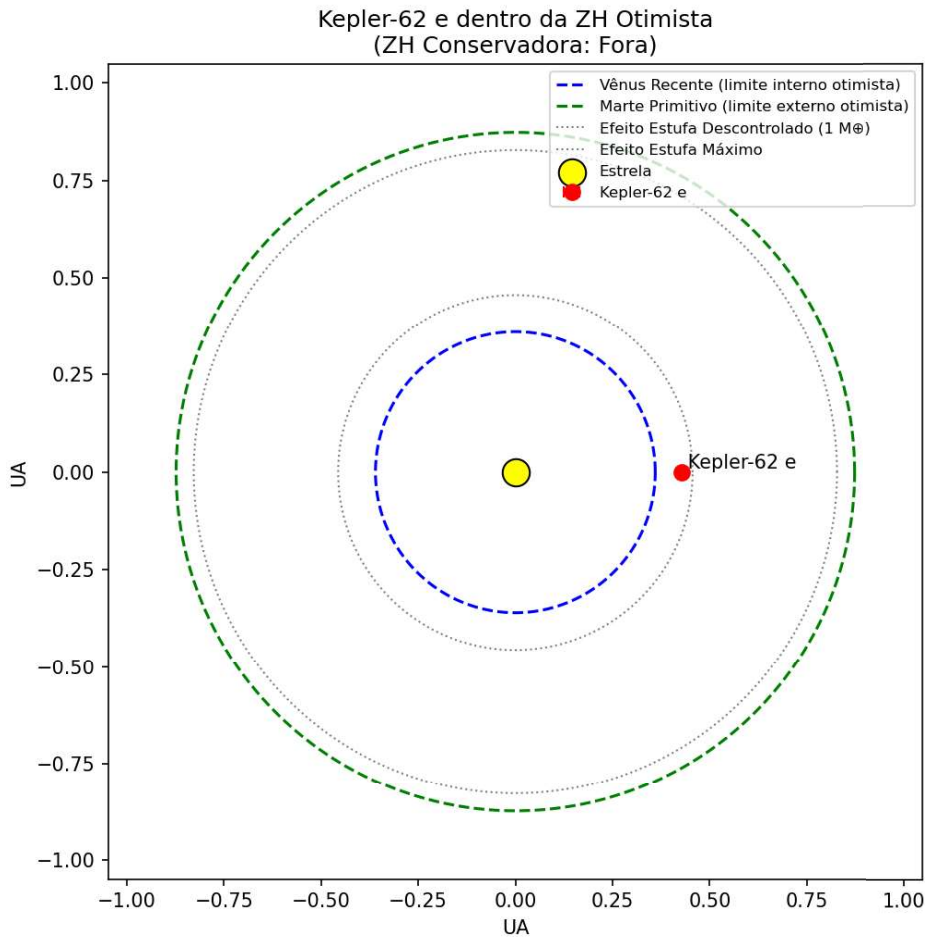


Figura D.104: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-62 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.51 Kepler-62 f

O exoplaneta Kepler-62 f está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-62 f	$267,29 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,01$	$1,41 \pm 0,07$	$3,4 \pm 1,6$	$6,6 \pm 3,3$	$224,2 \pm 4,9$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-62	4925 ± 70	$-0,37 \pm 0,04$	$4,68 \pm 0,04$	$0,64 \pm 0,02$	$0,69 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,02$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-62 f	$0,72 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,02$	$0,87 \pm 0,04$	$0,44 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,04$	Dentro	Dentro

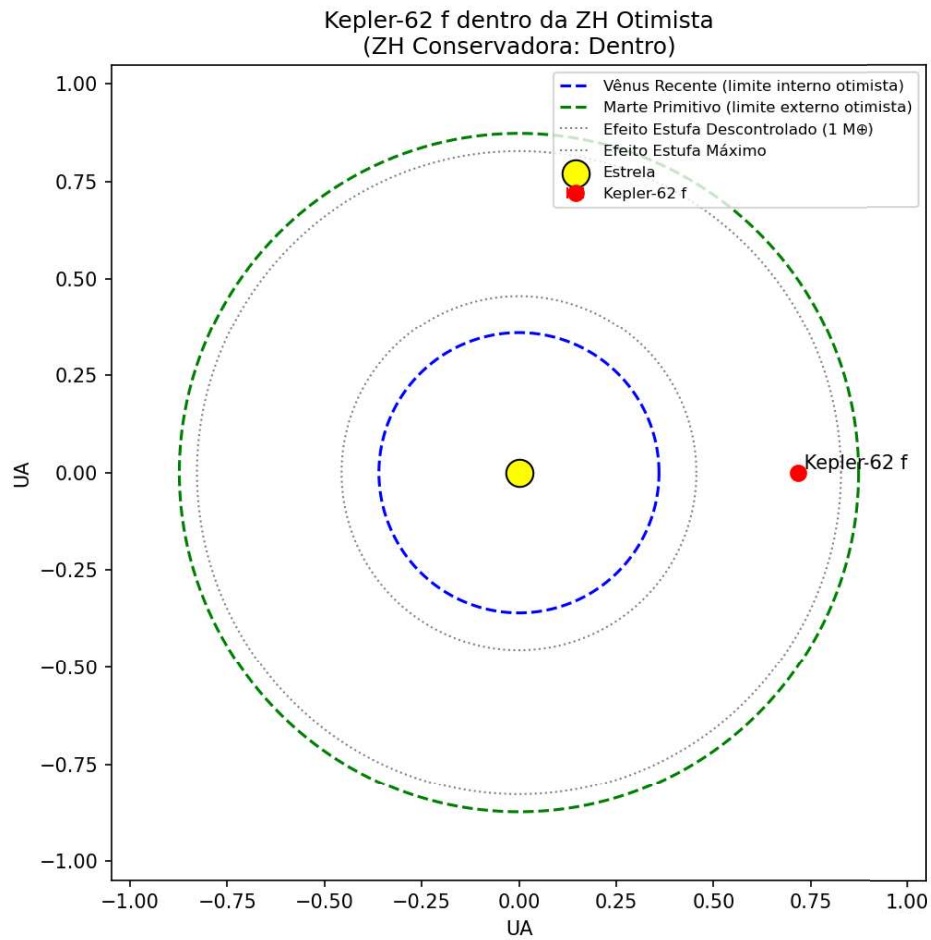


Figura D.105: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-62 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Kepler-62 f está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Marte.

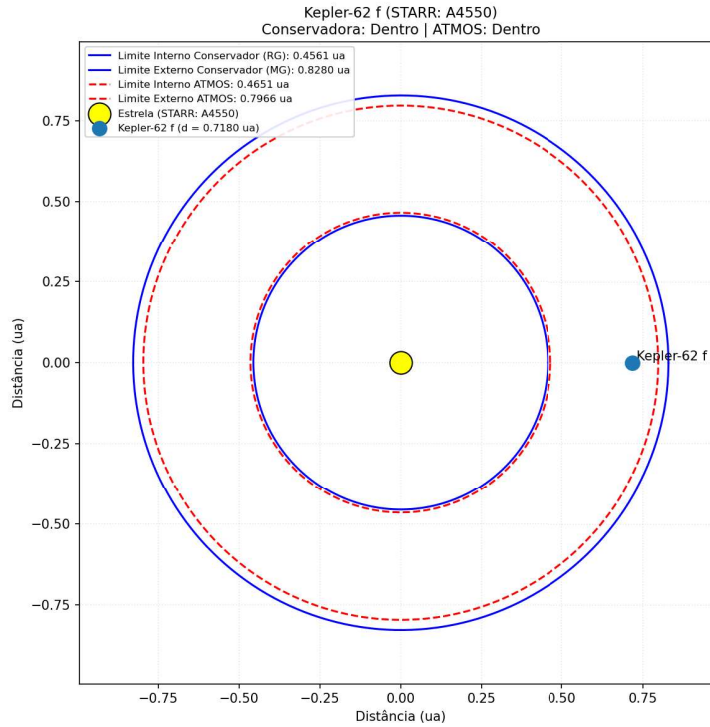


Figura D.106: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-62 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

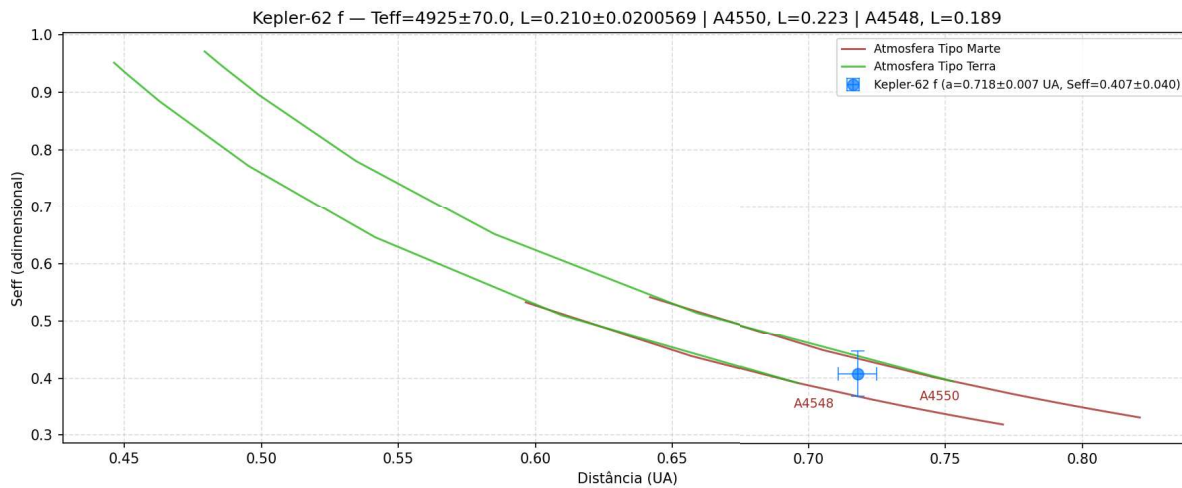


Figura D.107: Análise atmosférica de Kepler-62 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.52 Kepler-705 b

O exoplaneta Kepler-705 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-705 b	$56,06 \pm 0,00$	$0,23 \pm 0,00$	$2,12 \pm 0,08$	$7,4 \pm 1,6$	$4,3 \pm 1,0$	$269,6 \pm 5,0$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Kepler-705	3722 ± 31	$0,07 \pm 0,07$	$4,75 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,02$	$0,05 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-705 b	$0,23 \pm 0,00$	$0,18 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,06$	$0,23 \pm 0,03$	$0,43 \pm 0,05$	Dentro	Fora

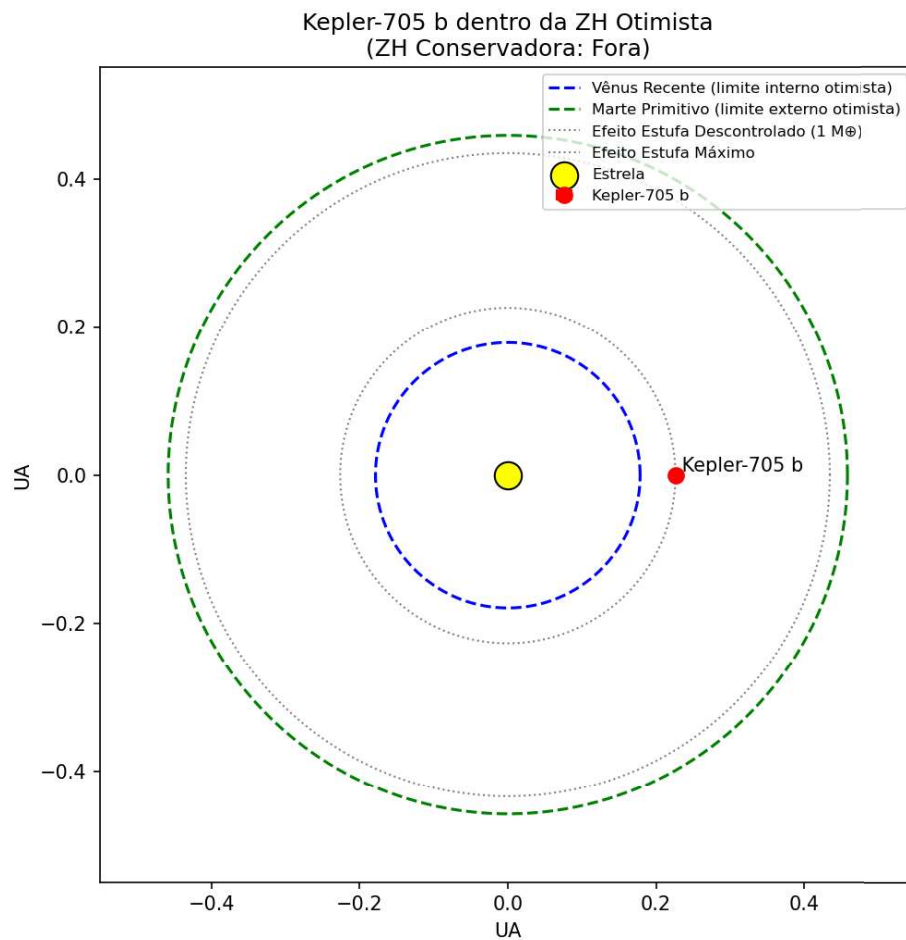


Figura D.108: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-705 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.53 Kepler-725 c

O exoplaneta Kepler-725 c está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Kepler-725 c	$207,54 \pm 0,30$	$0,67 \pm 0,00$	$2,49 \pm 0,63$	$9,5 \pm 2,5$	$3,4 \pm 2,7$	$297,2 \pm 7,6$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Kepler-725	5395 ± 64	-0,08	4,55	$0,88 \pm 0,04$	$0,95 \pm 0,01$	0,49

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Kepler-725 c	$0,67 \pm 0,00$	0,54	1,28	0,65	1,21	Dentro	Fora

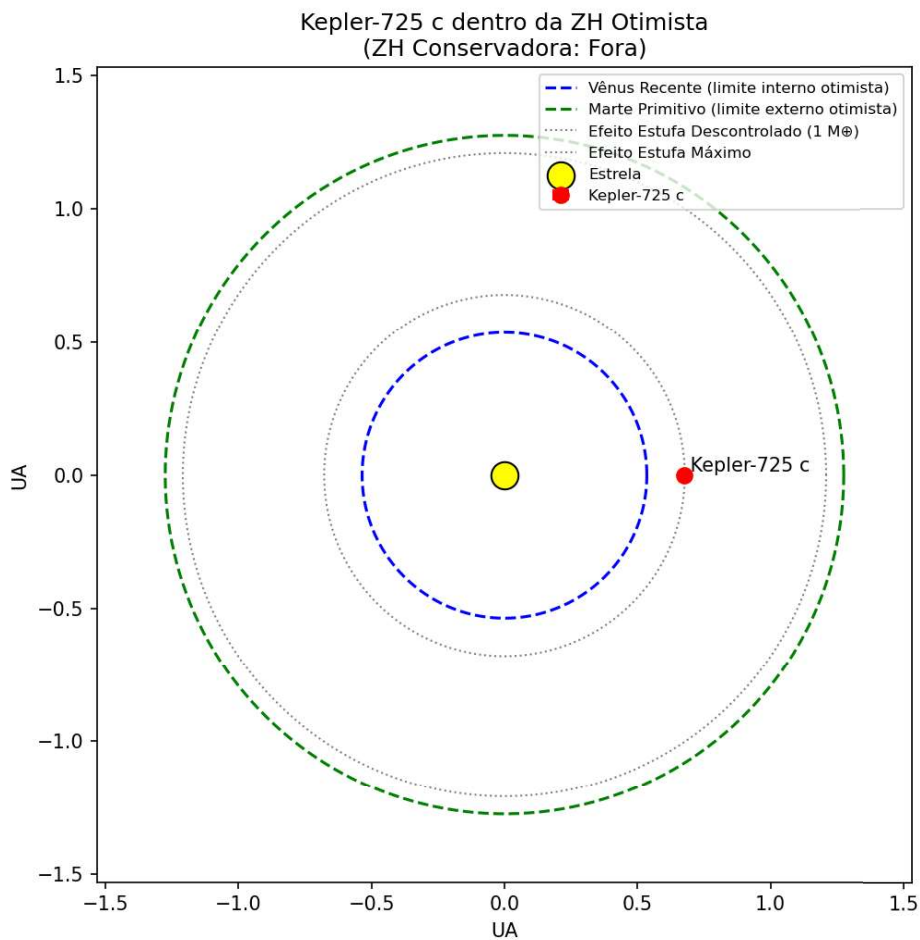


Figura D.109: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Kepler-725 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.54 L 98-59 f

O exoplaneta L 98-59 f está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
L 98-59 f	$23,06 \pm 0,05$	$0,11 \pm 0,00$	$1,40 \pm 0,14$	$2,72 \pm 0,33$	$5,0 \pm 2,0$	$285,2 \pm 7,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
L 98-59	3415 ± 60	$-0,46 \pm 0,26$	$4,91 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,01$	$0,012 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
L 98-59 f	$0,11 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,00$	$0,22 \pm 0,01$	Dentro	Fora

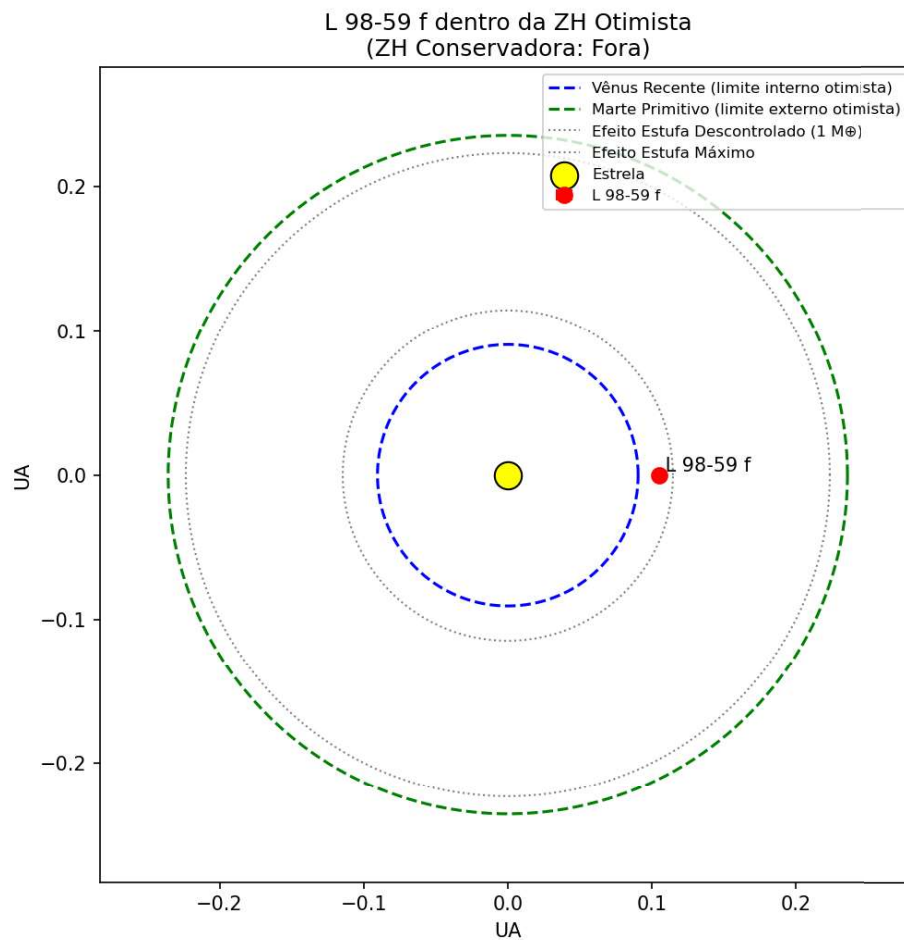


Figura D.110: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta L 98-59 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.55 LHS 1140 b

O exoplaneta LHS 1140 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
LHS 1140 b	$24,74 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$1,73 \pm 0,03$	$5,60 \pm 0,19$	$5,90 \pm 0,30$	$225,5 \pm 4,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
LHS 1140	3096 ± 48	$-0,15 \pm 0,09$	$5,04 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,00$	$0,18 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
LHS 1140 b	$0,09 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

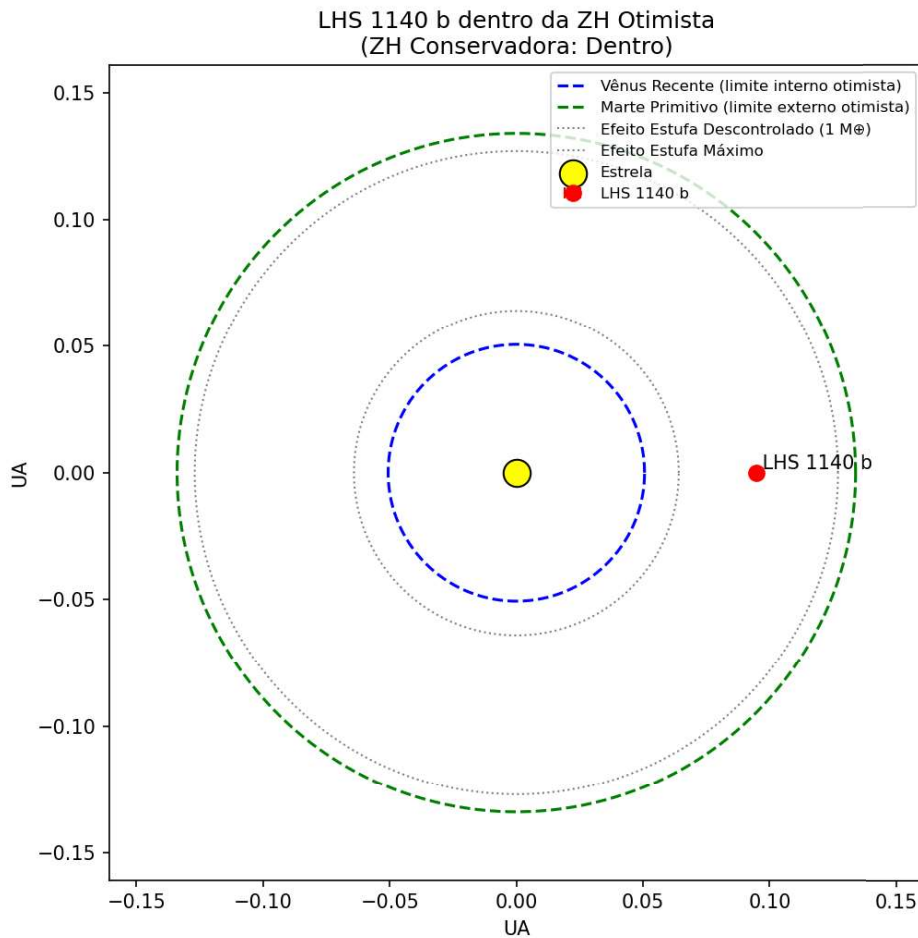


Figura D.111: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta LHS 1140 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

LHS 1140 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

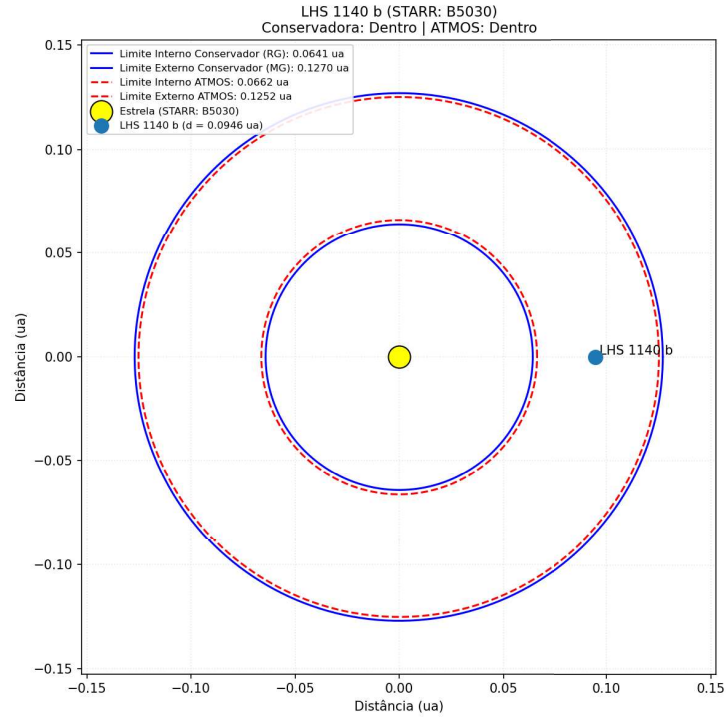


Figura D.112: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta LHS 1140 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

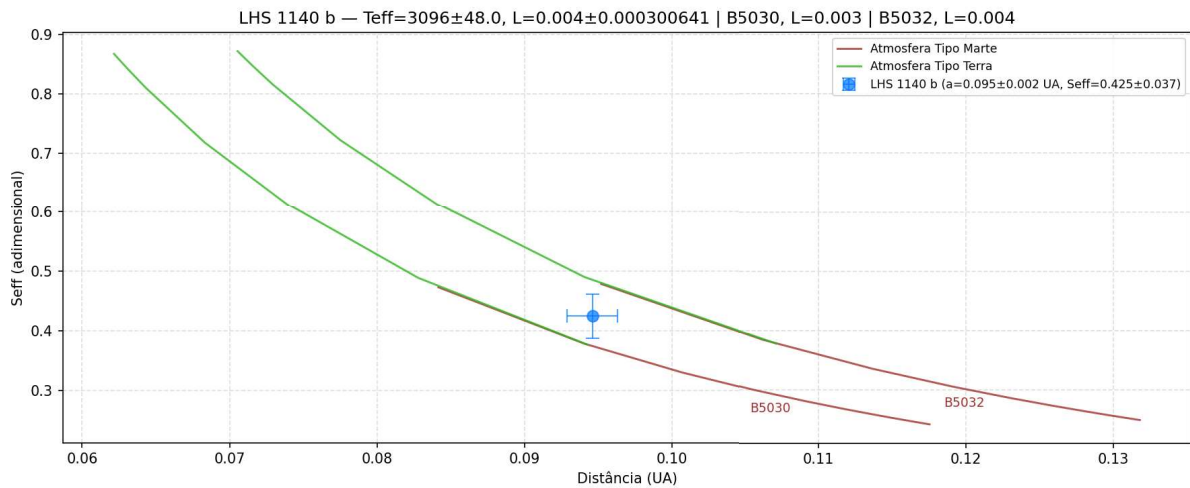


Figura D.113: Análise atmosférica de LHS 1140 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.56 LP 890-9 c

O exoplaneta LP 890-9 c está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
LP 890-9 c	$8,46 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$1,36 \pm 0,05$	$2,7 \pm 1,1$	$6,0 \pm 2,4$	272 ± 10

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
LP 890-9	2850 ± 75	$-0,03 \pm 0,09$	$5,13 \pm 0,05$	$0,16 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
LP 890-9 c	$0,04 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

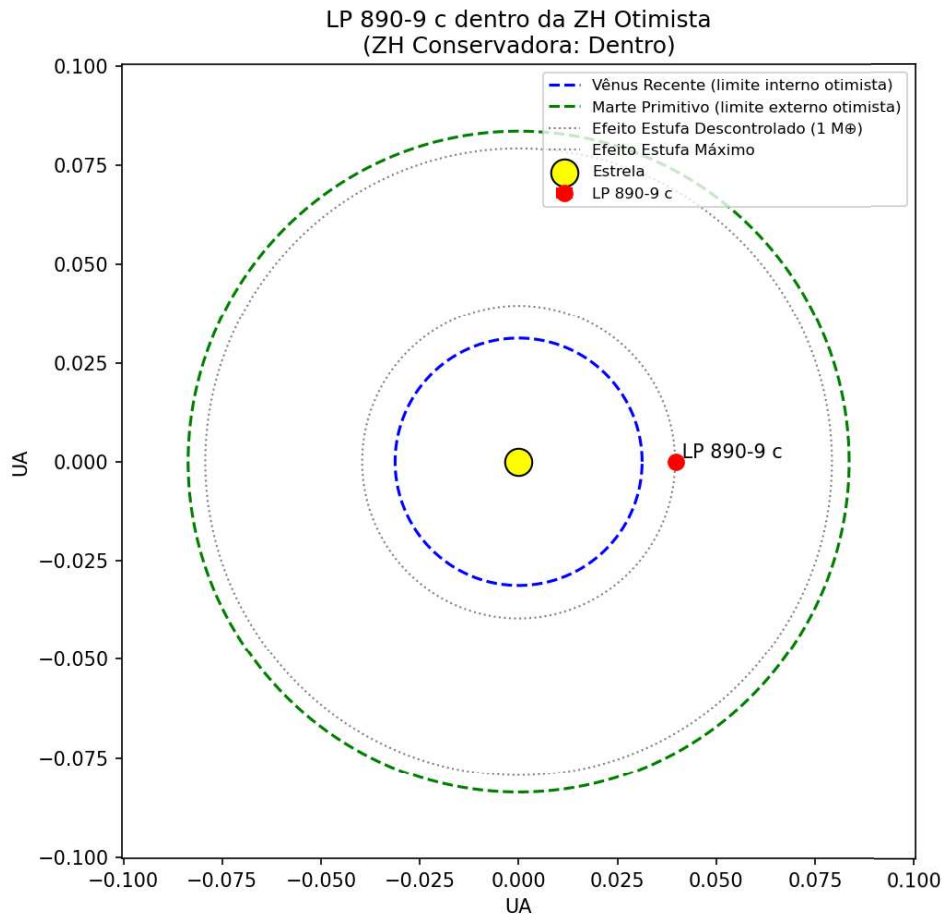


Figura D.114: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta LP 890-9 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

LP 890-9 c está fora da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Não é possível estimar o tipo da atmosfera.

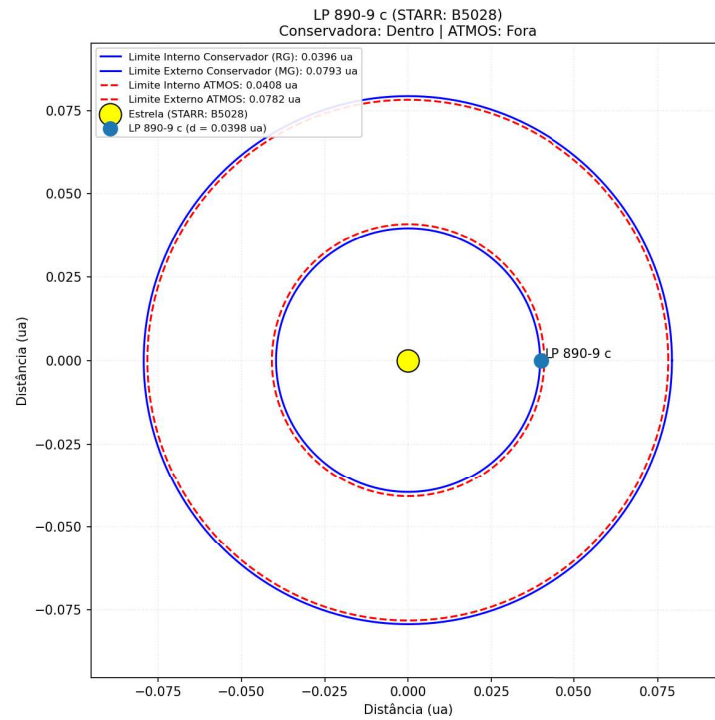


Figura D.115: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta LP 890-9 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

D.57 Proxima Cen b

O exoplaneta Proxima Cen b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Proxima Cen b	$11,18 \pm 0,00$	$0,048 \pm 0,00$	$0,99 \pm 0,17$	$1,05 \pm 0,050$	$5,9 \pm 3,0$	238 ± 20

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Proxima Cen	2900 ± 100	–	–	$0,14 \pm 0,02$	$0,12 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Proxima Cen b	$0,05 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

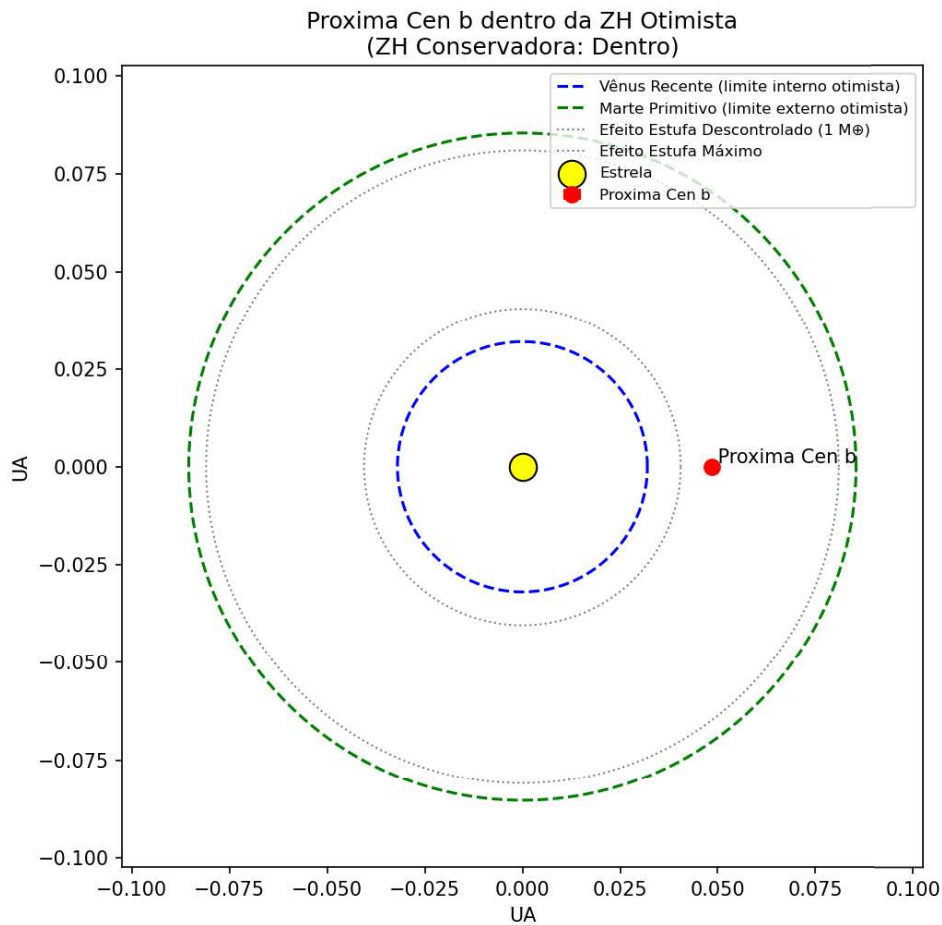


Figura D.116: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Proxima Cen b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Proxima Cen b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

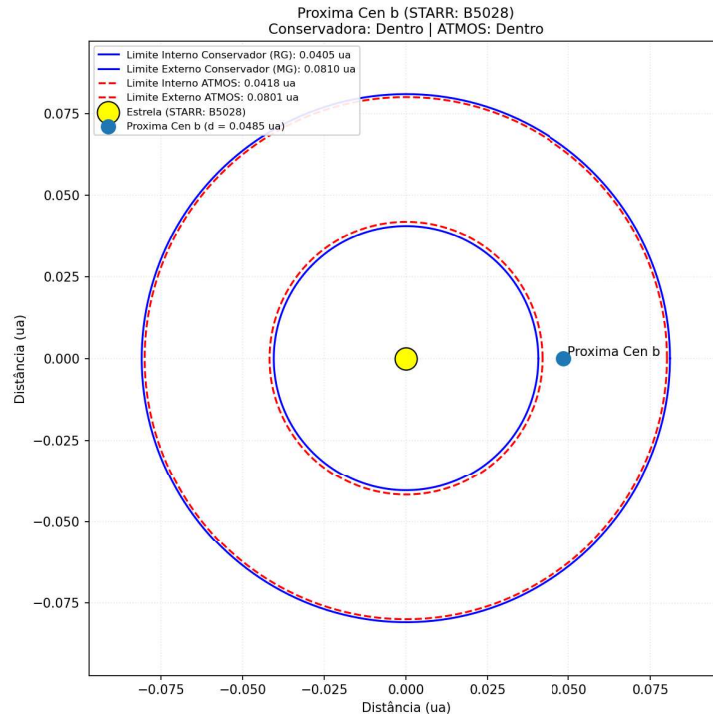


Figura D.117: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Proxima Cen b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

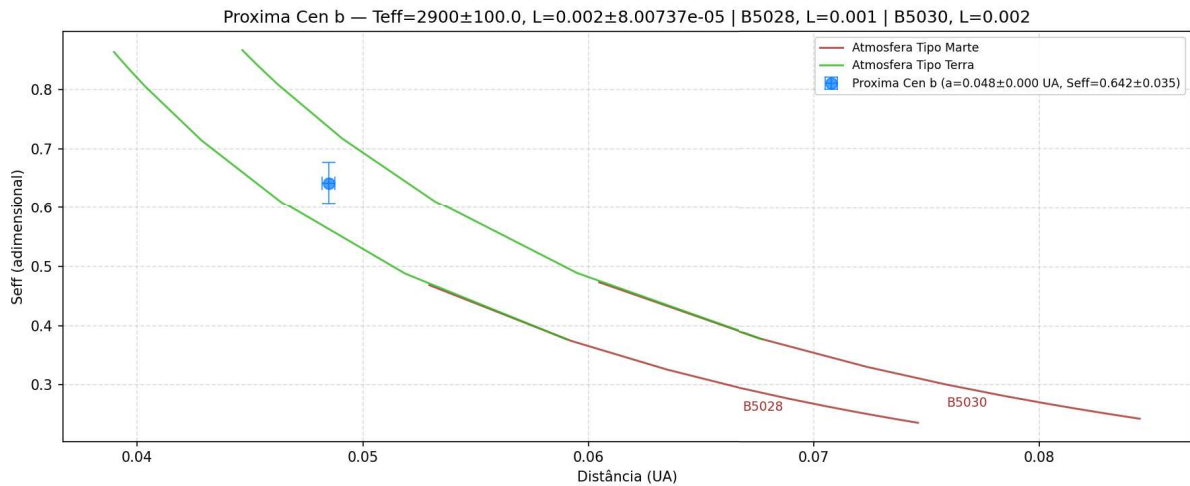


Figura D.118: Análise atmosférica de Proxima Cen b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.58 Ross 128 b

O exoplaneta Ross 128 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Ross 128 b	$9,87 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,00$	$1,09 \pm 0,18$	$1,38 \pm 0,20$	$5,9 \pm 3,0$	$306,5 \pm 9,8$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Ross 128	3192 ± 60	$-0,02 \pm 0,08$	–	$0,20 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,02$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Ross 128 b	$0,05 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	Dentro	Fora

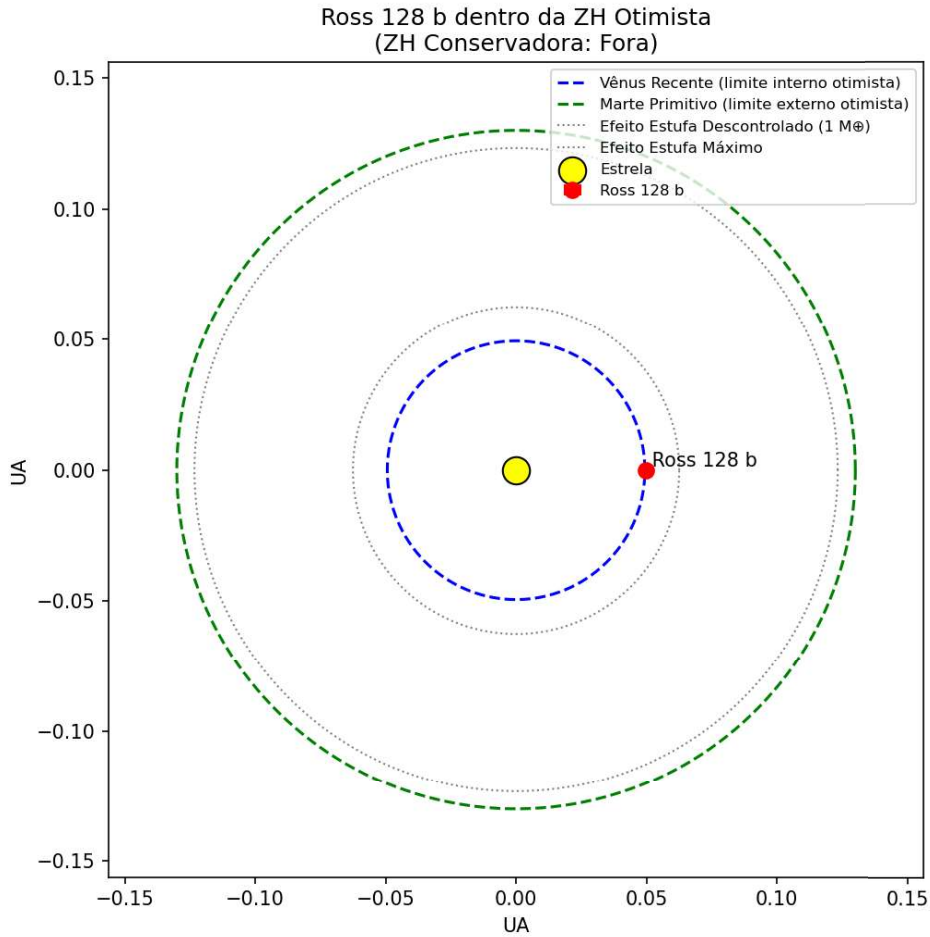


Figura D.119: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Ross 128 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.59 Ross 508 b

O exoplaneta Ross 508 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Ross 508 b	$10,77 \pm 0,01$	$0,054 \pm 0,00$	$1,48 \pm 0,23$	$3,93 \pm 0,53$	$6,7 \pm 3,3$	$293,9 \pm 5,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Ross 508	3071 ± 28	$-0,20 \pm 0,20$	$5,04 \pm 0,03$	$0,21 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,000069$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Ross 508 b	$0,05 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,00$	Dentro	Fora

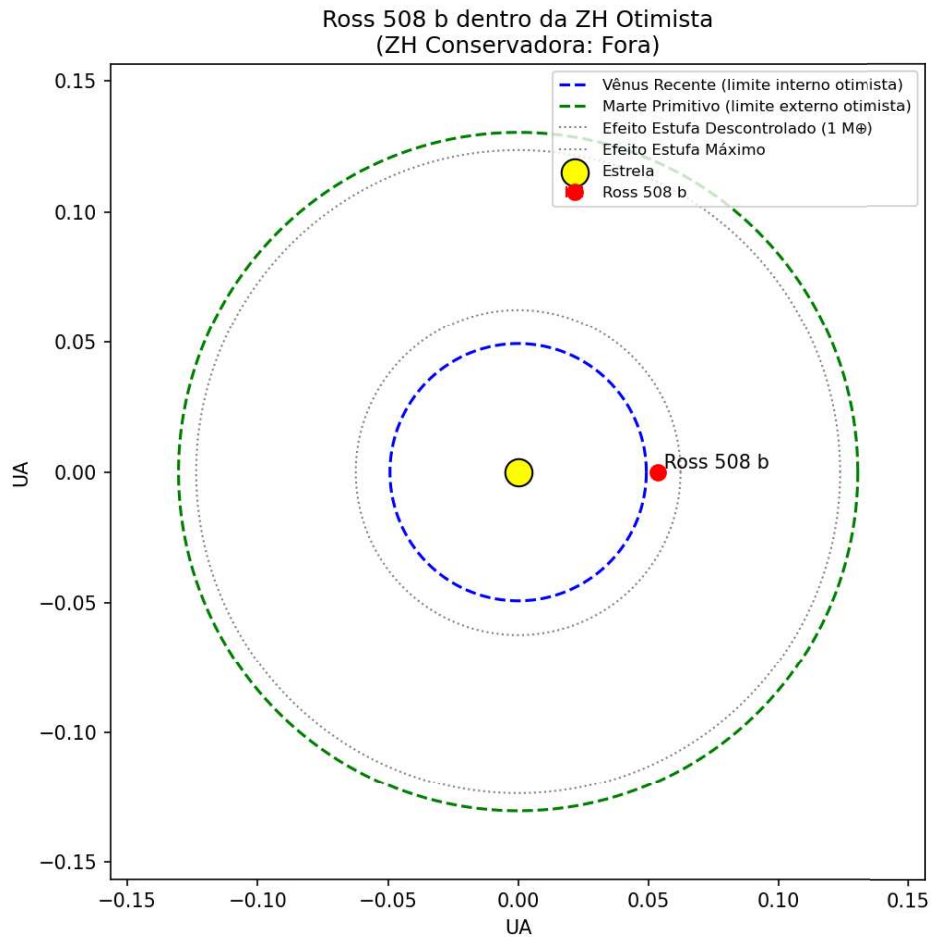


Figura D.120: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Ross 508 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.60 TOI-1266 d

O exoplaneta TOI-1266 d está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TOI-1266 d	$32,51 \pm 0,06$	$0,15 \pm 0,00$	$1,37 \pm 0,28$	$3,4 \pm 1,2$	$7,3 \pm 5,1$	$287,3 \pm 7,1$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
TOI-1266	3563 ± 77	$-0,11 \pm 0,09$	$4,83 \pm 0,02$	$0,42 \pm 0,01$	$0,44 \pm 0,02$	$0,027 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TOI-1266 d	$0,15 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,34 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,00$	$0,33 \pm 0,00$	Dentro	Fora

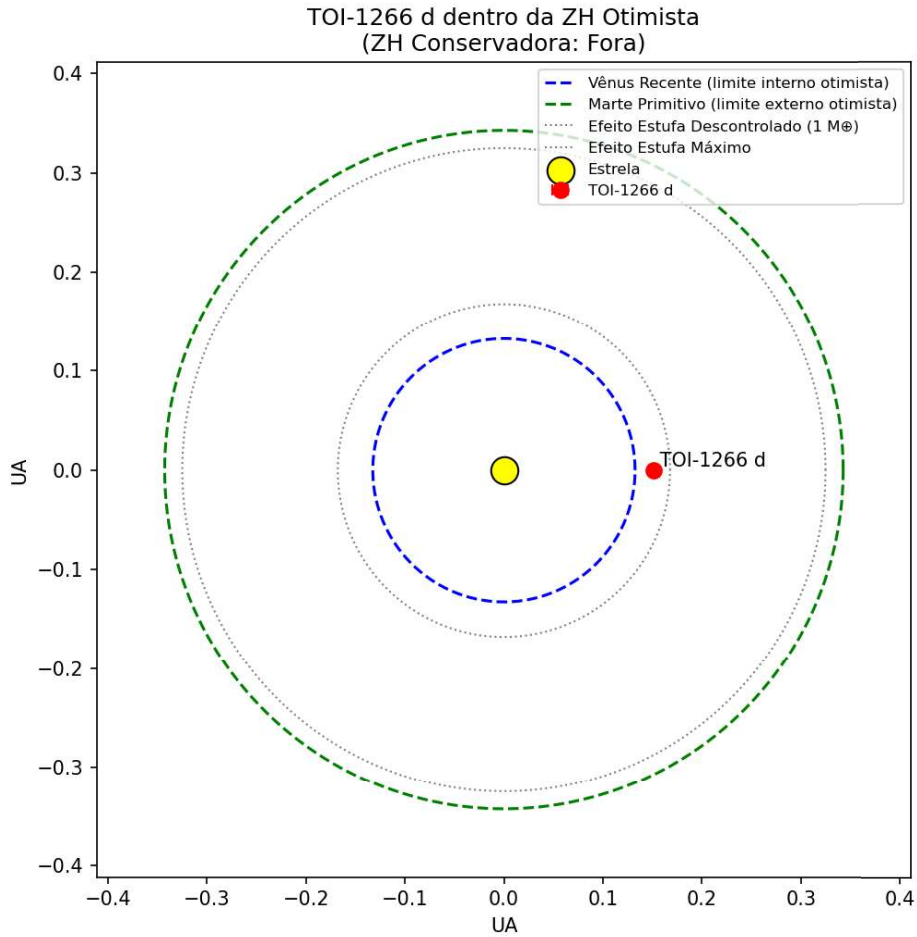


Figura D.121: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-1266 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.61 TOI-2094 b

O exoplaneta TOI-2094 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TOI-2094 b	$18,79 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	$1,90 \pm 0,10$	$6,5 \pm 1,7$	$5,3 \pm 1,6$	278 ± 14

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
TOI-2094	3435 ± 60	$-0,06 \pm 0,02$	$4,89 \pm 0,04$	$0,38 \pm 0,01$	$0,43 \pm 0,06$	$0,02 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TOI-2094 b	$0,14 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,00$	$0,29 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,01$	Dentro	Fora

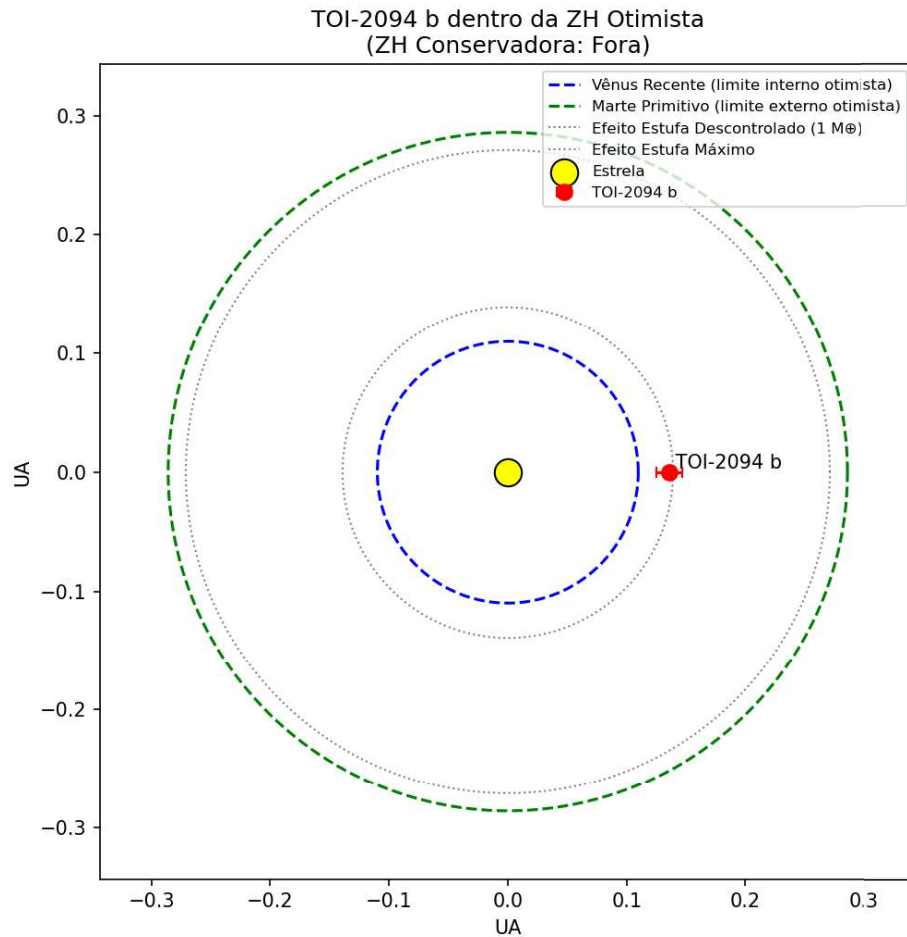


Figura D.122: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-2094 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.62 TOI-2257 b

O exoplaneta TOI-2257 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TOI-2257 b	$35,19 \pm 0,00$	$0,15 \pm 0,00$	$2,20 \pm 0,12$	$8,2 \pm 2,1$	$4,3 \pm 1,3$	243 ± 11

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
TOI-2257	3430 ± 130	$-0,27 \pm 0,37$	$4,97 \pm 0,05$	$0,31 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TOI-2257 b	$0,15 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,02$	Dentro	Dentro

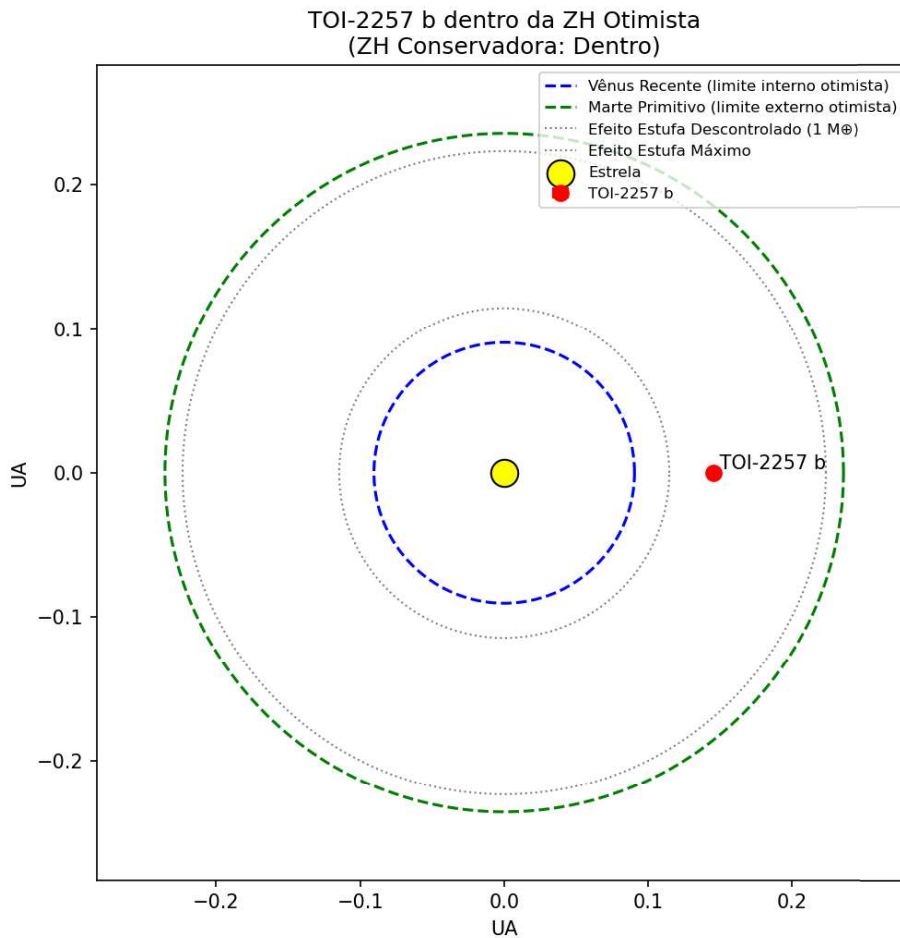


Figura D.123: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-2257 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

TOI-2257 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

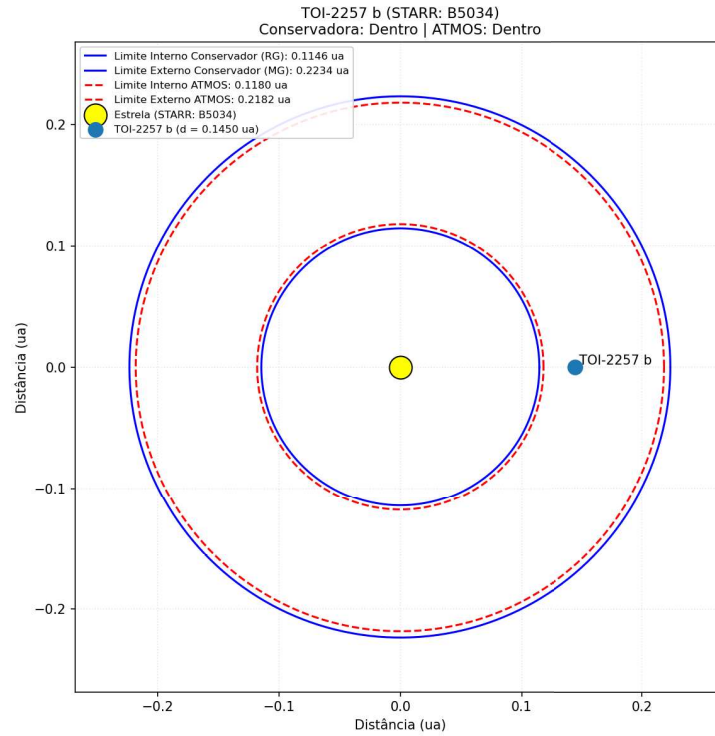


Figura D.124: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-2257 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

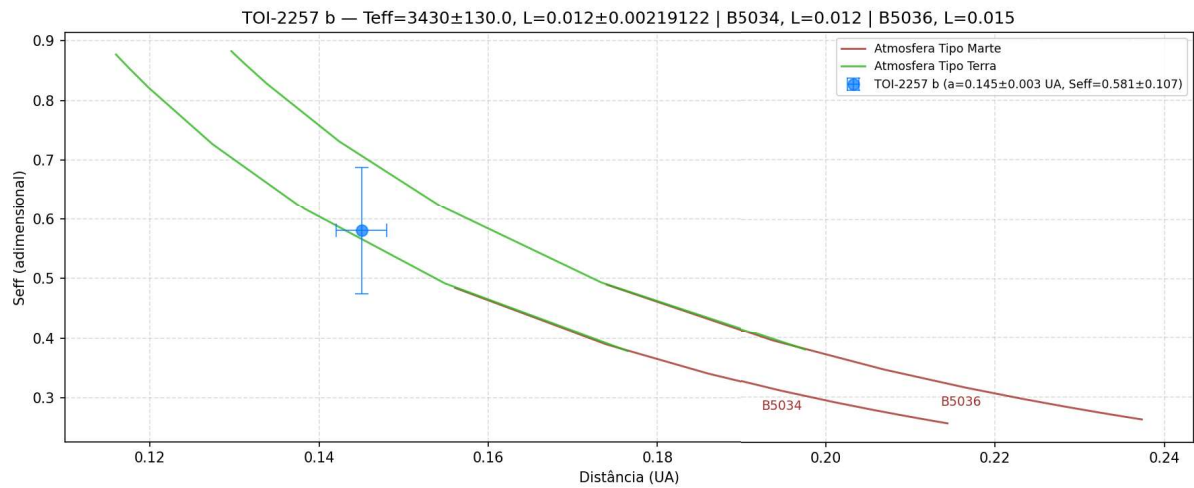


Figura D.125: Análise atmosférica de TOI 2257 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.63 TOI-700 d

O exoplaneta TOI-700 d está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TOI-700 d	$37,42 \pm 0,00$	$0,16 \pm 0,00$	$1,07 \pm 0,06$	$1,43 \pm 0,87$	$6,4 \pm 4,1$	$267,8 \pm 7,5$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
TOI-700	3459 ± 65	$-0,07 \pm 0,11$	$4,81 \pm 0,03$	$0,42 \pm 0,02$	$0,42 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TOI-700 d	$0,16 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,02$	$0,16 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,02$	Dentro	Dentro

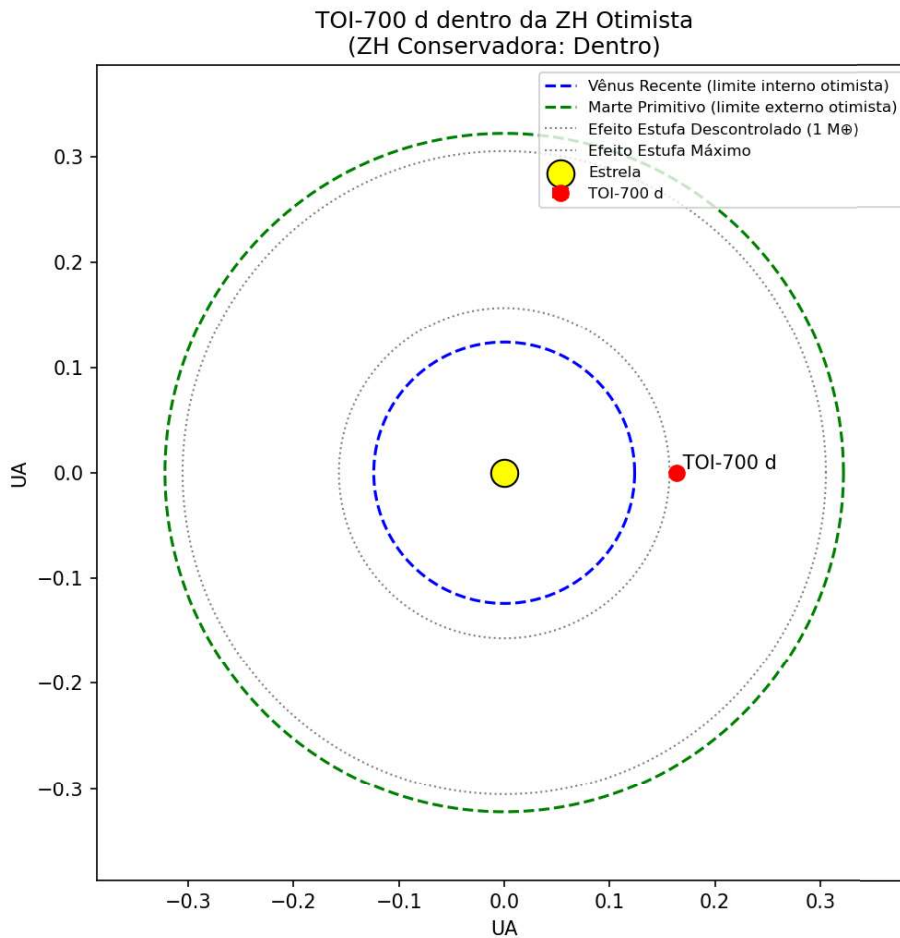


Figura D.126: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-700 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

TOI-700 d está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

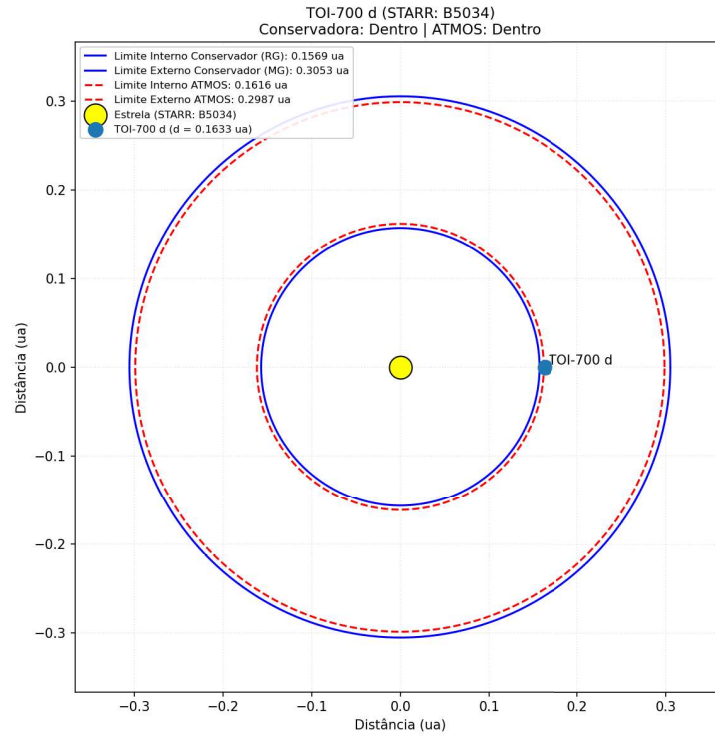


Figura D.127: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-700 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

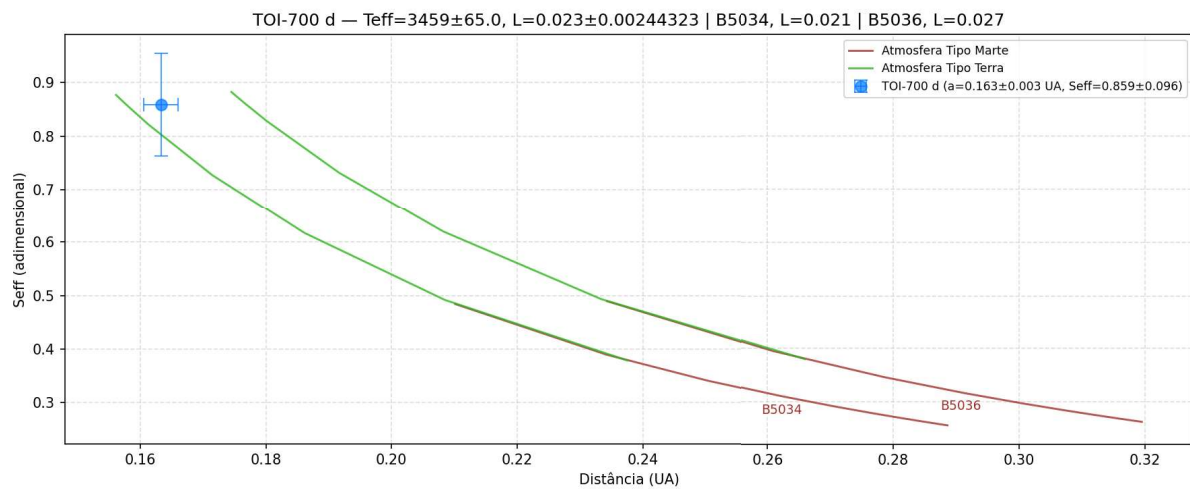


Figura D.128: Análise atmosférica de TOI 700 d por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.64 TOI-700 e

O exoplaneta TOI-700 e está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira.

Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TOI-700 e	$27,81 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,94 \pm 0,08$	$0,65 \pm 0,45$	$4,2 \pm 3,2$	$295,6 \pm 8,3$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
TOI-700	3459 ± 65	$-0,07 \pm 0,11$	$4,81 \pm 0,04$	$0,42 \pm 0,02$	$0,42 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TOI-700 e	$0,13 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,02$	$0,16 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,02$	Dentro	Fora

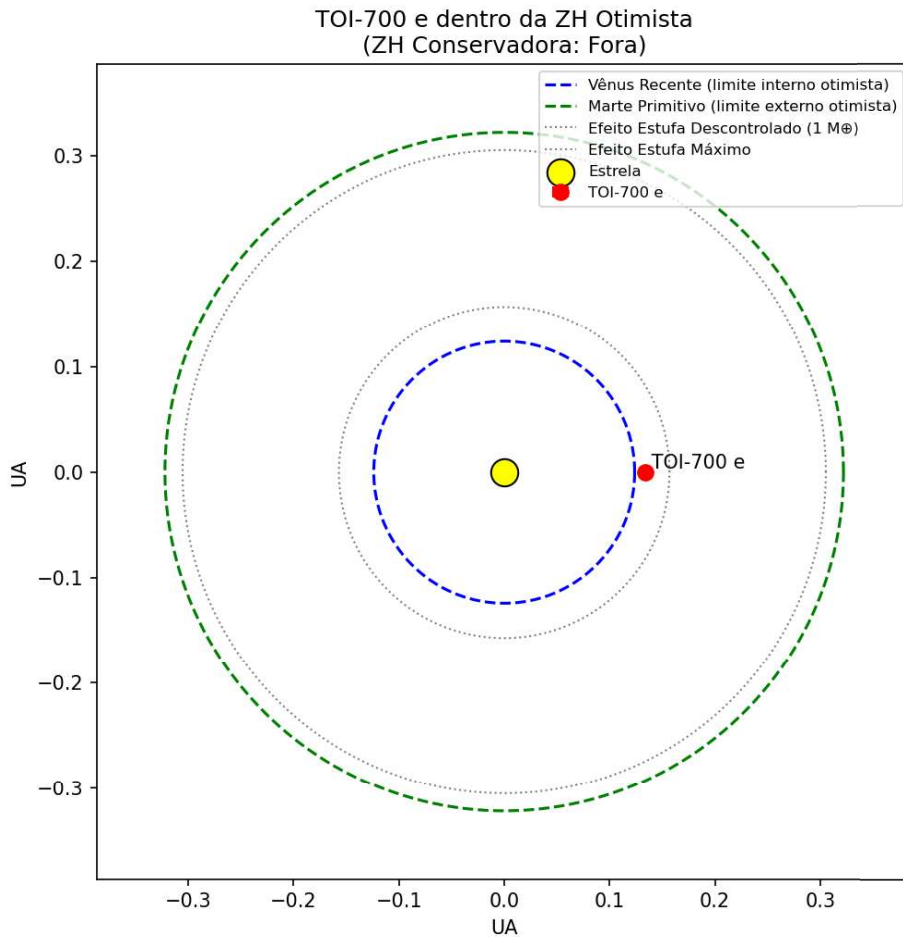


Figura D.129: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-700 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.65 TOI-715 b

O exoplaneta TOI-715 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TOI-715 b	$19,29 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$1,54 \pm 0,06$	$3,7 \pm 1,4$	$5,6 \pm 2,2$	$252,1 \pm 9,7$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
TOI-715	3075 ± 75	$-0,25 \pm 0,25$	$5,00 \pm 0,20$	$0,24 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TOI-715 b	$0,08 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,15 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	Dentro	Dentro

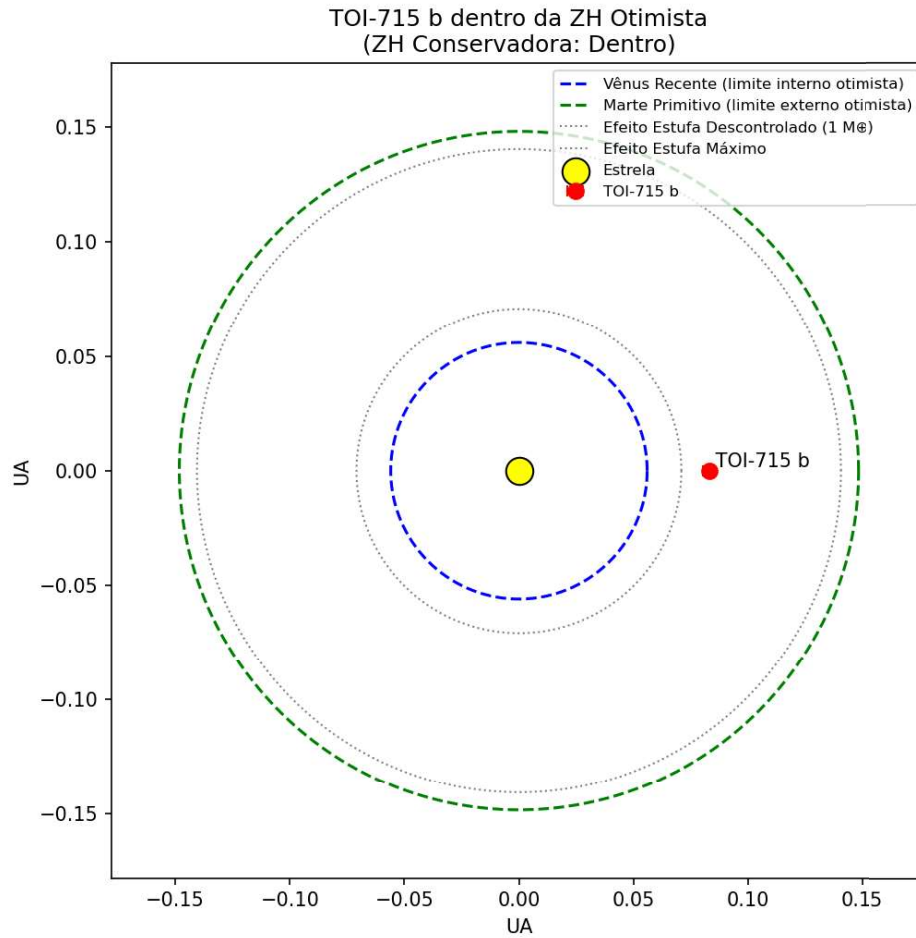


Figura D.130: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-715 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

TOI-715 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

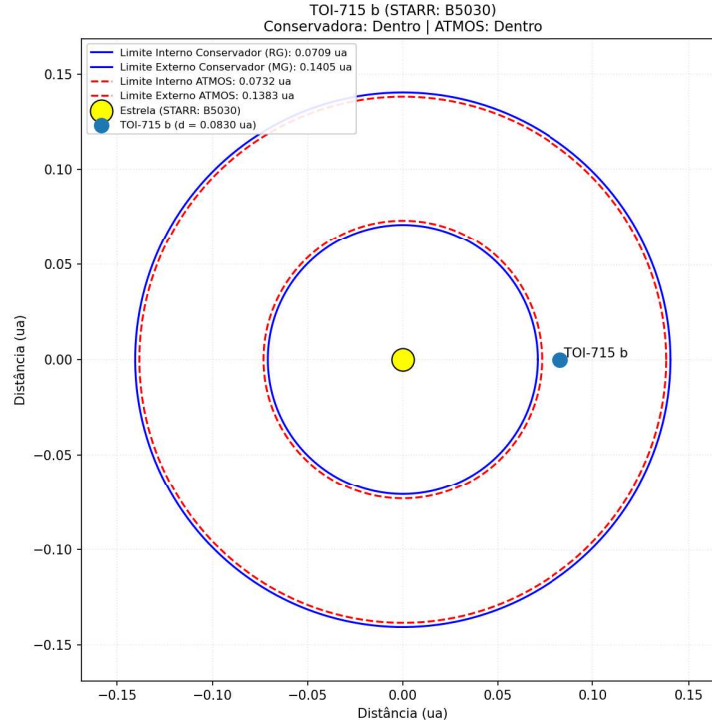


Figura D.131: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-715 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

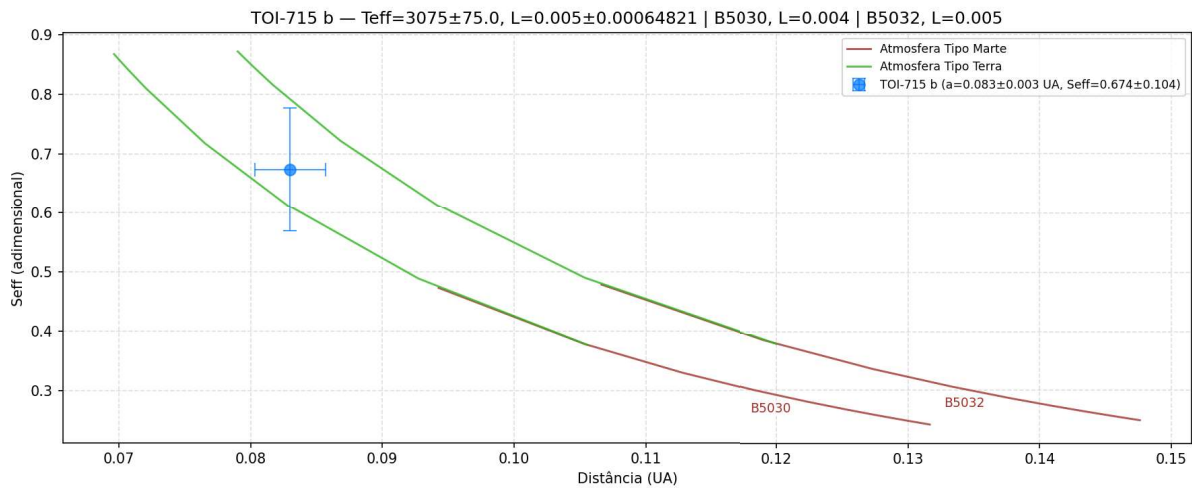


Figura D.132: Análise atmosférica de TOI-715 b por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.66 TOI-7166 b

O exoplaneta TOI-7166 b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TOI-7166 b	$12,92 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$2,00 \pm 0,06$	$6,3 \pm 1,5$	$4,3 \pm 1,1$	$283,0 \pm 5,7$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
TOI-7166	3099 ± 50	$-0,20 \pm 0,12$	$5,020 \pm 0,020$	$0,22 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TOI-7166 b	$0,06 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,14 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,01$	Dentro	Fora

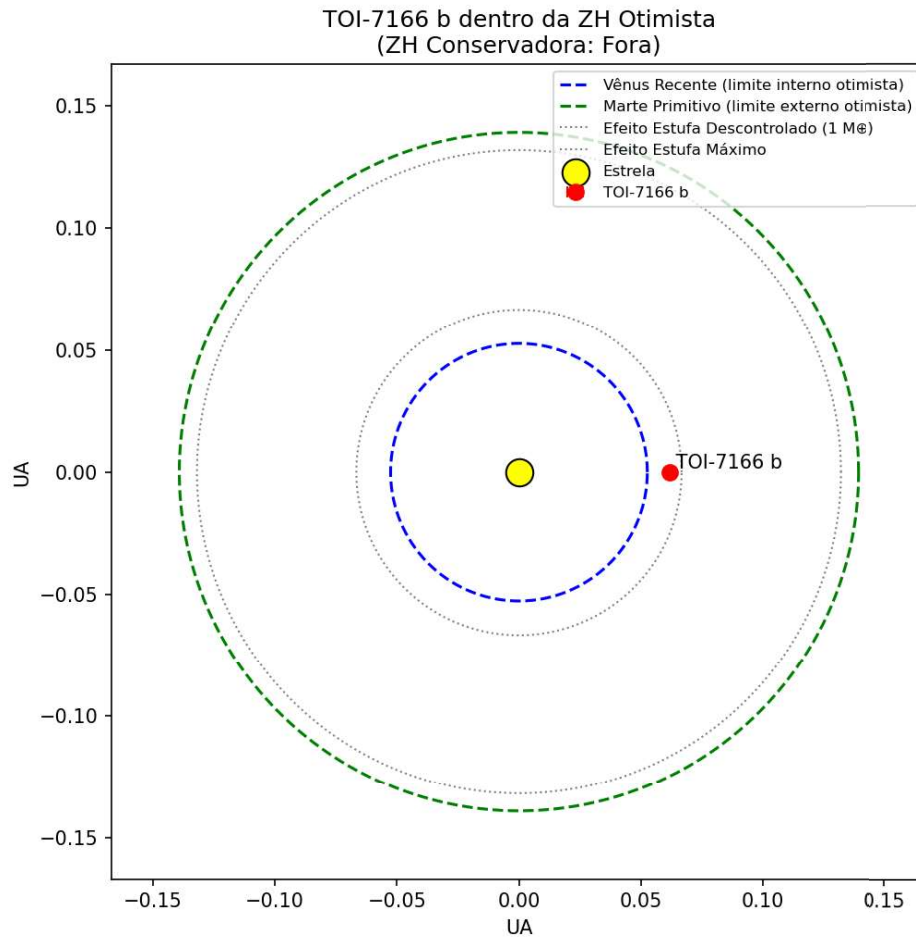


Figura D.133: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-7166 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.67 TOI-904 c

O exoplaneta TOI-904 c está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TOI-904 c	$84,00 \pm 0,00$	$0,31 \pm 0,04$	$2,17 \pm 0,12$	$8,1 \pm 1,7$	$4,4 \pm 1,2$	236 ± 17

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
TOI-904	3770 ± 70	$0,02 \pm 0,09$	$4,62 \pm 0,24$	$0,53 \pm 0,02$	$0,56 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TOI-904 c	$0,31 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,06$	$0,23 \pm 0,03$	$0,45 \pm 0,05$	Dentro	Dentro

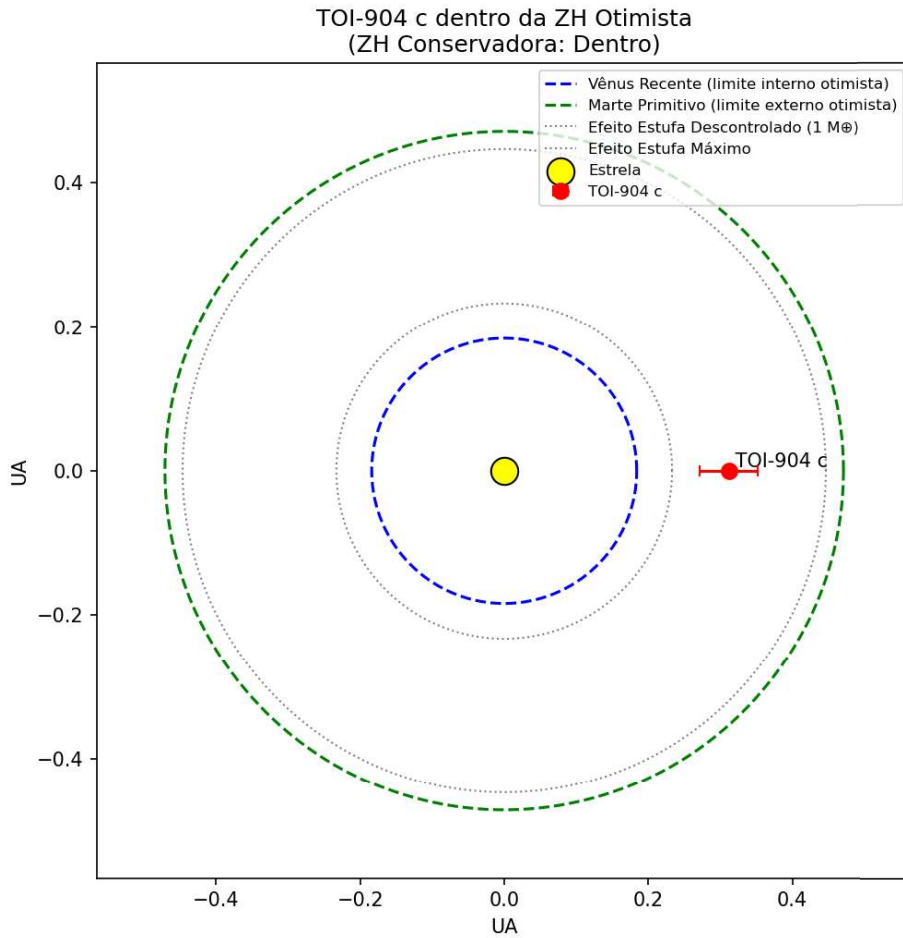


Figura D.134: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-904 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

TOI-904 c está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

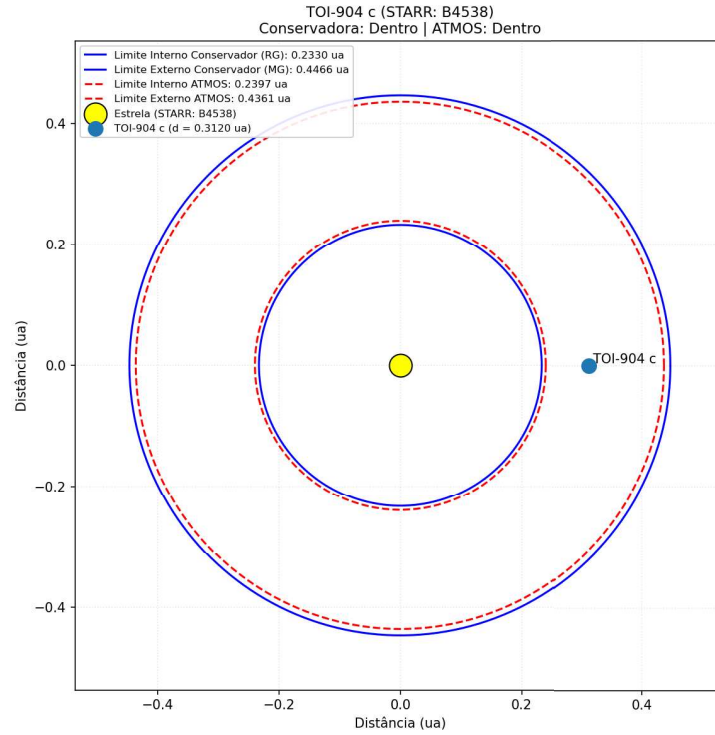


Figura D.135: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TOI-904 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

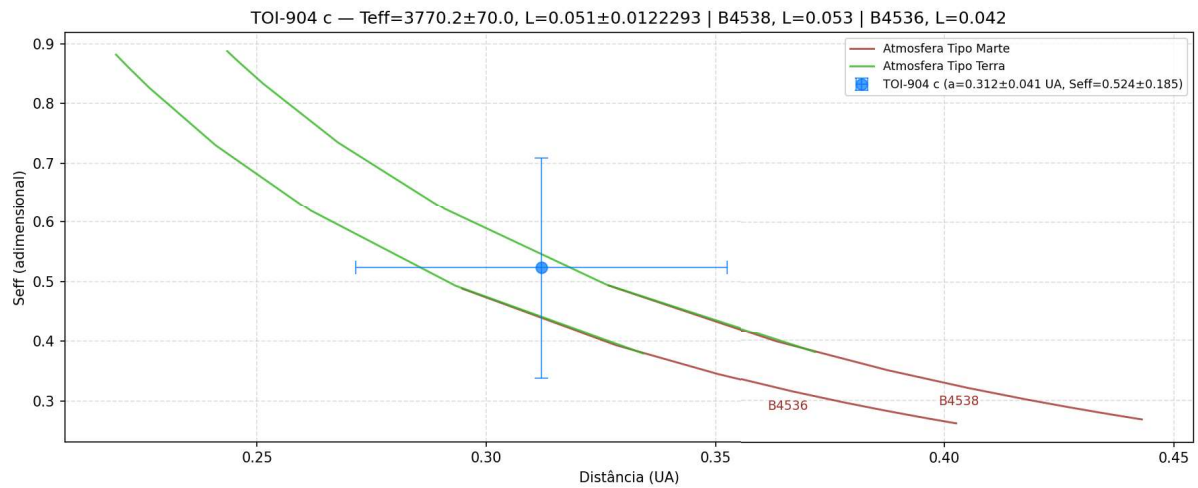


Figura D.136: Análise atmosférica TOI-904 c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.68 TRAPPIST-1 d

O exoplaneta TRAPPIST-1 d está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	R_P [$R_\oplus$]	M_P [$M_\oplus$]	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TRAPPIST-1 d	$4,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,79 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,01$	$4,37 \pm 0,16$	$286,3 \pm 3,5$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
TRAPPIST-1	2566 ± 26	$0,04 \pm 0,08$	$5,24 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,000019$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TRAPPIST-1 d	$0,022 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	Dentro	Fora

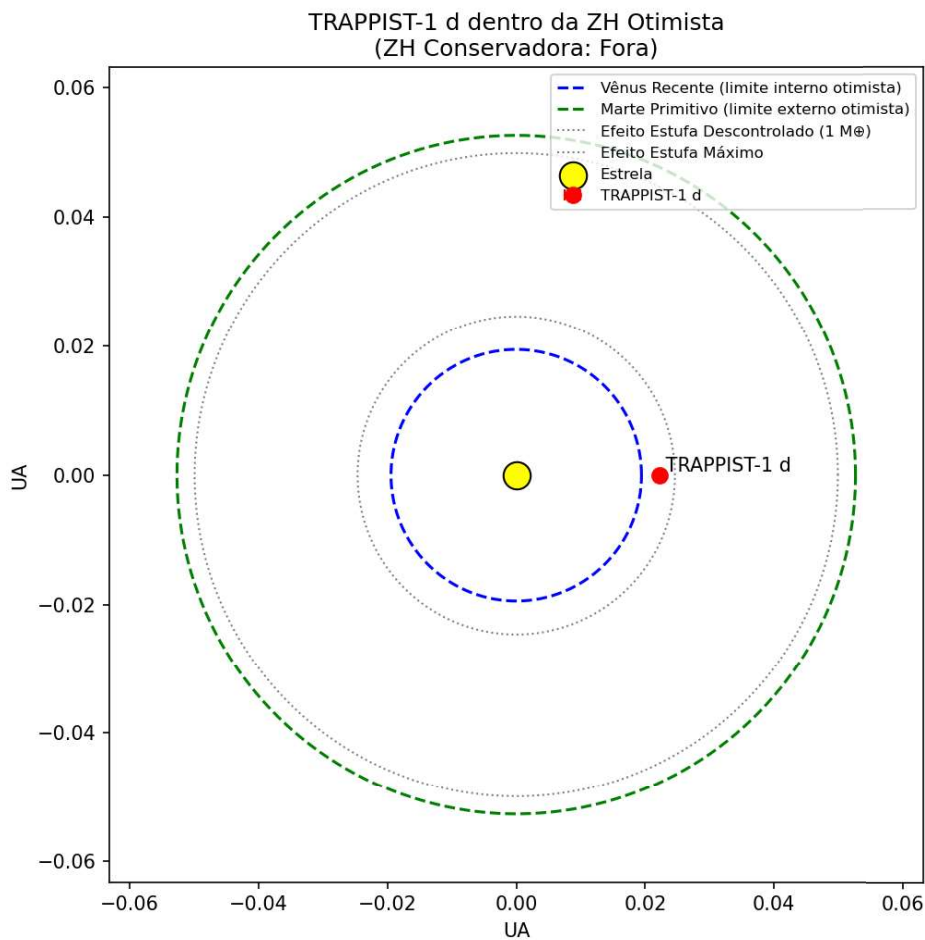


Figura D.137: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 d com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.69 TRAPPIST-1 e

O exoplaneta TRAPPIST-1 e está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TRAPPIST-1 e	$6,10 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,92 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,02$	$4,90 \pm 0,17$	250 ± 11

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
TRAPPIST-1	2566 ± 26	$0,04 \pm 0,08$	$5,24 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TRAPPIST-1 e	$0,03 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

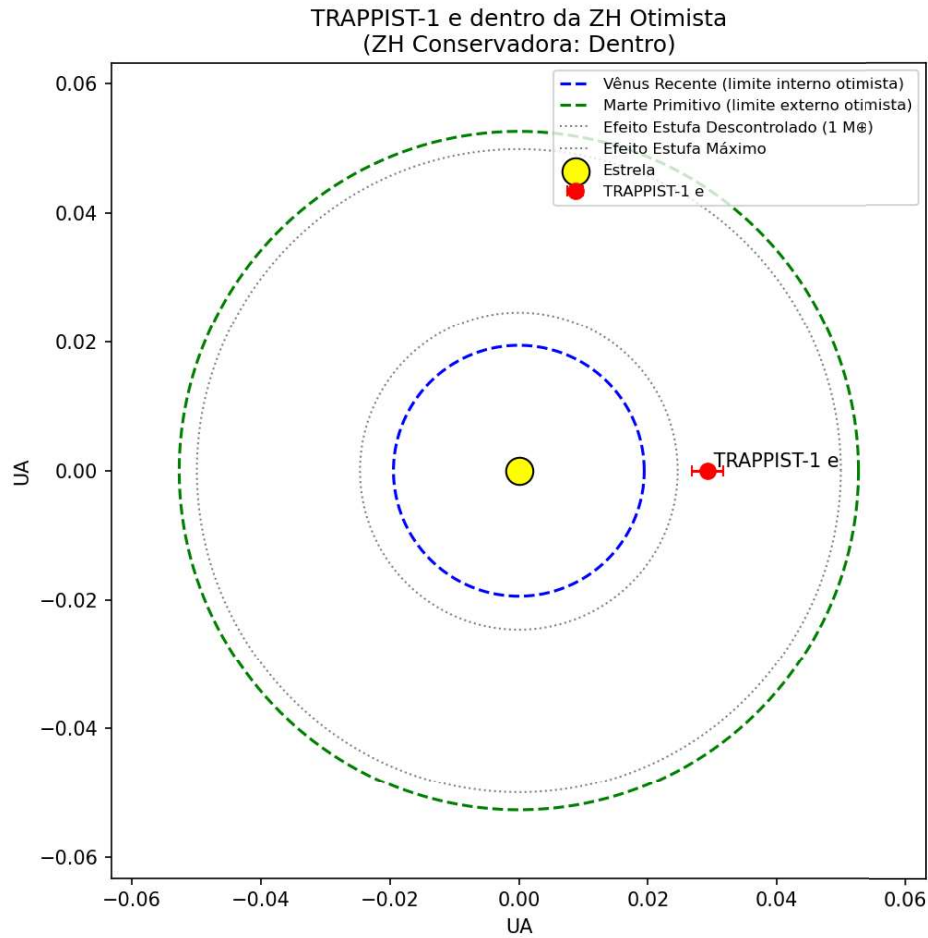


Figura D.138: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

TRAPPIST-1 e está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

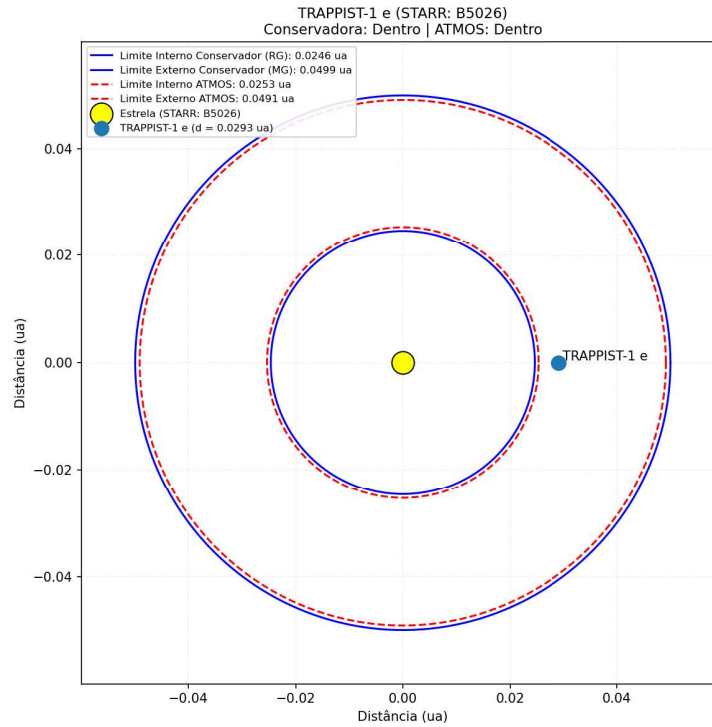


Figura D.139: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 e com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

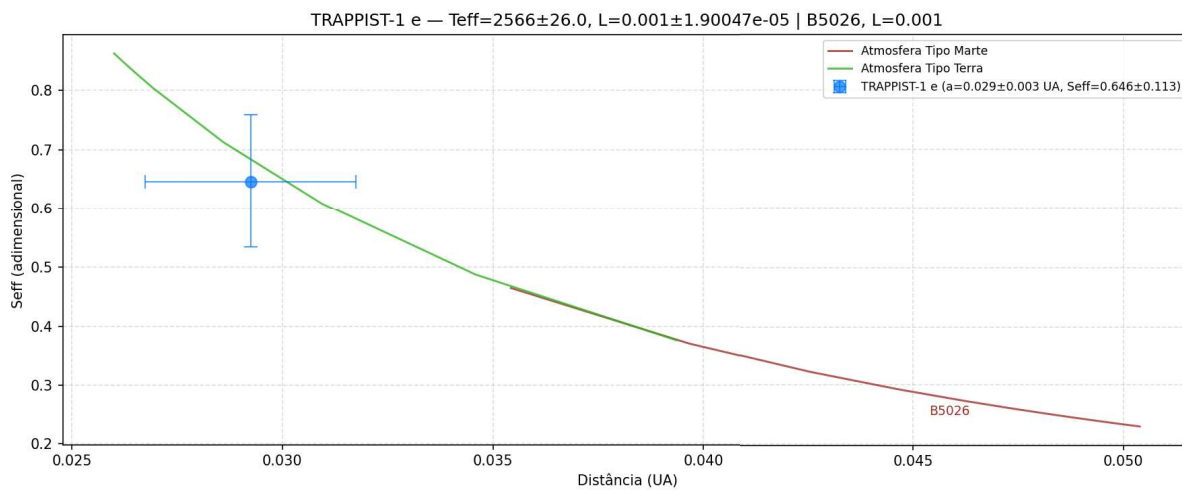


Figura D.140: Análise atmosférica de TRAPPIST-1 e por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.70 TRAPPIST-1 f

O exoplaneta TRAPPIST-1 f está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TRAPPIST-1 f	$9,21 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$1,05 \pm 0,01$	$1,04 \pm 0,03$	$5,02 \pm 0,15$	$217,7 \pm 2,7$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
TRAPPIST-1	2566 ± 26	$0,04 \pm 0,08$	$5,24 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TRAPPIST-1 f	$0,039 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

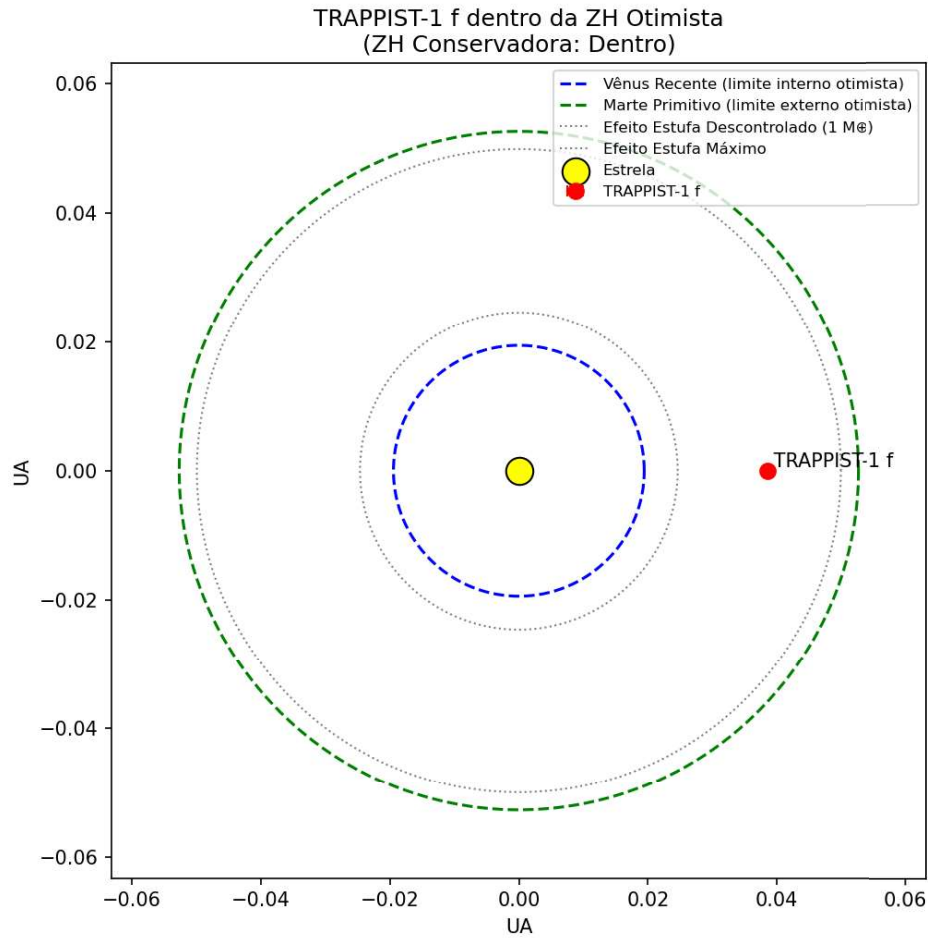


Figura D.141: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

TRAPPIST-1 f está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

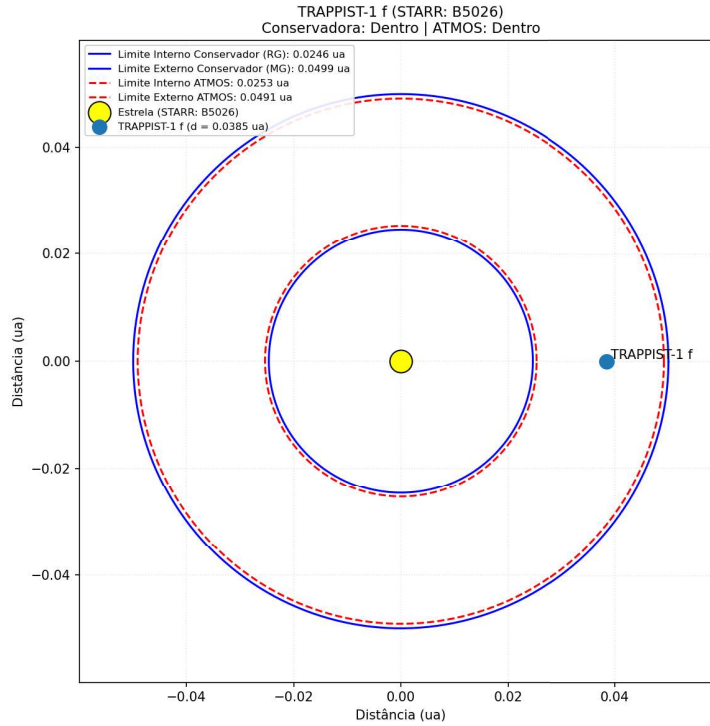


Figura D.142: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 f com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

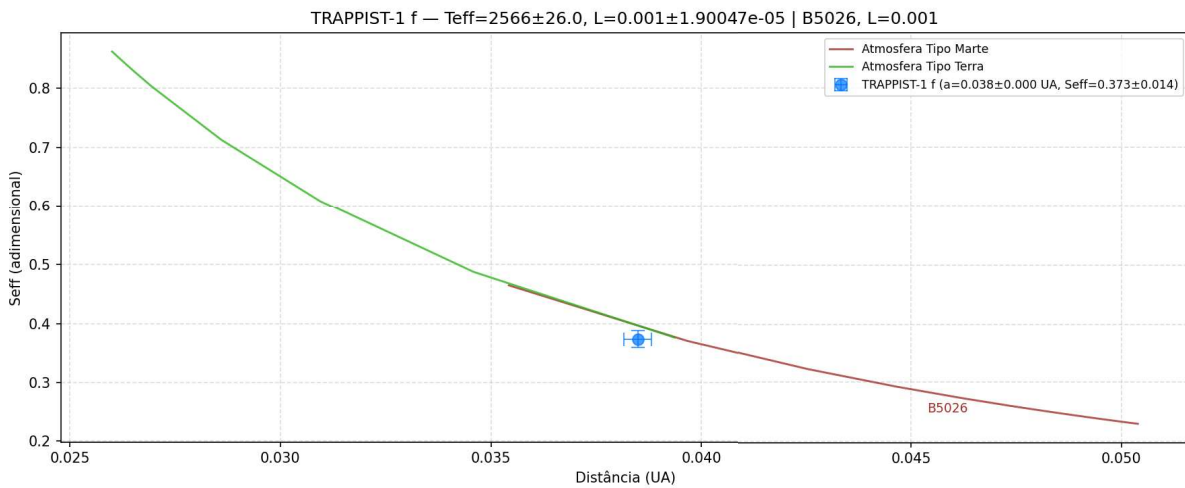


Figura D.143: Análise atmosférica de TRAPPIST-1 f por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.71 TRAPPIST-1 g

O exoplaneta TRAPPIST-1 g está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
TRAPPIST-1 g	$12,35 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$1,13 \pm 0,01$	$1,32 \pm 0,04$	$5,06 \pm 0,15$	$197,4 \pm 2,4$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
TRAPPIST-1	2566 ± 26	$0,04 \pm 0,08$	$5,24 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
TRAPPIST-1 g	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

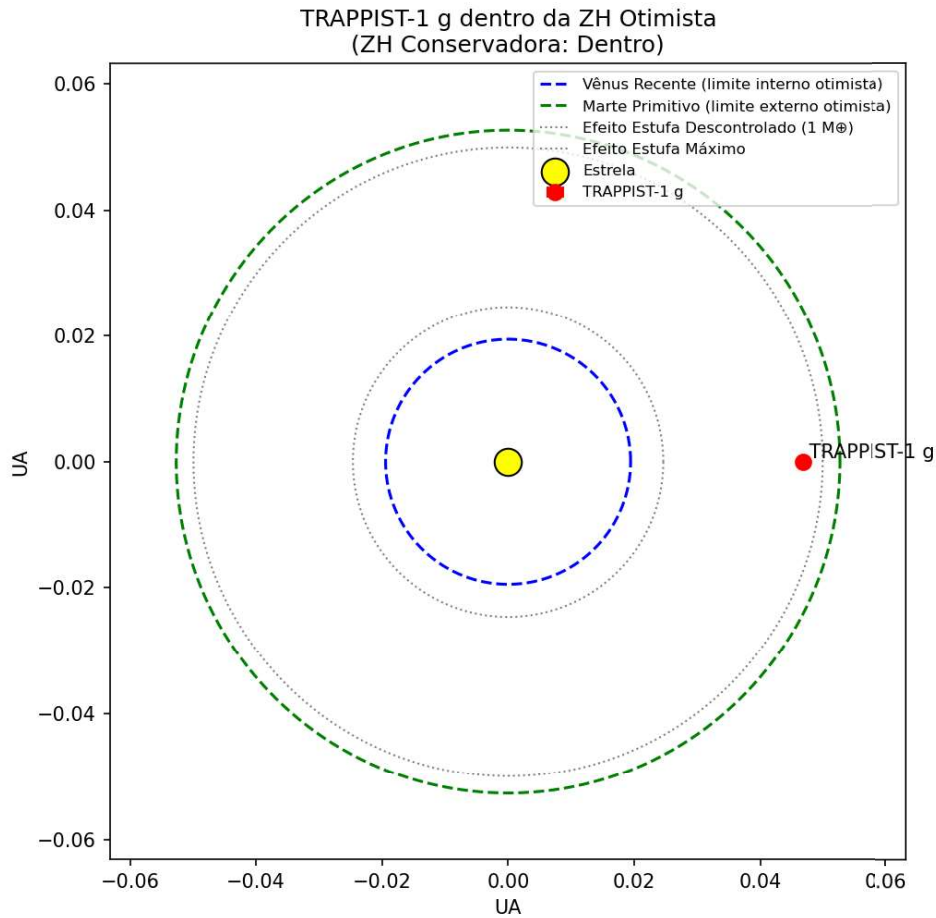


Figura D.144: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 g com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

TRAPPIST-1 g está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Marte.

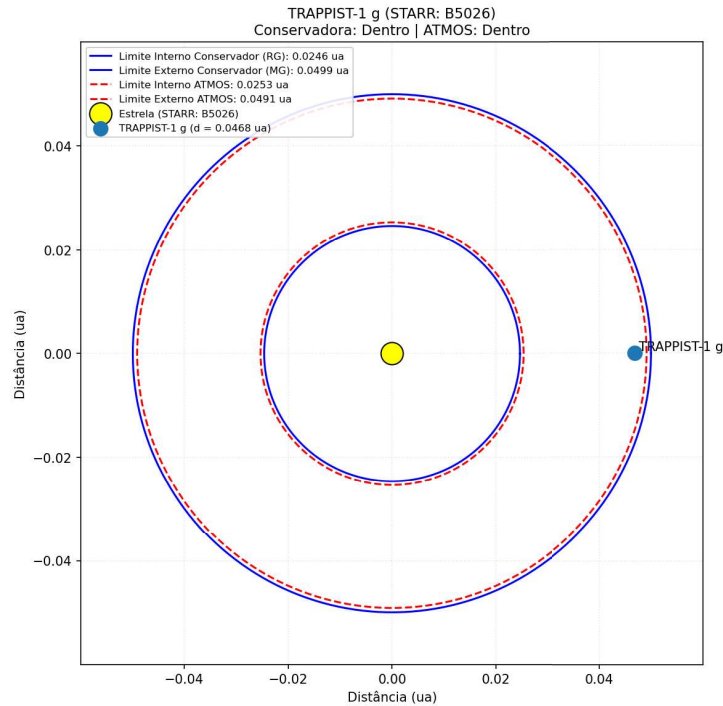


Figura D.145: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta TRAPPIST-1 g com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

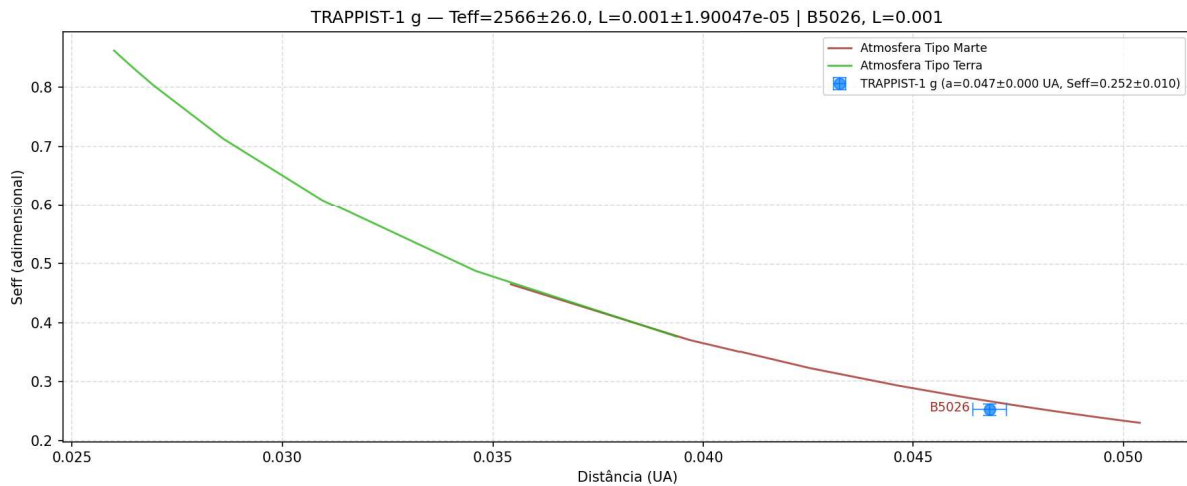


Figura D.146: Análise atmosférica de TRAPPIST-1 g por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.72 Teegarden's Star b

O exoplaneta Teegarden's Star b está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Teegarden's Star b	$4,91 \pm 0,00$	$0,026 \pm 0,00$	$1,03 \pm 0,17$	$1,14 \pm 0,12$	$5,7 \pm 2,9$	315 ± 17

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Teegarden's Star	3034 ± 45	$-0,11 \pm 0,28$	$5,19 \pm 0,20$	$0,12 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,010$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Teegarden's Star b	$0,026 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	Dentro	Fora

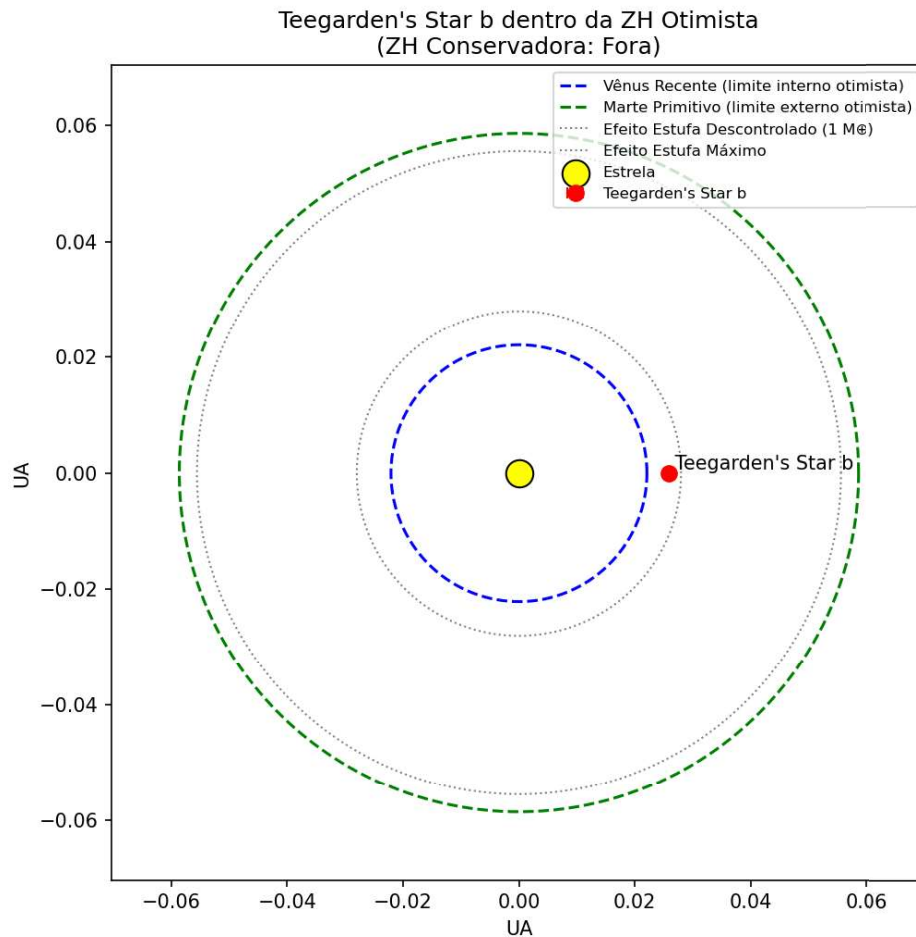


Figura D.147: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Teegarden's Star b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.73 Teegarden's Star c

O exoplaneta Teegarden's Star c está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P[R_\oplus]$	$M_P[M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Teegarden's Star c	$11,42 \pm 0,00$	$0,05 \pm 0,00$	$0,99 \pm 0,15$	$1,02 \pm 0,12$	$5,7 \pm 2,7$	238 ± 13

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Teegarden's Star	3034 ± 45	$-0,11 \pm 0,28$	$5,19 \pm 0,20$	$0,12 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Teegarden's Star c	$0,05 \pm 0,00$	$0,02 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,03 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

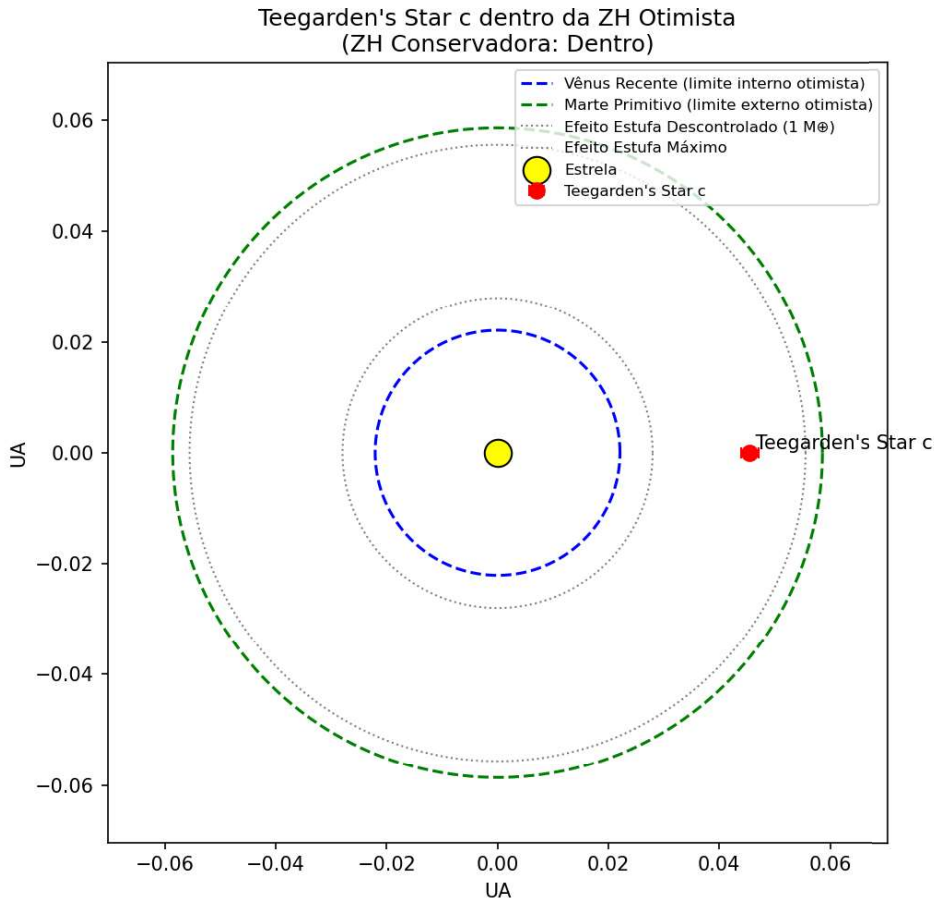


Figura D.148: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Teegarden's Star c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Teegarden's Star c está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra/Marte.

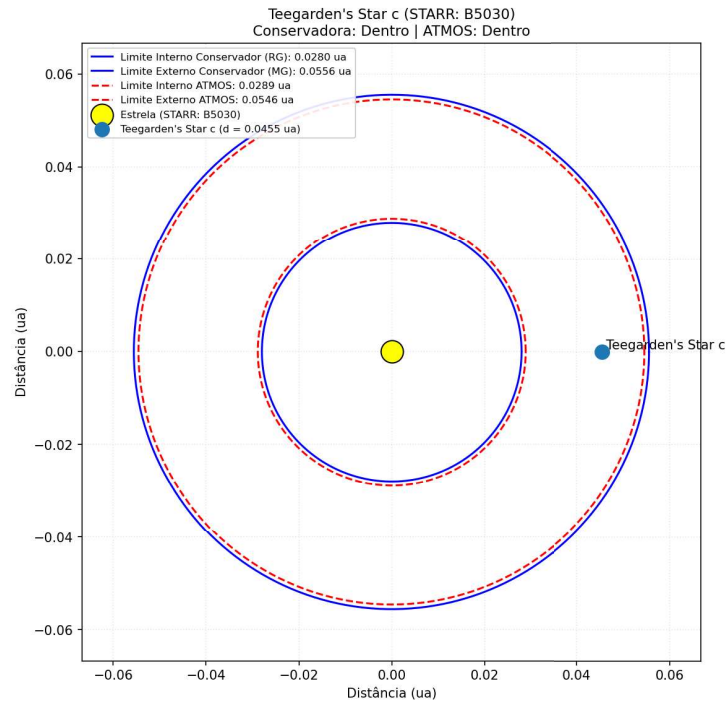


Figura D.149: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Teegarden's Star c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

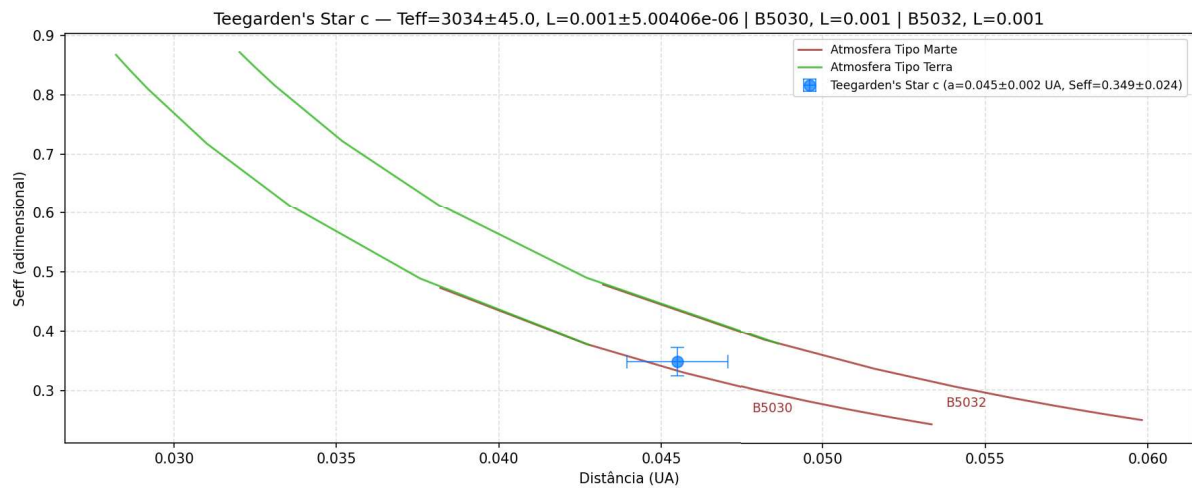


Figura D.150: Análise atmosférica Teegarden's Star c por meio da distância orbital utilizando duas STARR mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).

D.74 Wolf 1061 c

O exoplaneta Wolf 1061 c está dentro da Zona Habitável Otimista de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Wolf 1061 c	$17,87 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,00$	$1,35 \pm 0,24$	$3,38 \pm 0,39$	$7,6 \pm 4,1$	299 ± 15

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	R_* [$R_\odot$]	M_* [$M_\odot$]	L_* [$L_\odot$]
Wolf 1061	3342 ± 49	$-0,09 \pm 0,09$	—	$0,30 \pm 0,03$	0,29	$0,01 \pm 0,01$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Wolf 1061 c	$0,09 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,08$	$0,10 \pm 0,04$	$0,21 \pm 0,08$	Dentro	Fora

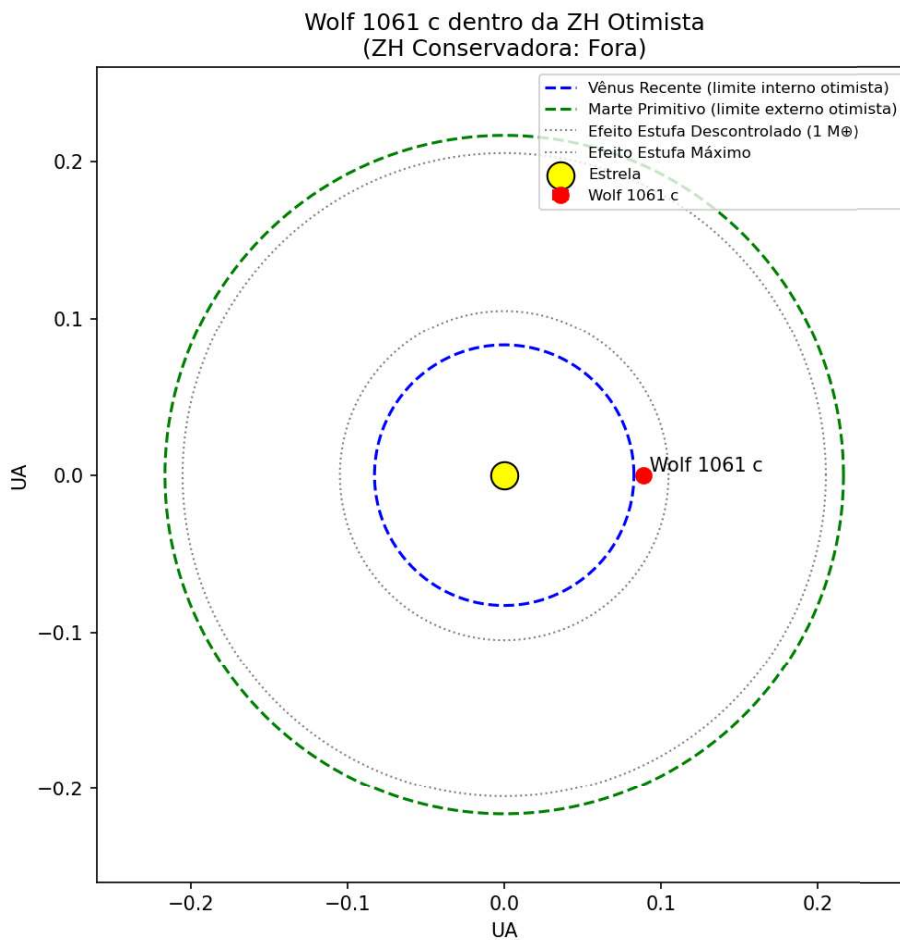


Figura D.151: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Wolf 1061 c com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

D.75 Wolf 1069 b

O exoplaneta Wolf 1069 b está dentro da Zona Habitável Conservadora de sua estrela hospedeira. Parâmetros planetários e estelares:

Planeta	P [days]	a [AU]	$R_P [R_\oplus]$	$M_P [M_\oplus]$	ρ [g/cm ³]	T_{eq} [K]
Wolf 1069 b	$15,56 \pm 0,02$	$0,07 \pm 0,00$	$1,11 \pm 0,15$	$1,28 \pm 0,18$	$5,2 \pm 2,2$	$250,1 \pm 6,6$

Estrela	T_{eff} [K]	[dex]	$\log g$ [cm/s ²]	$R_* [R_\odot]$	$M_* [M_\odot]$	$L_* [L_\odot]$
Wolf 1069	3158 ± 54	$0,07 \pm 0,19$	$4,93 \pm 0,06$	$0,18 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$

Os limites da ZH por meio da Equação 1.28 são:

Planeta	a [AU]	ZH RV [AU]	ZH EM [AU]	ZH RG [AU]	ZH MG [AU]	ZHO	ZHC
Wolf 1069 b	$0,07 \pm 0,00$	$0,04 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,00$	$0,06 \pm 0,00$	$0,11 \pm 0,00$	Dentro	Dentro

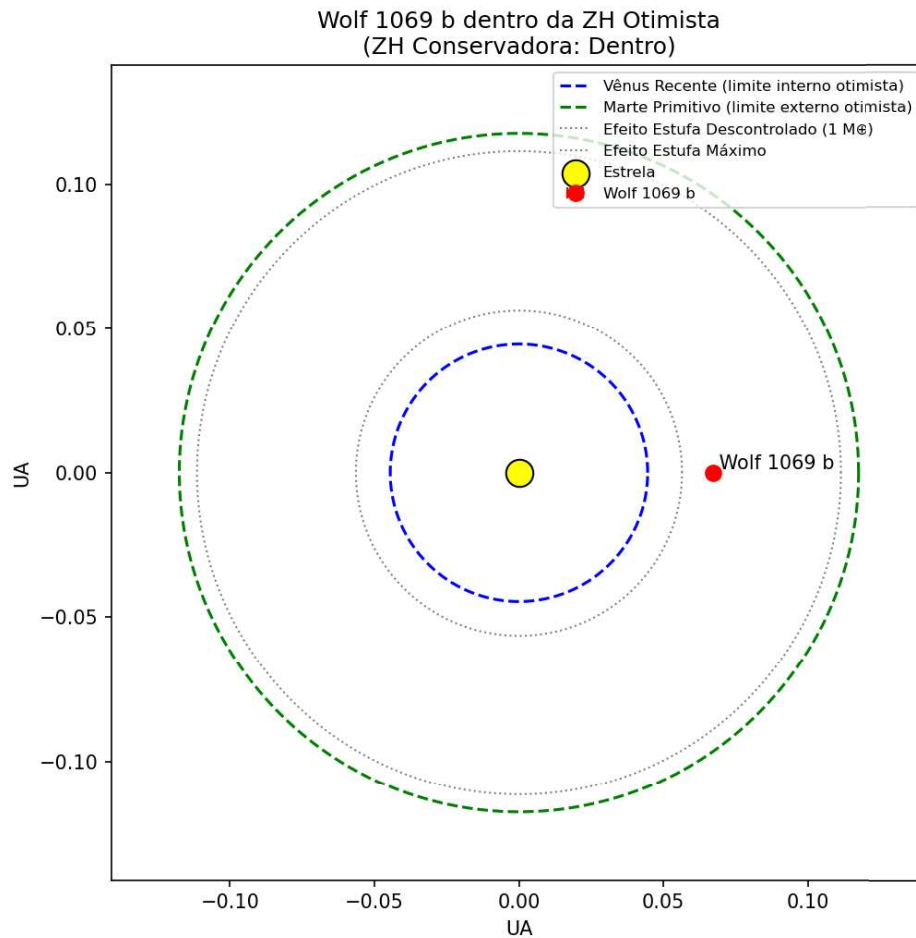


Figura D.152: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Wolf 1069 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha tracejada cinza e os limites da ZH Otimista pela Equação em linha tracejada azul e verde.

Wolf 1069 b está dentro da Zona Habitável Conservadora pelo ATMOS. Possui uma atmosfera do tipo Terra.

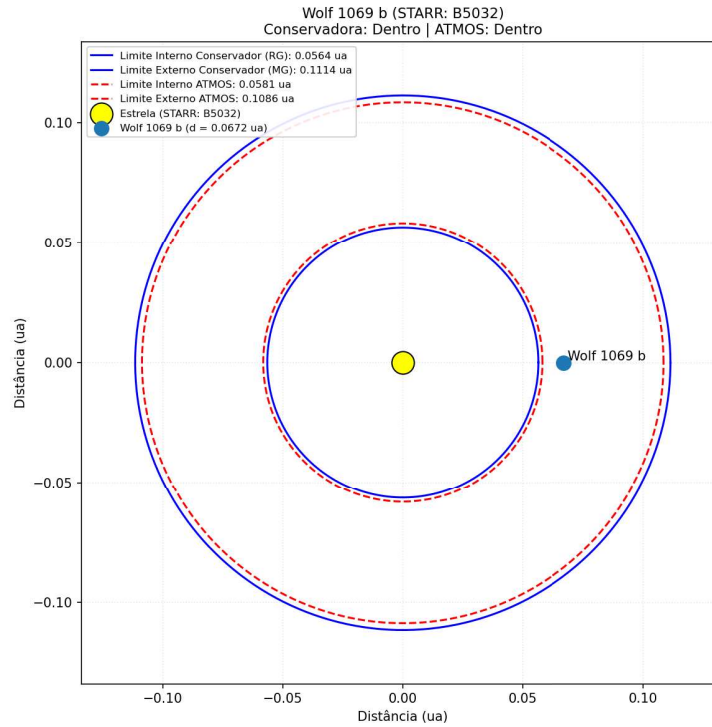


Figura D.153: Diagrama que apresenta a distância orbital do exoplaneta Wolf 1069 b com os limites da ZH Conservadora pela Equação 2.7 em linha cheia azul e os limites da ZH Conservadora pelo ATMOS em linha tracejada vermelha.

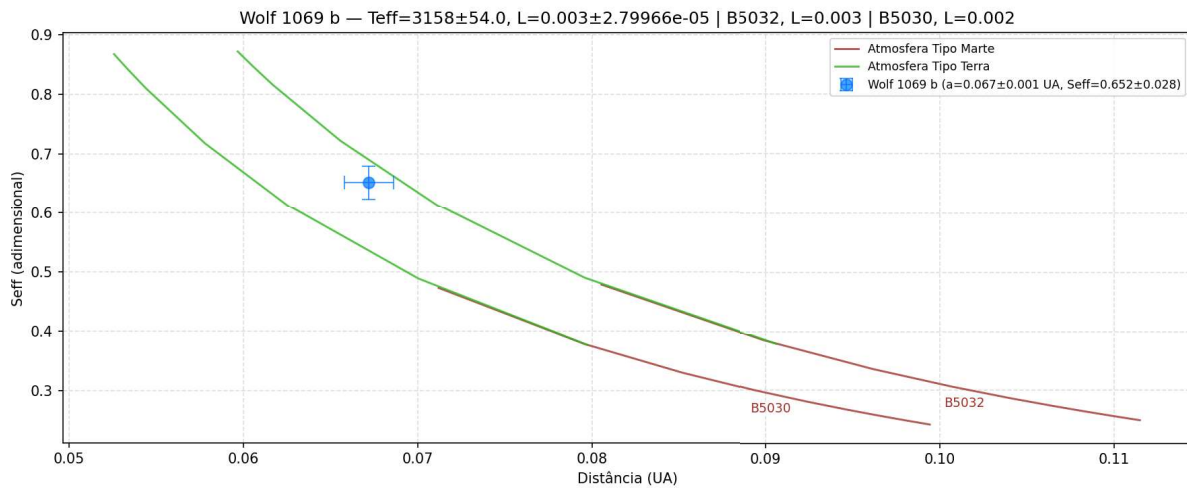


Figura D.154: Análise atmosférica de Wolf 1069 b por meio da distância orbital utilizando duas STARRs mais próximas dos parâmetros estelares da estrela hospedeira. Conferindo atmosfera do tipo Terra (proximidade à linha verde) ou atmosfera do tipo Marte (proximidade à linha vermelha).