

SIMULADOR INTERATIVO DE TRÂNSITOS DE EXOPLANETAS COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA E ASTRONOMIA

INTERACTIVE EXOPLANET TRANSIT SIMULATOR AS A DIDACTIC TOOL FOR TEACHING PHYSICS AND ASTRONOMY

Ícaro Meidem¹, Marcelo Emílio^{1,2}

¹ Observatório Nacional, Departamento de Astronomia, icarosilva@on.br

² Universidade Estadual de Ponta Grossa, Departamento de Física, memilio@uepg.br

Resumo: *A descoberta de exoplanetas e o avanço de métodos para sua caracterização representam marcos da astronomia moderna. Entre eles, destaca-se o trânsito planetário, que permite inferir propriedades dos planetas pela análise da curva de luz gerada quando passam diante da estrela hospedeira. Um fator crucial nessa análise é o escurecimento do limbo estelar (limb darkening), que afeta a forma e profundidade do sinal observado. Apesar de sua relevância científica, esse tema é pouco abordado no contexto escolar. Neste trabalho, apresentamos um simulador digital como ferramenta didática para explorar os conceitos físicos envolvidos em trânsitos planetários e o impacto do escurecimento de limbo na detecção de exoplanetas. Desenvolvido em HTML e JavaScript, o simulador permite ajustar parâmetros como raio do planeta e da estrela, inclinação orbital e ativar ou desativar o escurecimento do limbo, observando em tempo real os efeitos sobre a curva de luz. A proposta busca oferecer uma ferramenta acessível, que auxilie na compreensão de conceitos astrofísicos por meio da experimentação virtual. Embora ainda em desenvolvimento, o simulador já se mostra promissor como recurso pedagógico para ilustrar fenômenos contemporâneos da astronomia, estimular o pensamento científico e integrar tecnologias digitais ao ensino de ciências.*

Palavras-chave: Exoplanetas; Trânsito planetário; Escurecimento de limbo; Ensino de Física; Simuladores didáticos.

Abstract: *The discovery of exoplanets and the advancement of methods for their characterization represent milestones in modern astronomy. Among them, planetary transit stands out, which allows inferring the properties of planets by analyzing the light curve generated when they pass in front of the host star. A crucial factor in this analysis is the darkening of the stellar limb (limb darkening), which affects the shape and depth of the observed signal. Despite its scientific relevance, this topic is rarely discussed in schools. In this work, we present a digital simulator as a teaching tool to explore the physical concepts involved in planetary transits and the impact of limb darkening on the detection of exoplanets. Developed in HTML and JavaScript, the simulator allows adjusting parameters such as the radius of the planet and the star, orbital inclination, and activating or deactivating limb darkening, observing in real time the effects on the light curve. The proposal seeks to offer an accessible tool that helps in the understanding of astrophysical concepts through virtual experimentation. Although still under development, the simulator already shows promise as a pedagogical resource to illustrate contemporary phenomena in astronomy, stimulate scientific thinking, and integrate digital technologies into science teaching.*

Keywords: Exoplanets; Planetary transit; Limb darkening; Physics teaching; Educational simulators.

INTRODUÇÃO

O estudo de exoplanetas — planetas que orbitam outras estrelas — ganhou grande destaque nas últimas décadas devido às suas descobertas, especialmente com missões como Kepler, TESS e CHEOPS. Esses projetos empregam o método de trânsito planetário, que consiste na observação de pequenas quedas periódicas no brilho de uma estrela, causadas pela passagem de um planeta à sua frente. A análise da curva de luz gerada por esses trânsitos requer conhecimentos interdisciplinares, envolvendo óptica, geometria orbital, leis de Kepler e fotometria (DE OLIVEIRA et al., 2018; MEIDEM et al., 2022; 2023).

Além de sua relevância científica, a temática dos exoplanetas tem se mostrado uma poderosa ferramenta didática. Por conectar os conteúdos escolares a descobertas contemporâneas e instigantes, estimula a curiosidade e o engajamento dos estudantes no aprendizado de Física e Astronomia. O fenômeno do trânsito, em particular, permite abordar conceitos como intensidade luminosa, espectros de radiação, gravitação e até modelagem matemática e análise de dados (PELLENZ; TISOTT, 2014). Também oferece uma oportunidade concreta de ilustrar o método científico em ação: da observação da curva de luz à formulação de hipóteses, construção e ajuste de modelos, passando pela consideração de efeitos como o escurecimento do limbo, até a interpretação dos resultados (OLIVEIRA e BARBOSA, 2021).

Contudo, a interpretação precisa desses sinais requer a consideração de um fenômeno físico fundamental: o escurecimento do limbo. Este efeito, conhecido internacionalmente como *limb darkening* (LD), faz com que as bordas da estrela aparentam ser menos brilhantes do que o centro, impactando significativamente a forma da curva de luz do trânsito. É essencial compreender que o LD não constitui um mero ruído a ser eliminado dos dados, mas sim uma característica intrínseca da estrutura estelar que modula o sinal observado (ESPINOZA e JORDÁN, 2015). Esse comportamento é crucial para a interpretação precisa dos parâmetros orbitais e físicos dos exoplanetas.

Nesse contexto, simuladores digitais constituem ferramentas didáticas valiosas, ao possibilitarem que os estudantes manipulem parâmetros físicos em tempo real e visualizem os efeitos diretamente sobre fenômenos simulados, como a curva de luz em trânsitos planetários. Além de favorecerem a aproximação da prática científica, mesmo em ambientes escolares com infraestrutura limitada, esses recursos promovem um ambiente de aprendizagem interativo e imersivo (FILHO et al., 2023; PARVIAINEN e AIGRAIN, 2015). Ao explorar diferentes cenários de forma segura e controlada, os alunos desenvolvem intuições sobre conceitos complexos de maneira visual e experimental, contribuindo para o engajamento e a compreensão mais profunda dos conteúdos abordados (ARAÚJO, 2021).

Com base nesse potencial, apresentamos aqui um simulador interativo em HTML e JavaScript, desenvolvido especificamente para fins educacionais, que pode ser empregado em uma sequência de ensino-aprendizagem. A ferramenta permite explorar variáveis como raio planetário, tipo espectral da estrela, parâmetro de impacto e a existência ou não de LD. Isso possibilita aos estudantes comparar diferentes cenários, identificar tendências e compreender como a física estelar influencia a detecção e caracterização de exoplanetas, reforçando assim a importância dos simuladores e das práticas experimentais no ensino de ciências.

COMPREENDENDO O MÉTODO DE TRÂNSITO E O ESCURECIMENTO DO LIMBO ESTELAR

O Método de Trânsito

O método de trânsito é uma das técnicas mais bem-sucedidas para a detecção e caracterização de exoplanetas, sendo responsável por mais de 90% das descobertas confirmadas (NASA Exoplanet Archive, 2025). Ele se baseia na observação da diminuição periódica do brilho de uma estrela causada pela passagem de um planeta em frente ao seu disco, bloqueando uma fração da luz observável. A profundidade da curva de luz (ΔF) é aproximadamente proporcional ao quadrado da razão entre o raio do planeta (R_p) e o raio da estrela (R_*), ou seja:

$$\Delta F \approx (R_p / R_*)^2 \quad (1)$$

Uma curva típica de trânsito apresenta as seguintes fases: (i) fora de trânsito (brilho constante); (ii) ingresso (queda inicial do brilho); (iii) trânsito total (mínimo de fluxo); e (iv) egresso (retorno ao brilho original). Como mostrado na Figura 1, o escurecimento do limbo estelar tem um papel fundamental na forma desta curva. Em uma estrela sem escurecimento, a curva assumiria uma forma trapezoidal. No entanto, como as bordas da estrela são menos brilhantes que o centro, a transição de brilho durante o ingresso e egresso se torna arredondada (CARTER et al., 2009).

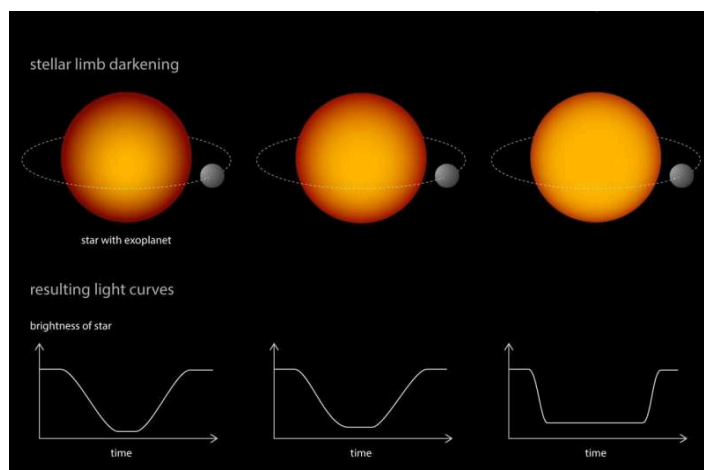


Figura 1: Diferentes curvas de luz à medida que o LD diminui da esquerda para direita. Abaixo a representação de como é a curva de luz. Créditos: MPS / hormesdesign.de

Os conceitos físicos envolvidos nos eventos de trânsitos planetários abrangem desde temas relativamente simples como a física envolvida nos movimentos orbitais, até assuntos mais complexos como, por exemplo, as leis de radiação térmica para as estrelas. No caso dos alunos dos primeiros anos de graduação em física ou astronomia, pode-se tratar os mesmos termos mais aprofundados e, também, assuntos relacionados à evolução planetária e à evolução e física estelar, tratar de assuntos como a frequência angular de translação, distância entre a fonte e o objeto, ângulo de inclinação do plano orbital e a dimensão de um planeta (MEIDEM et. al, 2023).

Escurecimento do limbo

O escurecimento do limbo é uma consequência da estrutura atmosférica estelar. Quando observamos o centro da estrela, vemos camadas mais profundas, quentes e densas. Já nas bordas (o limbo), nossa linha de visada intercepta camadas mais superficiais, frias e rarefeitas, o que reduz a intensidade emitida (CLARET, 2000). A Figura 2 ilustra esse efeito em uma imagem real do trânsito de Vênus no disco solar, mostrando como as bordas aparentam ser mais escuras do que o centro.

Esse comportamento pode ser descrito com o conceito de profundidade óptica (τ). Conforme DINIZ (2022), vemos até aproximadamente $\tau = 1$; no centro, isso corresponde a regiões mais profundas e quentes; no limbo, a obliquidade da linha de visada faz com que atinjamos $\tau = 1$ em camadas mais altas e frias. Fisicamente, a intensidade emitida por um gás depende da temperatura local, de acordo com a Lei de Planck. Como as camadas observadas no limbo são mais frias, emitem menos radiação, e a estrela parece mais escura nas bordas. Esse gradiente de temperatura nas fotosferas estelares, juntamente com a opacidade do gás, molda o perfil de brilho observado (DINIZ, 2022).

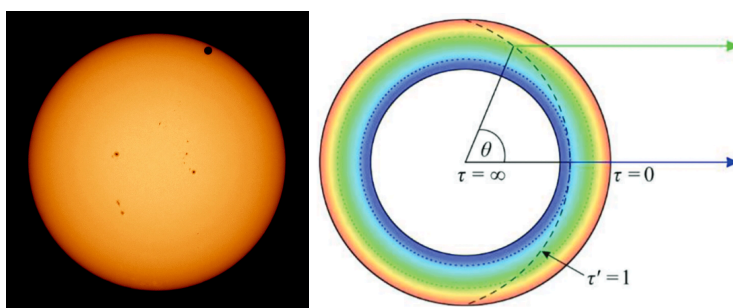


Figura 2: *Esquerda:* Registro feito do Sol no momento do trânsito de Vênus (círculo menor escuro). Créditos: NASA. *Direita:* Representação do LD. A Linha tracejada em preto representa a profundidade óptica e as setas representam as direções de observação. As cores representam de forma figurativa as temperaturas em forma de gradiente da mais quente (azul) para a mais fria (vermelho). Fonte: Muller (2016)

Diversos modelos matemáticos, conhecidos como leis de LD, foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas para descrever como a intensidade da luz varia do centro para as bordas do disco estelar (CLARET, 2000; ESPINOZA, 2015; COULOMBE et al., 2024; KEERS et al., 2024). Essas leis têm como objetivo representar, de forma aproximada, o perfil de brilho da estrela observado durante trânsitos planetários, sendo cruciais para a modelagem precisa das curvas de luz.

A existência de múltiplas leis reflete a complexidade da estrutura atmosférica estelar e a busca constante por representações matemáticas que conciliam realismo físico com viabilidade computacional. A escolha da lei mais adequada depende da qualidade dos dados observacionais, do tipo de estrela observada e do objetivo da análise. Em contextos educacionais, essas leis também oferecem oportunidades para explorar conceitos como modelagem, ajuste de curvas e análise de incertezas, contribuindo para uma compreensão mais profunda do método científico aplicado à astrofísica.

SIMULANDO TRÂNSITOS PLANETÁRIOS E A INFLUÊNCIA DO ESCURECIMENTO DO LIMBO

Este simulador é um programa de baixo custo que foi desenvolvido em HTML e JavaScript para fins educativos sem a necessidade de instalação. Ele visa permitir que os alunos explorem interativamente como diferentes parâmetros de um sistema exoplanetário, incluindo o escurecimento do limbo, afetam a forma da curva de luz de um trânsito. A versão 1 (v1) do simulador pode ser baixada através do link: <https://encurtador.com.br/9CIRp> e pode ser aberto em qualquer computador que use Linux ou Windows através de qualquer navegador (Firefox, Chrome, Edge, etc). Além disso, pode ser aberto pelo celular, usando o navegador, mas ainda é preciso otimizações para que seja bem executado em ambientes *mobile*.

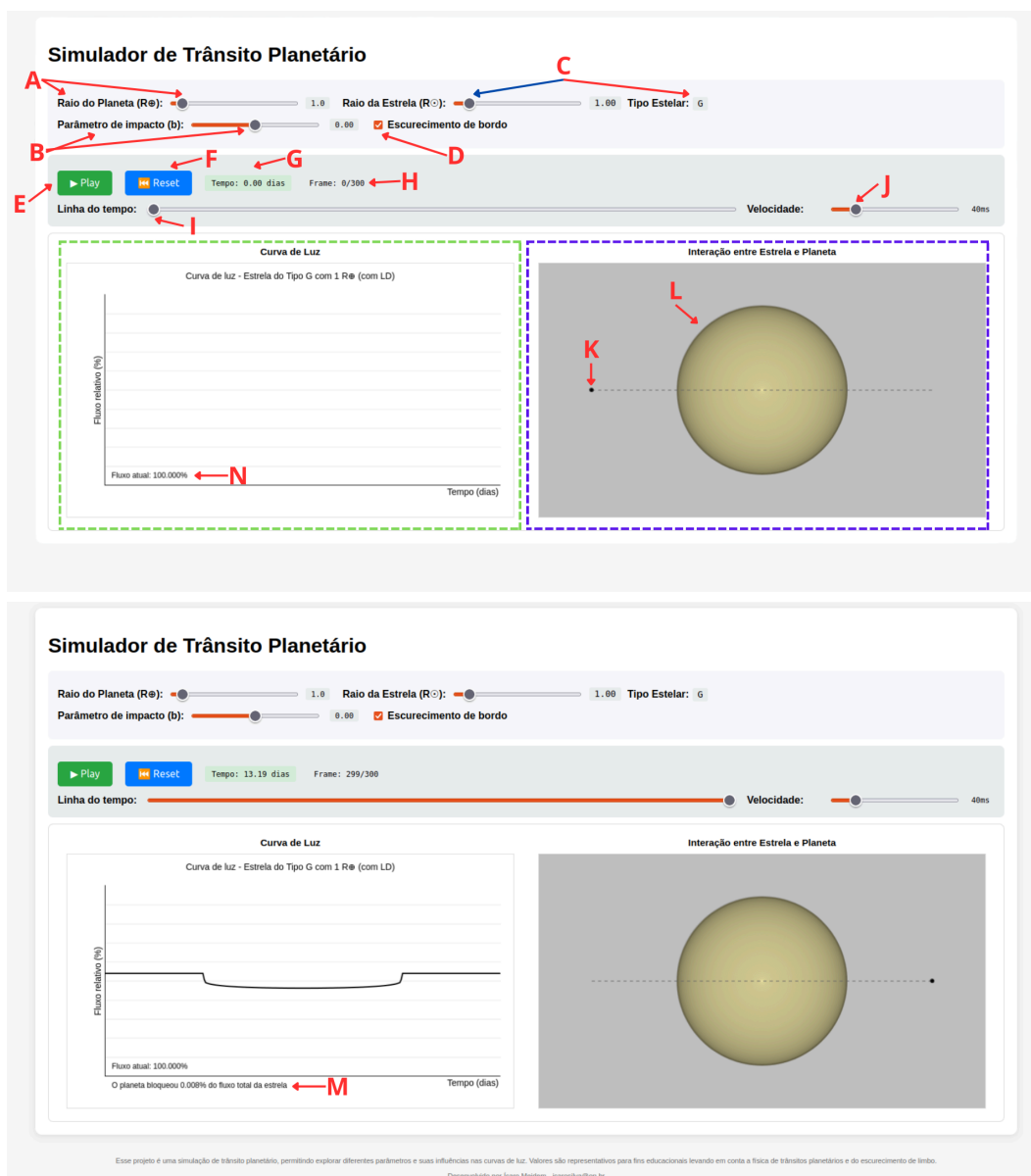


Figura 3: Tela inicial (acima) e final (abaixo) do simulador. Autoria própria.

A Figura 3, no painel superior, apresenta a tela inicial do simulador assim que ele é aberto no navegador com as suas funcionalidades e o painel de baixo é a tela final após feita a simulação. A simulação é feita em tempo real, gerando a curva de luz do planeta à medida que ele vai atravessando a linha de visada entre observador e estrela. Em (A) o usuário pode selecionar o raio do planeta (K) em unidades de raios terrestres, variando de $0,3 R_{\oplus}$ até $15 R_{\oplus}$. Em (B) é o parâmetro de

impacto, e está diretamente ligado à inclinação orbital do planeta. Na animação o planeta “sobe” e “desce” com relação ao centro da estrela (L). Em (C-seta azul) é onde é possível alterar o raio da estrela (L) em unidades de raios solares, variando de $0,20 R_{\odot}$ até $10 R_{\odot}$ onde, em tempo real em (C-seta vermelha), muda a classificação espectral e consequentemente a cor da estrela, na animação dentro do quadrado tracejado azul, seguindo a Classificação Espectral de Harvard¹ (M, K, G, F, A, B e O) com base no raio selecionado. Em (D) é onde ativa/desativa o LD da simulação, com a caixa selecionada a curva de luz gerada leva em consideração um dos modelos mais utilizados de LD, proposto por CLARET (2000).

O botão (E) controla o início e a parada da animação, enquanto o botão (F) reinicia a mesma. (G) e (H) mostram o tempo da animação em dias (calculado conforme as Lei de Kepler e levando em consideração o raio do planeta e estrela) e a contagem em frames, respectivamente. Ao arrastar a barra (I), controla o movimento da animação e a barra (J) controla a velocidade da animação, para a esquerda mais rápida e para a direita mais lenta. No retângulo tracejado em azul é onde é desenhada a curva de luz em tempo real à medida que o planeta vai cruzando a estrela no quadrado tracejado em verde, é mostrado o fluxo de luz vindo da estrela variando em tempo real em (N) e ao final da animação, em (M) é mostrado o quanto de fluxo de luz o planeta bloqueou da estrela, com base em seus valores de raios (calculado através da Equação 1). A Figura 4 é a representação artística, na animação, de uma estrela do tipo G com LD (à direita) e sem LD (à esquerda).

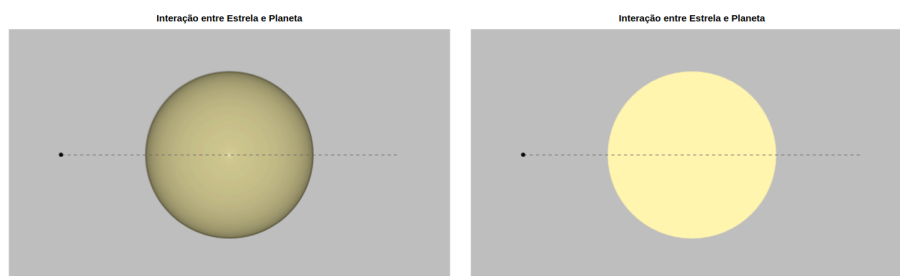


Figura 4: Visualização no simulador de uma estrela do tipo espectral G com escurecimento do limbo ativado (à esquerda) e desativado (à direita). A imagem ilustra como o perfil de brilho estelar influencia a forma da curva de luz durante um trânsito planetário. Autoria própria.

Apesar de sua utilidade didática, o simulador apresenta algumas limitações que merecem ser destacadas. A versão atual não incorpora efeitos de ruído instrumental, variações no brilho estelar provocadas por manchas ou atividade magnética, nem simula atmosferas planetárias, fatores que podem influenciar a forma e profundidade das curvas de luz observadas. Além disso, o modelo de escurecimento do limbo adotado é simplificado, baseado em uma única lei amplamente utilizada na literatura, o que limita a representação de diferentes tipos estelares e a fidelidade em contextos observacionais mais precisos. Embora essas simplificações sejam intencionais para preservar a acessibilidade e o caráter didático da ferramenta, elas restringem sua aplicação em cenários de pesquisa ou análises quantitativas mais avançadas.

Ciente dessas limitações, melhorias contínuas estão sendo planejadas. Entre elas, está o desenvolvimento de uma interface para que os usuários possam

¹ Tabela usada como referência: <https://lweb.cfa.harvard.edu/~pberlind/atlas/htmls/note.html>.

enviar sugestões e comentários diretamente no simulador, por meio de um botão ou campo de texto. Também está prevista a disponibilização da ferramenta em um site dedicado, eliminando a necessidade de download e facilitando seu uso direto em navegadores. Um tutorial detalhado está em elaboração, explicando cada funcionalidade e propondo atividades pedagógicas associadas, com o objetivo de potencializar o uso do simulador em ambientes de ensino-aprendizagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fenômeno do escurecimento do limbo estelar, embora possa parecer um detalhe técnico à primeira vista, revela-se de importância fundamental na astrofísica de exoplanetas. Longe de ser um mero efeito a ser corrigido, ele é uma manifestação direta da física das atmosferas estelares e sua correta modelagem tem consequências diretas e significativas na nossa capacidade de detectar, medir e, em última análise, caracterizar os exoplanetas que orbitam suas estrelas hospedeiras. A precisão com que determinamos o raio de um exoplaneta, um parâmetro chave para inferir sua densidade e composição, está intrinsecamente ligada à nossa compreensão e modelagem do perfil de brilho da sua estrela hospedeira.

A temática exoplanetas oferece uma plataforma pedagógica rica e motivadora para o ensino de múltiplos conceitos de Física e Astronomia no contexto escolar (MEIDEM, 2022; 2023). E juntamente com o LD, permite não apenas introduzir os alunos à busca por novos mundos, mas também ilustrar de forma concreta o método científico em ação, desde a observação e coleta de dados até a modelagem, a identificação de fontes de incerteza e vieses, e o esforço contínuo para refinar o entendimento do universo. O simulador proposto visa engajar os alunos, desenvolver seu pensamento crítico e conectar o conteúdo aprendido em sala de aula com a pesquisa científica contemporânea.

O uso de experimentos e simuladores didáticos representam um ganho significativo para a aprendizagem. MEIDEM et. al (2023) ressalta que durante seu estudo na fase de compreensão do problema envolvendo a temática trânsito de exoplanetas na construção de uma sequência didática, um deles aponta para a necessidade de que se utilize algum recurso visual, um experimento ou simulador durante as aulas dedicadas à fotometria de trânsito. Reforçando a importância do nosso simulador apresentado aqui, durante as aulas.

Por fim, esperamos que este simulador se torne uma ferramenta valiosa para o ensino de Física e Astronomia, auxiliando na compreensão do fenômeno do escurecimento do limbo estelar e dos trânsitos exoplanetários. Almejamos que sua aplicação em sala de aula produza resultados satisfatórios, promovendo um aprendizado mais interativo e significativo para os estudantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, E. S. et al. O uso de simuladores virtuais educacionais e as possibilidades do PhET para a aprendizagem de Física no ensino fundamental. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 12, n. 3, p. 1–25, 2021.

BAINES, Ellyn K. et al. Vintage NPOI: New and Updated Angular Diameters for 145 Stars. **The Astronomical Journal**, v. 169, n. 6, p. 293, 2025.

CARTER, J. A. et al. Analytic approximations for transit light curve observables and uncertainties. In: PONT, F.; SASSELOV, D.; HOLMAN, M. J. (ed.). **Transiting Planets**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. (IAU Symposium, v. 253), p. 392–393.

CLARET, A. A new non-linear limb-darkening law for LTE stellar atmosphere models. Calculations for $-5.0 \leq \log [M/H] \leq +1$, $2000 \text{ K} \leq T_{\text{eff}} \leq 50000 \text{ K}$ at several surface gravities. **Astronomy and Astrophysics**, v. 363, p. 1081–1190, 2000.

COULOMBE, L.-P.; ROY, P.-A.; BENNEKE, B. Biases in exoplanet transmission spectra introduced by limb-darkening parametrization. **The Astronomical Journal**, v. 168, n. 5, p. 227, 2024.

DE OLIVEIRA, J. M. et al. **Trânsitos de Exoplanetas: Atividade experimental para o ensino de astronomia**. Trabalho Final de Graduação. Instituto de Física e Química. Universidade Federal de Itajubá. 2018.

DINIZ, G. Z. et al. O escurecimento de limbo via modelagem de trânsitos e inferência bayesiana. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20220170, 2022.

ESPINOZA, N.; JORDÁN, A. Limb darkening and exoplanets: testing stellar model atmospheres and identifying biases in transit parameters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 450, n. 2, p. 1879–1899, 2015.

HAYEK, W. et al. Limb darkening laws for two exoplanet host stars derived from 3D stellar model atmospheres. **Astronomy and Astrophysics**, v. 539, A102, 2012.

KEERS, R. E. et al. Reliable transmission spectrum extraction with a three-parameter limb-darkening law. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 977, n. 1, p. L7, 2024.

MEIDEM, Í. et al. Construção de uma sequência de ensino e aprendizagem orientada por Design-Based Research sobre o tema exoplanetas. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, v. 1, n. 36, p. 118–145, 2023.

MEIDEM, Í. et al. Experimento sobre trânsito de exoplanetas para uso no ensino de Física e Astronomia na educação básica e superior. In: **SIMPÓSIO NACIONAL DE EDUCAÇÃO EM ASTRONOMIA – VI SNEA**, 6., 2022, Bauru. Anais... Bauru: SNEA, 2022. p. 1–8.

MULLER, H. M. **Limb-darkening measurements on exoplanet host stars and the Sun**. 2015. Dissertação (Mestrado em Física) – Universität Hamburg, Hamburg, 2015.

OLIVEIRA, L. C.; BARBOSA, L. A. Ensino de astronomia no ensino médio: uma proposta baseada na abordagem temática e no método científico. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 31, p. 141–162, 2021.

PARVIAINEN, H.; AIGRAIN, S. LDTk: Limb Darkening Toolkit. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 453, p. 3821–3826, 2015.

PELLENZ, D; TISOTT J.C. Atividades experimentais em Astronomia para a construção do conhecimento através de uma proposta interdisciplinar e contextualizada. **Scientia cum Industria**, v. 2, n. 2, p. 73-76, 2014.