

FOTOMETRIA VISUAL DA CEFEIDA ι CARINAE

Tasso Napoleão, Clayton Fernandes

Grupo Alfa Crucis

RESUMO. Apresentam-se os resultados do experimento prático de fotometria visual da variável Cefeida ι Carinae realizado por um grupo de alunos do curso de Técnicas de Observação (turma de 2017) ao longo de três meses. Usando binóculos simples e a partir da relação P-L (Período-Luminosidade) das Cefeidas, eles encontraram valores de 35,49 dias para o período, 552 parsecs para a distância e $168,5 R_{\odot}$ para o raio da estrela, resultados bastante compatíveis com os de pesquisas recentes com instrumental mais sofisticado.

Palavras-chave: Estrela variável. Cefeida. Fotometria visual. Relação Período-Luminosidade.

VISUAL PHOTOMETRY OF ι CARINAE

ABSTRACT. We present the results of a visual photometry campaign for the southern Cepheid variable ι Carinae, performed by a group of our students in 2017. Observing for three months with binoculars and using the Period-Luminosity (P-L) relation, they were able to measure the period (35,49 days) and calculate the star's distance (552 parsec) and radius ($168,5 R_{\odot}$). Those results are compatible with those obtained by professional researchers using sophisticated equipment.

Keywords: Variable Star. Cepheid. Visual photometry. Period-Luminosity relation.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo descreve uma série de procedimentos que possibilita, a partir de observações visuais simples de uma estrela variável da classe Cefeida e da aplicação da relação P-L (período-luminosidade) descoberta por Henrietta Leavitt, obter a distância real da estrela e, a partir daí, sua luminosidade e diversos outros de seus parâmetros físicos intrínsecos. Este experimento tem sido proposto anualmente por um dos autores (NAPOLEÃO, 2018, p. 364) como um dos projetos observacionais do curso de Técnicas de Observação (TO), ministrado desde 2005 através de parceria com o CASP e o IAG-USP. Esse curso é aberto a todos os interessados que estejam familiarizados com a Matemática e a Física do Ensino Médio e que possuam conhecimentos básicos de localização de objetos no céu, não havendo assim nenhum obstáculo a que o mesmo roteiro seja aplicado pelos leitores que satisfaçam esses requisitos. Em particular, os resultados descritos

no presente artigo se referem à variável Cefeida ι Carinae, e foram obtidos pelos alunos de TO da turma de 2017.¹

Para facilitar ao leitor interessado a realização deste experimento completo, indicamos abaixo seu roteiro em três passos consecutivos.

Passo 1 – Seleção da estrela: Tomamos como premissas: que convenha à maior parte dos observadores que a observação seja realizada às primeiras horas da noite; que a estrela-alvo não apresente dificuldade para sua localização; e que ela seja brilhante o suficiente para que possa ser observada mesmo das grandes cidades (com uso de binóculos simples). Além, obviamente, de que ela pertença à classe das variáveis Cefeidas. De acordo com a época do ano em que o

¹ Clayton Fernandes (monitor), Camila Oliveira, Denis Kulh, Fernando Parmegiani, João Urbano, Ligia Barnabé, Lucas Tulio, Marcelo Bastos, Mario Sergio Silva, Renata Treü, Ricardo Franco, Richard Neves.

experimento for realizado, sugerimos que a escolha recaia sobre uma entre cinco estrelas: Beta Doradus; ι Carinae; X Sagittarii; W Sagittarii; ou Eta Aquilae. Em particular para ι Carinae, recomendamos um período de observação de no mínimo três meses, com uma frequência de pelo menos uma estimativa a cada duas noites. A estrela pode ser localizada em Ascensão Reta 09h45m15s e Declinação -62°30'28" (J2000). Apresenta período de 35,551609 dias e amplitude de variação entre 3,28 e 4,18 mag. (dados segundo AAVSO).

Passo 2 – Observação e redução dos dados: As estimativas de magnitude devem ser realizadas segundo o método de Pickering (NAPOLEÃO, 2018, p. 298). As cartas celestes necessárias para a localização da estrela e para a seleção das estrelas de comparação podem ser configuradas diretamente pelo observador no website da AAVSO (ver Referências). Opcionalmente, pode ser também usada a carta existente em: <http://institutocopernico.org/vs/cartas/l_car.gif>.

Uma vez realizadas as estimativas e construída a curva de luz, os procedimentos de redução dos dados (tais como a construção do diagrama de fase e a determinação do período) podem ser feitos “manualmente” ou com a utilização do software VStar, também disponível no website da AAVSO. Caso o observador não esteja familiarizado com essas ferramentas de redução e análise de dados, sugerimos a leitura prévia das páginas 337 a 351 de Napoleão (2018).

Passo 3 – Cálculo da distância e de parâmetros físicos da estrela: No passo anterior, obtivemos os valores do período da estrela (P) e das suas magnitudes aparentes nos brilhos máximo e mínimo. Uma vez conhecidas essas últimas grandezas, teremos também de imediato a magnitude aparente média da estrela (m_V), que pode ser obtida graficamente ou por uma média aritmética simples.

Desde a formulação original de Henrietta Leavitt (1912), vários foram os aperfeiçoamentos introduzidos na relação Período-Lumi-

nosidade das Cefeidas, com base em uma série de calibrações empíricas propostas por numerosos astrônomos durante o século XX. Naturalmente, elas nos remetem a fórmulas com coeficientes levemente diferentes; os resultados finais, porém, são essencialmente equivalentes, dentro da margem de incerteza de cada calibração. Uma boa compilação das formulações mais atualizadas da relação P-L para as Cefeidas da Via Láctea pode ser vista em Benedict et al. (2007). Dentre elas, escolhemos para nosso uso a mais recente, proposta em 2006 por esses autores:

$$M_V = -2,43 (\log P - 1) - 4,05 \quad (\text{Eq. 1})$$

Nessa equação, P representa o período e M_V , a magnitude absoluta. Introduzindo o valor que medimos para P na fórmula acima, calcula-se facilmente o valor de M_V . Uma vez obtido esse valor, podemos levá-lo à equação do módulo de distância:

$$m_V - M_V = 5 \log D - 5 \quad (\text{Eq. 2})$$

Essa equação (2) expressa a relação entre as magnitudes aparente (m_V) e absoluta (M_V), e a distância D à qual se encontra a estrela. A distância D, que desejamos calcular, será necessariamente expressa em parsecs.

Uma aproximação ainda melhor poderá ser alcançada se levarmos em conta a extinção interestelar (A_V) na direção da variável. A extinção é causada pela absorção e espalhamento da luz da estrela pelas partículas de poeira e gás do meio interestelar existente entre ela e nós. Em geral, a extinção não é um dado fácil de ser obtido, mas, no caso das cinco Cefeidas recomendadas no Passo 1, felizmente podemos recorrer também a Benedict et al. (2007) para obter valores bastante precisos. Nessas condições a Eq. 2 se transforma na Eq. 3:

$$m_V - M_V = 5 \log D - 5 + A_V \quad (\text{Eq. 3})$$

Finalmente, uma vez calculada a distância da estrela com boa precisão, será possível agora

usar diversas equações astrofísicas disponíveis na literatura para determinar os valores de uma série de parâmetros físicos intrínsecos da estrela.

A luminosidade da estrela em relação ao Sol pode ser estimada a partir da sua magnitude absoluta (que já calculamos pela Eq. 1). Basta agora aplicar a Lei de Pogson:

$$M_{\odot} - M_V = 2,5 \log (L_V / L_{\odot}) \quad (\text{Eq. 4})$$

Nessa equação, (M_{\odot} e L_{\odot}) e (M_V e L_V) representam respectivamente a magnitude absoluta e a luminosidade do Sol e da estrela sob análise.

Podemos também estimar a massa M da estrela, se usarmos uma equação que exprima a relação entre massas e luminosidades para as variáveis Cefeidas. Essa equação está disponível na literatura (STOBIE, 1969):

$$\log (M / M_{\odot}) = 0,28 \log (L_V / L_{\odot}) - 0,35 \quad (\text{Eq. 5})$$

O raio da estrela pode ser também estimado, a partir de uma equação que exprima a relação entre os períodos e os raios das Cefeidas. Essa equação está também disponível na literatura (TURNER; BURKE, 2002):

$$\log (R_V / R_{\odot}) = 1,064 + 0,750 \log P \quad (\text{Eq. 6})$$

Finalmente, a temperatura efetiva da estrela pode ser estimada aplicando a conhecida equação de Stefan-Boltzmann:

$$L = 4 \pi R^2 \sigma T^4 \quad (\text{Eq. 7})$$

Nos itens 2 e 3 a seguir, esses procedimentos e equações serão aplicados, como um exemplo, aos dados observacionais (estimativas de magnitude) obtidos pelos alunos da turma de TO II – 2017 para ℓ Carinae nos meses de abril a julho daquele ano. Os procedimentos usados pelo grupo e os resultados brutos serão descritos em detalhes pelo monitor do projeto (Clayton Fernandes) exatamente da

forma como foram aplicados pelos alunos. No item 4, os resultados finais serão sumarizados e comparados com aqueles disponíveis na literatura astronômica profissional.

2. AQUISIÇÃO DOS DADOS

A aquisição dos dados aqui listados ocorreu entre 1º de abril e 5 de julho de 2017, com um total de 80 estimativas realizadas pelos 12 participantes mencionados na Introdução, em diferentes regiões da cidade de São Paulo.

Essas estimativas foram posteriormente inseridas em uma plataforma online colaborativa (Google Spreadsheet), onde os dados foram concatenados e posteriormente reduzidos, dando assim suporte para os cálculos e conclusões finais. Essa planilha foi alimentada pelos participantes com os seguintes dados:

1. Data da observação, convertida para Data Juliana.
2. Magnitude visual estimada.
3. Observações a respeito da estimativa realizada: condições meteorológicas, visibilidade do céu, poluição luminosa, altura do objeto no horário da estimativa, posição e iluminação lunar, estrelas de comparação, entre outros.

2.1. Equipamentos e materiais

Uma das principais propostas deste exercício era desenvolver nos participantes a familiaridade com a localização de objetos celestes, bem como sua acuidade visual e habilidade em realizar estimativas visuais de magnitude. Todas as medições foram realizadas com o mínimo recurso instrumental necessário (binóculos ou até mesmo a olho nu). A escolha de ℓ Carinae como objeto deste estudo favorece essa estratégia, uma vez que a amplitude de variação de sua magnitude visual (3,3 a 4,2) a torna plenamente identificável com binóculos

em céus limpos, mesmo em ambientes urbanos como São Paulo (local onde as observações ocorreram). Outro aspecto positivo da escolha dessa estrela é a sua posição no céu: situada na constelação de Carina (a Quilha do navio Argo), ela é visível no hemisfério sul em boa parte do ano, estando alta sobre o horizonte durante os meses de outono nas primeiras horas da noite. Essa é a época do ano na qual os cursos de Técnicas de Observação são ministrados e também em que as condições meteorológicas normalmente são favoráveis a observações astronômicas.

Abaixo, como um exemplo, os dados do posicionamento da estrela (J2000) e horários em que ela nasceu, cruzou o meridiano e se pôs no horizonte, nas datas limites das estimativas:

Ascensão Reta 09h45m15s
Declinação -62°30'28"

1º de abril de 2017

Nascimento:	11h13m
Trânsito no meridiano:	21h10m
Ocaso (+1 dia):	7h11m

5 de julho de 2017

Nascimento:	04h59m
Trânsito no meridiano:	14h56m
Ocaso (+1 dia):	00h58m



Figura 1. Localização de I Car no céu (software Stellarium).

Para auxiliar o processo de estimativa de magnitude da estrela, foram também utilizados softwares de apoio, como Stellarium e Cartes du Ciel, a partir dos quais foram impressas

previamente cartas celestes que serviram de guia para a localização precisa do objeto e das estrelas de comparação utilizadas.

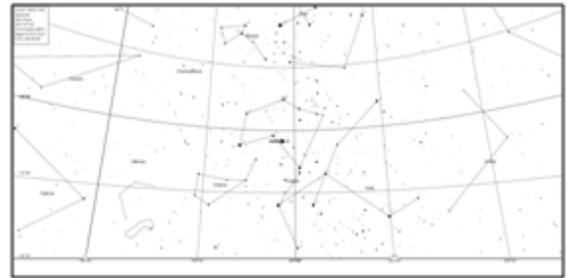


Figura 2. Mapa auxiliar para localização de I Car (software Cartes du Ciel).

2.2. Procedimentos e métodos

O primeiro ponto sensível para uma correta estimativa é escolher o local de observação, que deve estar desobstruído, ter boa visibilidade do céu na região a se observar e, se possível, pouca poluição luminosa. Cada participante pôde definir livremente o local de observação que mais lhe convinha, desde que observadas essas indicações.

Como já denotado, o método utilizado para estimar a magnitude de I Car foi o método de Pickering, no qual se compara a estrela em questão com pelo menos outras duas próximas a ela, de magnitudes já conhecidas, sendo uma mais brilhante e outra mais apagada que a variável. A diferença de magnitude entre essas duas estrelas de referência é projetada como uma escala decimal onde a magnitude da variável naquele instante será interpolada. A fração decimal que resulta dessa interpolação deve ser multiplicada pela diferença de magnitudes das estrelas de comparação, e ao resultado soma-se o valor da referência mais baixa, obtendo-se assim a magnitude da variável.

Após aplicar este método, deve-se anotar a magnitude estimada, a data e horário locais (que serão convertidos posteriormente em Data Juliana), bem como eventuais comentários a

respeito das condições da estimativa que possam exercer alguma influência sobre ela.

2.3. Resultados obtidos

Ao longo de 95 dias foram realizadas 80 estimativas pelos 12 participantes, com um intervalo médio de aproximadamente um dia entre duas observações². O desvio padrão dos valores de magnitude foi de 0,24.

O passo seguinte era elaborar a curva de luz da estrela (um gráfico que mostre a variação da magnitude no decorrer do tempo). O problema agora era como aproveitar ao máximo as estimativas esparsas, de modo que fosse possível identificar claramente a variabilidade. Um recurso para tanto era a construção do diagrama de fase da estrela. Vejamos o que significa isso.

Nas variáveis cujos períodos são muito regulares (caso das Cefeidas) é possível aplicar aos dados brutos uma técnica conhecida como “fasagem” ou “normalização do período”. O produto final dessa redução (um gráfico que mostra as magnitudes em função da *fase do ciclo da estrela*, e não mais em função da data de cada observação) é chamado “diagrama de fase”. O conceito de “fase” está associado a um ciclo completo da estrela: a fase é definida como um número qualquer entre 0,00 e 1,00, sendo o primeiro valor correspondente *ao início* de cada ciclo e o último relativo *ao fim* desse ciclo. Dessa forma, no início do ciclo, a variável está na fase 0,00 e a partir daí assume valores progressivamente crescentes, até atingir a fase 1,00 exatamente no fim do ciclo. Esse ponto será a fase 0,00 para o ciclo seguinte... e assim sucessivamente.

Com os dados brutos obtidos nas estimativas, podemos “fasear” as observações, ou seja, organizá-las de acordo com as fases no

momento de cada estimativa. Obtém-se assim o “diagrama de fase”, que consolida e condensa no espaço de um único ciclo o comportamento dessa variação de magnitude ao longo de diversos períodos. Isso permite que tenhamos um melhor aproveitamento dos dados, uma vez que na duração de um único período seria pouco provável obtermos medições suficientes para traçar com precisão a variabilidade da estrela.

O cálculo da fase correspondente a cada observação é feito a partir da equação das efemérides da estrela:

$$DJ(\text{observação}) = E + nP \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que o termo “E” (“Época”) é uma data (expressa em Data Juliana) que representa o início (ou o “instante zero”) para a contagem dos ciclos para a efeméride considerada; o termo “P” é o período (ou duração do ciclo) da estrela, em dias; e o termo “n” indica o número de ciclos que se passaram desde a Época até o momento em que a observação foi feita.

No caso de ι Carinae, uma efeméride recente pode ser obtida no website da AAVSO:

Época: 04 Set 1989 (HJD 2447774.31)

Período: 35,551609 dias

Partindo da Data Juliana de cada observação, subtrai-se a Época e divide-se o resultado pelo período. A parte inteira do resultado dessa divisão indica o número de ciclos que se passaram desde a Época; e a parte fracionária é justamente a *fase* em que aquela observação se deu.

No capítulo seguinte detalharemos o processo de redução desses dados para obter o período e as características físicas de ι Carinae.

3. REDUÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Em virtude de esta ser, para quase todos os participantes, a primeira experiência prática de

² A base de dados original com os valores coletados e os gráficos de análise podem ser obtidos a partir do link “Gráficos, tabelas e figuras, clique aqui” (logo abaixo do link usado para baixar este pdf).

estimativa de magnitudes, era comum e natural que houvesse uma dispersão considerável (+/- 0,2 mags ou mais) entre dados de diferentes observadores na mesma data. Era necessário assim filtrar os dados brutos originais, para desconsiderar aqueles com dispersão excessiva.

Das 80 observações iniciais, 59 foram consideradas (73,75%), compondo um diagrama de fase preliminar e simplificado (figura 3), no qual usamos o período AAVSO para a fasagem.

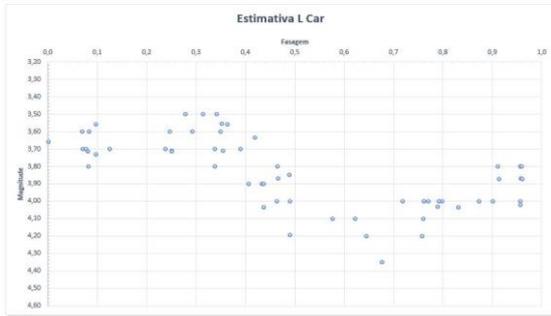


Figura 3. Diagrama de fase (simplificado).

3.1. Determinação do período

Para a determinação do período de variabilidade obtido com a curva de luz foi utilizado o programa VStar, disponível para download no site da AAVSO.

Os 59 dados já depurados anteriormente são carregados nesse programa, que abre automaticamente a curva de luz (não fasada) da estrela. A partir dela pode-se obter o período utilizando uma técnica de análise de períodos denominada “DC DFT”, que consta no menu “Análise” do VStar. Esse algoritmo calcula o período de maior probabilidade baseado nos dados carregados. O resultado (periodograma) é mostrado na Figura 4, na qual a probabilidade máxima (pico mais alto no gráfico) corresponde à frequência de 0,028177. Como o período é o inverso da frequência, seu valor é de 35,49 dias.

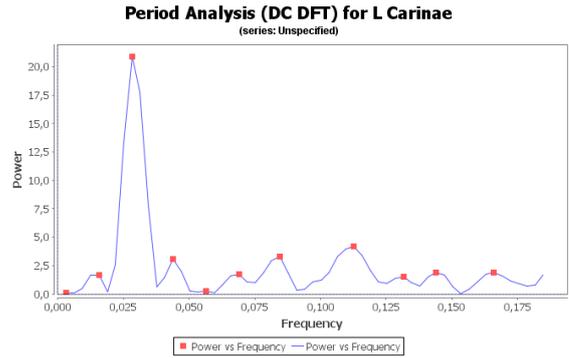


Figura 4. Periodograma de ℓ Car.

Com esse valor do período, podemos então elaborar no VStar o diagrama de fase final, a partir dos dados coletados pelo grupo (Figura 5). Foi considerado agora o período de 35,49 dias, obtido por meio do algoritmo DC DFT. Dele também se pode tirar graficamente o valor da magnitude média no ciclo (que foi de 3,85).

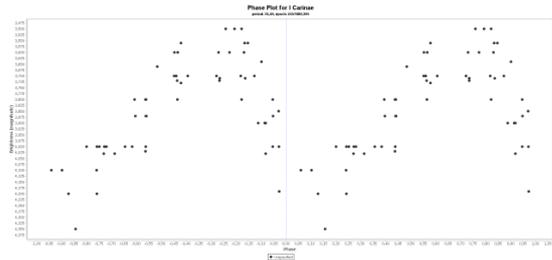


Figura 5. Diagrama de fase final para ℓ Car (período de 35,49 dias).

3.2. Determinação da distância

Uma vez determinado o período (35,49 dias), o cálculo da magnitude absoluta de ℓ Carinae é feito pela relação Período-Luminosidade (Eq. 1 da Introdução):

$$M_V = -2,43 (\log P - 1) - 4,05$$

$$M_V = -2,43 (\log 35,49 - 1) - 4,05$$

$$M_V = -5,38$$

Para o cálculo da distância, usaremos agora a equação do módulo de distância, já com a extinção interestelar incorporada (Eq. 3 da Introdução).

$$m_V - M_V = 5 \log D - 5 + A_V$$

O valor da extinção interestelar (0,52) foi obtido de Benedict et al. (2007). O valor de 3,85 para m_V , como visto anteriormente, foi o encontrado graficamente como magnitude média no ciclo. Substituindo:

$$3,85 + 5,38 = 5 \log D - 5 + 0,52$$

$$\mathbf{D = 552 \text{ pc}}$$

3.3. Cálculo dos parâmetros físicos da estrela

A luminosidade da estrela em relação ao Sol pode ser estimada a partir de sua magnitude absoluta (já calculada) e pela Lei de Pogson (Eq. 4 da Introdução):

$$M_{\odot} - M_V = 2,5 \log (L_V / L_{\odot})$$

$$4,83 + 5,38 = 2,5 \log (L_V / L_{\odot})$$

$$\log (L_V / L_{\odot}) = 4,084$$

$$\mathbf{L_V = 12 \text{ 133 } L_{\odot}}$$

A massa M da estrela (em massas solares) pode ser estimada pela equação vista em Stobie, 1969 (Eq. 5 da Introdução):

$$\log (M / M_{\odot}) = 0,28 \log (L_V / L_{\odot}) - 0,35$$

$$\log (M / M_{\odot}) = 0,28 \times 4,08 - 0,35$$

$$\mathbf{M = 6,2 M_{\odot}}$$

O raio da estrela (em unidades de raio solar) é deduzido a partir da equação vista em Turner; Burke, 2002 (Eq. 6 da Introdução):

$$\log (R_V / R_{\odot}) = 1,064 + 0,750 \log P$$

$$\log (R_V / R_{\odot}) = 1,064 + 0,750 \log 35,49$$

$$\mathbf{R_V = 168,5 R_{\odot}}$$

Finalmente, a temperatura efetiva da estrela pode ser calculada através da equação de Stefan-Boltzmann (Eq. 7 da Introdução):

$$L = 4 \pi R^2 \sigma T^4$$

Substituindo os valores de luminosidades e raios e lembrando que $\sigma = 5,67 \times 10^{-5}$ (em unidades CGS), encontramos para o valor de T :

$$\mathbf{T = 4677 \text{ K}}$$

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Como se comparam os resultados acima com aqueles obtidos com equipamentos mais sofisticados? Davis et al. (2009) relatam o uso de interferometria para obter a distância de ℓ Carinae, chegando-se a um valor de (525 ± 26) pc e a um raio de $(169 \pm 8) R_{\odot}$ para a estrela. Os mesmos autores compilaram todas as medições recentes da distância e do raio de ℓ Carinae, feitas por diversos processos diferentes. Os resultados para distância, dependendo do método, variam entre (485 ± 64) parsecs e (566 ± 26) parsecs. Já quanto ao raio, os valores vão desde $(168 \pm 7) R_{\odot}$ até $(176 \pm 9) R_{\odot}$. Tudo isso parece bastante consistente com os resultados de 552 pc para a distância e de $168,5 R_{\odot}$ para o raio, que foram obtidos pelos alunos com simples binóculos. Podemos concluir que o uso prático da relação P-L (mesmo com instrumental modesto) pode produzir resultados bastante satisfatórios (desde que as observações sejam feitas de modo criterioso e com a técnica correta).

5. REFERÊNCIAS

AAVSO (American Association of Variable Stars Observers). Website. Disponível em: <<https://www.aavso.org/>>.

BENEDICT, G.F. et al. Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor Parallaxes of Galactic Cepheid Variable Stars: Period-Luminosity Relations. *Astronomical Journal*, v. 133:4, p. 1810-27, 2007. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2007AJ....133.1810B>>.

DAVIS, J. et al. Observations of the Pulsation of the Cepheid ϵ Car with the Sydney University Stellar Interferometer. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 394:3, p. 1627, 2009. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2009MNRAS.394.1620D>>.

LEAVITT, H.S.; PICKERING, E.C. Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, v. 173, p. 1-3, 1912. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L>>.

NAPOLEÃO, T. Astrofísica Estelar para o Ensino Médio: Uma abordagem empírica baseada na observação visual das estrelas variáveis. Dissertação de mestrado (M.Sc.), IAG-USP, 2018. Disponível em: <http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/dtasso_a_j_napoleao_original.pdf>.

SAMUS, N.N. et al. General Catalogue of Variable Stars (GCVS). Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences and Sternberg State Astronomical Institute of the Moscow State University. Versão 5.1, 2017. Disponível em: <<http://www.sai.msu.su/gcvs/cgi-bin/search.htm>>.

STOBIE, R.S. Cepheid Pulsation-III: Models Fitted to a New Mass-Luminosity Relation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 144, p. 511, 1969. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1969MNRAS.144..511S>>.

TURNER, D.G.; BURKE, J.F. The Distance Scale for Classical Cepheid Variables. *Astronomical Journal*, v. 124, p. 2931-42, 2002. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2002AJ....124.2931T>>.