

Guia de estudos “Astrofísica Estelar para o Ensino Médio”

Capítulo 11 – Redução e análise dos dados

Uma vez obtidos os dados experimentais (lembrando que, em nosso caso, o termo “experimento” significa a observação visual das estrelas variáveis e a medida de sua magnitude ao longo do tempo), a etapa seguinte será a sua redução, para facilitar a análise e a interpretação dos resultados obtidos. Em Astronomia Observacional, chamamos de “redução dos dados” aos procedimentos usados para converter um conjunto de dados experimentais brutos em resultados expressos, em unidades físicas, sob uma forma ordenada e simplificada.

Um exemplo simples de redução é a própria curva de luz, que, como vimos, equivale a tabular a variação da magnitude em função do tempo. Mas a mera inspeção visual da curva de luz geralmente não é suficiente para comprovar ou não a veracidade de certas hipóteses, ou mesmo para elaborar uma teoria que explique o comportamento da estrela. Por exemplo, quando desejamos confirmar com segurança se existe ou não periodicidade nas variações de brilho da estrela, ou quando queremos determinar com precisão seu período e sua amplitude. A redução e a análise dos dados podem envolver processos estatísticos relativamente complexos, cujo detalhamento foge ao escopo deste trabalho; assim, iremos nos limitar a descrever alguns exemplos de reduções ao alcance do Ensino Médio, recorrendo a softwares livres quando necessário (porém sem entrar em detalhes sobre o seu embasamento matemático).

11.1 Diagrama de fase (“fasagem” da curva de luz)

Dependendo das características da estrela em estudo, a construção de um diagrama de fase poderá ser de grande valia para verificar sua periodicidade e para prover uma estimativa razoavelmente acurada do seu período. Chamamos de “fase” a uma fração decimal que indica em que estágio do ciclo de variação a estrela se encontra¹, e de “diagrama de fase” a um gráfico de magnitudes em função da fase. O diagrama de fase é melhor delineado, e geralmente também mais útil, para estrelas de periodicidade regular (aquelas cujos períodos se repetem precisamente – ou quase – de ciclo para ciclo). Nesse caso estão, por exemplo, a maior parte das Cefeidas e das binárias eclipsantes. Já para estrelas de comportamento totalmente aperiódico (como as variáveis vermelhas irregulares das classes LA e LB ou as estrelas R Coronae Borealis, por exemplo) dificilmente o diagrama de fase trará muitas informações úteis (exceto, é claro, a comprovação do caráter acíclico da variação de brilho).

¹ O valor da fase pode assim variar entre 0,0 e 1,0 (ou, caso se use a notação percentual, entre zero e 100%) durante um ciclo completo de variação.

Antes de exemplificar a construção de um diagrama de fase, convém definirmos alguns conceitos importantes:

11.1.1 Efemérides de uma estrela variável

Em Astronomia, o termo “efeméride” costuma ser usado para designar uma listagem dos instantes ou das posições em que uma certa característica de um objeto ou evento celeste ocorre ao longo do tempo. Por exemplo: as posições dos planetas (ascensão reta, declinação) para cada dia do ano; o horário do nascer e do pôr do Sol em um local qualquer ao longo do ano; e assim por diante. Para o caso específico das estrelas variáveis, as efemérides são normalmente dadas por meio de equações simples, através das quais podemos calcular a fase do ciclo em que elas se encontram em qualquer instante; essas equações são sempre empíricas, baseadas em observações anteriores da estrela. De certa forma, a efeméride de uma variável é também uma espécie de previsão: *se ela conseguirá ou não prever com precisão as fases do ciclo, isso dependerá da regularidade do período da estrela e da quantidade e qualidade dos dados usados para construir a efeméride*. Quanto mais regular o período e quanto mais numerosos e precisos os dados, melhor será a previsão. *Importante: as efemérides podem (e devem) ser atualizadas à medida que novas observações de boa qualidade se acumulam*.

Os termos encontrados nas equações empíricas que constituem as efemérides são abreviados e descritos da seguinte forma:

- Período (**P**): indica a duração de um ciclo completo da variável (geralmente expresso em dias, e em alguns casos em horas).
- Data juliana (**DJ**): indica o instante correspondente a uma fase qualquer do ciclo ou a uma observação qualquer da estrela. Deve ser indicada em DJ.
- Época (**E ou DJE**): é uma data (sempre expressa em DJ), que marca o início da contagem dos ciclos. A Época pode ser imaginada como o “instante zero” da efeméride: ela corresponde à data juliana exata de um mínimo (ou máximo) que tenha sido registrado com precisão por um observador e confirmado por fontes confiáveis. Por convenção (KUKARKIN et al., 1968), para as binárias eclipsantes e para as variáveis tipo RV Tauri costuma-se escolher para as épocas o instante do mínimo primário (mais profundo) da estrela. Para as demais classes de variáveis, escolhe-se o instante do máximo brilho do ciclo².
- O número total de ciclos ocorridos desde a Época é indicado por **n**.

Consideremos, como exemplo, nossa já conhecida binária eclipsante Beta Lyrae. Consultando o GCVS, verificamos que a efeméride original dessa estrela indicava para

² As Épocas (e os períodos) atualizadas para dezenas de milhares de estrelas variáveis podem ser obtidas através da consulta ao banco de dados VSX da AAVSO, disponível em: <<https://www.aavso.org/vsx/>>, ou ao GCVS – General Catalogue of Variable Stars –, disponível em: <<http://www.sai.msu.su/gcvs/gcvs/>>.

sua Época o valor DJE = 2408247,950 e para seu período P = 12,913834 dias. Como curiosidade, note que essa Época corresponde ao mínimo primário observado no dia 16 de junho de 1881! Ora, se quisermos prever a data juliana do mínimo primário (ou eclipse) imediatamente seguinte a esse, basta um cálculo simples:

$$DJ (\text{eclipse } 1) = DJE + 1 \times P$$

Analogamente, se quisermos prever a data do eclipse do ciclo seguinte, faremos:

$$DJ (\text{eclipse } 2) = DJE + 2 \times P$$

O eclipse seguinte seria previsto por:

$$DJ (\text{eclipse } 3) = DJE + 3 \times P$$

...e assim por diante. De forma genérica, se quisermos prever qualquer eclipse de Beta Lyrae, basta utilizar a equação:

$$DJ (\text{eclipses}) = DJE + nP \quad (11.1)$$

...onde o termo **n** representa o número total de ciclos (ou períodos) ocorridos desde a Época inicial medida.

Para o caso de Beta Lyrae, portanto, teremos para os mínimos (eclipses) primários:

$$DJ (\text{eclipses}) = 2408247,950 + 12,913834 n$$

Essa é a *efeméride original de Beta Lyrae*, baseada nas medições efetuadas em 1881.

Caberia aqui uma pergunta: será que essa efeméride *ainda é perfeitamente válida* para representar o comportamento da estrela, conseguindo prever *com exatidão* os seus eclipses? A resposta a essa questão depende das características do sistema binário que compõe Beta Lyrae: se o seu período orbital tiver permanecido *perfeitamente regular* desde 1881, a resposta é “sim”. Porém, se algum fator (como, por exemplo, transferência de matéria entre as componentes do sistema) tiver provocado mudanças no período orbital desde então, aquela efeméride não será mais absolutamente precisa e deverá ser atualizada. Em itens posteriores veremos em detalhes o que está acontecendo especificamente no caso de Beta Lyrae, como um bom exemplo daquilo que é possível detectar e analisar com o uso das efemérides.

11.1.2 Data juliana heliocêntrica

Embora dificilmente seja necessário o uso de datas julianas heliocêntricas (HJD) nas observações visuais propostas dentro do escopo deste trabalho, é conveniente mencionar sua existência aqui, a título de informação adicional.

Em certos trabalhos de alta precisão, poderá ser necessário corrigir a data juliana por um fator que considera o fato de que, a cada dia, nossa Terra está em diferentes posições em sua órbita em torno do Sol. Devido a esse fato, o tempo para que a luz proveniente da estrela chegue até a Terra será levemente maior ou menor que o calculado pela data juliana convencional; afinal, embora a velocidade da luz seja extremamente alta, ela não é infinita! A solução encontrada para contornar esse pequeno desvio foi recalcular a data juliana, indicando-a como se estivéssemos observando a estrela colocados não na Terra, mas *no centro do Sol*. Indica-se normalmente essa DJ corrigida como HJD (data juliana heliocêntrica).

Sabemos que o semi-eixo maior (ou “raio”) da órbita terrestre equivale a apenas 8,3 minutos-luz, mas, em cálculos de grande precisão, mesmo essa pequena diferença pode ser importante. Há, no entanto, mais complicadores: como a órbita da Terra não é circular mas sim elíptica, a distância *real* entre a Terra e o Sol muda dia a dia, hora a hora, minuto a minuto. Por essa razão, o cálculo preciso da HDJ é bastante complexo, tem de levar em consideração a posição (ascensão reta e declinação) da estrela em estudo e portanto necessita ser feito por computadores para cada momento.

Felizmente, no entanto, com a internet, não precisaremos nos preocupar com esses cálculos: podemos obter a HJD online, diretamente a partir da data-calendário convencional. Uma alternativa muito conveniente para tanto está disponível em: <<http://www.physics.sfasu.edu/astro/javascript/hjd.html>>. O procedimento é simples: a data e hora precisas em que a observação foi feita devem ser convertidas para Tempo Universal e digitadas (juntamente como a ascensão reta e declinação da estrela que está sendo medida) nos campos correspondentes dessa página. Basta então clicar no botão “Calculate” para obter a informação do HJD exato, assim como a da DJ convencional respectiva e da distância precisa entre a Terra e o centro do Sol naquele instante.

Alternativamente, na mesma página é possível baixar uma planilha em MS Excel que efetua o mesmo cálculo. O procedimento é semelhante, e mais informações estão disponíveis em BRUTON (2017).

11.1.3 Construção “manual” de um diagrama de fase

Tipicamente, as observações de uma estrela variável serão feitas por muitas noites, e em vários casos deseja-se combinar todas as observações em uma única curva de luz completa. A técnica de redução para construir essa curva é chamada de “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”. Lembramos que 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. Por convenção, para quase todas as variáveis considera-se como ponto inicial do ciclo (fase zero) o instante do seu *máximo de brilho*. A exceção são as binárias eclipsantes, em que se considera o *mínimo primário* como fase zero.

Para efetuar esta redução, vamos partir da equação das efemérides já vista no item anterior. Lembramos que agora o termo DJ não está representando somente a data dos mínimos ou máximos da estrela, mas sim a data de *qualquer observação* (ou de *qualquer fase do ciclo*) da estrela. Em consequência, o termo **n** não será mais um número inteiro que representa o número de ciclos completos desde a Época, mas sim um número decimal, em que a *parte inteira* indica o número de ciclos completos desde a Época e a *parte decimal* indica a fase correspondente à data da observação.

O cálculo de n pode ser feito a partir da equação **(11.1)**:

$$DJ(\text{observação}) = DJE + nP$$

$$n = \frac{DJ(\text{observação}) - DJE}{P} \quad \text{(11.2)}$$

Como exemplo de aplicação, consideremos novamente Beta Lyrae, e vamos assumir que a sua efeméride original ainda continue válida. Imaginemos que a estrela tenha sido observada em São Paulo no dia 30 de agosto de 2017, às 20:00 no horário local (portanto 23:00 em Tempo Universal). Qual é a fase do seu ciclo nesse instante?

De início, convertemos a data-calendário para data juliana, encontrando a DJ do momento da observação: DJ = 2457996,458. Como estamos usando a efeméride original de Beta Lyrae, temos que DJE = 2408247,950 e P = 12,913834. Substituindo esses valores na equação **(11.2)**, temos:

$$n = \frac{2457996,458 - 2408247,950}{12,913834}$$

Resulta que n = 3852,34. Esse valor é interpretado da seguinte forma:

- A parte decimal indica que, no momento exato da observação, a fase da estrela era de 0,34 (ou seja, 34% do ciclo).
- A parte inteira indica que, nesse mesmo instante, já se haviam passado 3582 ciclos completos desde a Época da efeméride usada (dia 16 de junho de 1881).

Dessa forma, se observarmos Beta Lyrae durante muitas noites (da maneira indicada no item 10.7.2 do Capítulo 10), será possível construir seu diagrama de fase, que terá um aspecto similar ao da Figura 11.1. Note que, neste caso, *não é necessário que as*

noites de observação sejam consecutivas: a fasagem elimina o inconveniente muito frequente de o céu se mostrar nublado durante várias noites seguidas, prejudicando a construção de uma curva de luz comum.

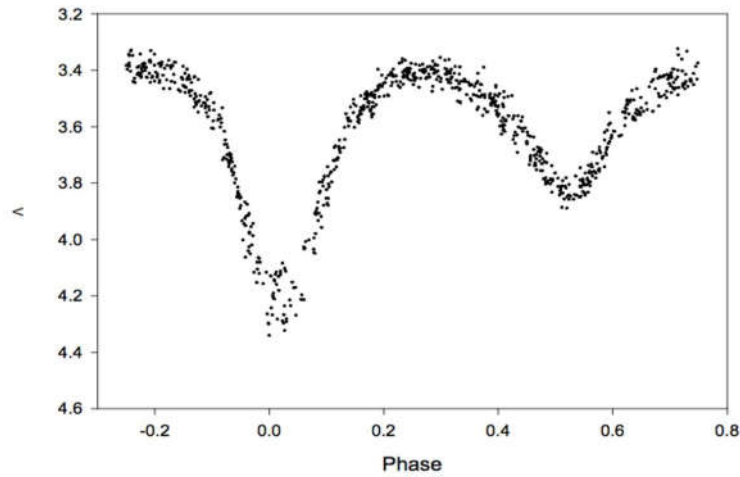


Figura 11.1 – Diagrama de fase para Beta Lyrae. (Crédito: AAVSO.)

Vale ressaltar mais uma vez, entretanto, que um bom diagrama de fase pode ser obtido somente para as estrelas cujo período seja ao menos razoavelmente regular (caso das Cefeidas em geral e das binárias eclipsantes). Mesmo para as Miras e assemelhadas, ele ainda produz resultados aceitáveis; para variáveis irregulares e aperiódicas, no entanto, esse tipo de redução não ajudará muito.

11.1.4 Construção de um diagrama de fase usando o software VSTAR

O processo “manual” de fasagem que acabamos de descrever, evidentemente, será muito facilitado pelo uso de um software comum tipo planilha. Mesmo assim, no entanto, a estimativa de alguns parâmetros de interesse, como amplitude e período de variação, ainda depende da inspeção visual da curva de luz e do diagrama de fase, que são processos imprecisos. Bem melhor seria utilizar uma ferramenta computacional específica para visualizar e analisar os dados das observações de estrelas variáveis, utilizando algoritmos baseados nas técnicas matemáticas e estatísticas existentes para tratamento e análise de séries temporais de dados. Recentemente (BENN, 2012), a AAVSO criou (e passou a oferecer gratuitamente em seu website) um software com essa finalidade. Denominado VSTAR, o programa opera na plataforma JAVA e nos ambientes Windows, macOS e Linux³. Por ter sido desenvolvido principalmente para uso de astrônomos amadores e dos programas educativos da própria AAVSO, ele é bastante simples de operar, tem uma interface gráfica objetiva e atraente, e não requer que o usuário possua conhecimentos prévios de estatística. O VSTAR permite carregar tanto observações do banco de dados VSX da AAVSO como também as

³ O VSTAR está disponível em: <<https://www.aavso.org/vstar>>. Acesso em: 16 de agosto de 2017.

estimativas feitas pelo próprio usuário (em diversos formatos). Além de construir as curvas de luz e os diagramas de fase e colocá-los também em forma tabular, o programa permite ainda determinar os períodos das variáveis estudadas e analisar suas eventuais mudanças temporais. Em virtude de todos esses recursos (e mais alguns não descritos aqui), o VSTAR é vivamente recomendado a todos os que se interessarem pela análise de dados de variáveis; faremos uso dele intensivamente nos tópicos seguintes. Como já mencionado no início deste capítulo, o detalhamento dos métodos matemáticos e estatísticos usados para análise temporal de dados de estrelas variáveis (que são usados pelo VSTAR) está fora do escopo deste trabalho. Para aqueles eventualmente interessados em se aprofundar nesse assunto, recomendamos a leitura de TEMPLETON, 2004.

Consideremos um primeiro exemplo de aplicação do VSTAR: a Figura 11.2 mostra a curva de luz da variável Cefeida Eta Aquilae, segundo as estimativas visuais dos observadores da AAVSO entre DJ 2457580 e DJ 2457620 (ou seja, 40 dias de observações).

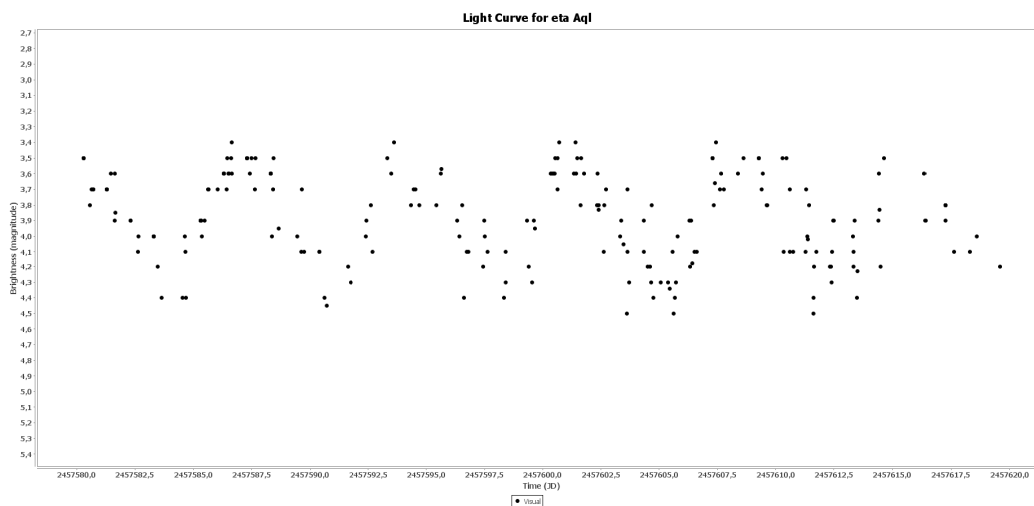


Figura 11.2 – Curva de luz de Eta Aql entre DJ 2457580 e DJ 2457620 pelo VSTAR. (Crédito: AAVSO.)

É possível perceber (apesar da baixa resolução da reprodução acima) que a estrela percorreu pouco mais de 5 ciclos nesses 40 dias (ou seja, seu período deve estar entre 7 e 8 dias). Poderíamos até medir esse período manualmente, como no caso do item anterior; mas o VSTAR nos oferece uma opção muito melhor e mais rápida: no menu “Analysis”, clicamos em “Phase Plot” e o programa construirá o diagrama de fase, com um período sugerido pelo VSTAR. O resultado é visto na Figura 11.3.

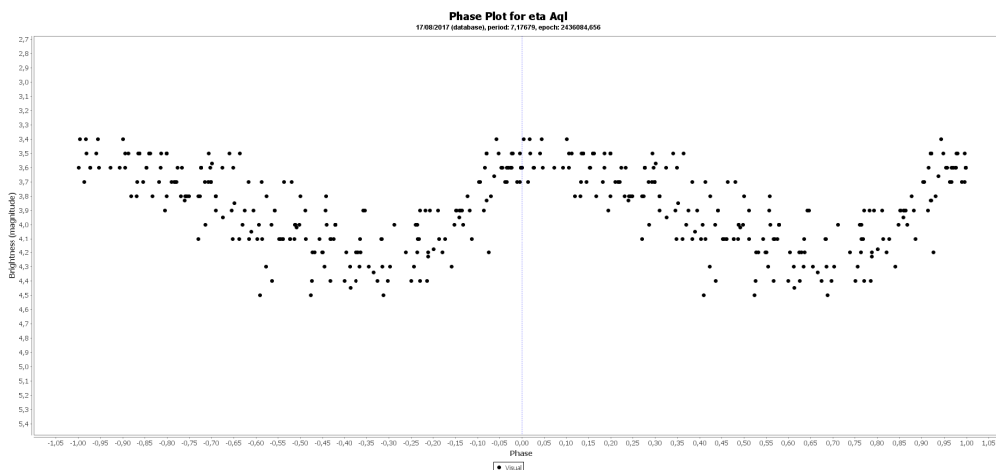


Figura 11.3 – Diagrama de fase de Eta Aql pelo VSTAR (estimativas visuais). (Crédito: AAVSO.)

A distribuição simétrica dos pontos na Figura 11.3 indica a regularidade do ciclo da estrela. Na linha abaixo do título, o VSTAR informa o período e a Época que o programa usou para fazer a fasagem (pouco visíveis na reprodução acima), que são respectivamente 7,17679 dias e 2.436.084,656. Em outras palavras, já temos também a efeméride da estrela. Para facilitar a visualização, o VSTAR mostra na tela, por *default*, o diagrama de fase de modo duplicado: fase entre 0,00 e 1,00 (quadro à direita na Fig. 11.3) e entre -1,00 e 0,00 (à esquerda), fato que não afeta o resultado.

Note-se ainda que tanto a Figura 11.2 como a Figura 11.3 são baseadas em *observações visuais apenas*, o que implica em certa dispersão entre as estimativas dos observadores (ver o item 10.3.2 do Capítulo 10). No caso de observações feitas com instrumentos (câmeras CCD), a precisão é maior (0,02 magnitude) e a dispersão, bem menor. No exemplo da Figura 11.4 vemos o mesmo diagrama de fase da Figura 11.3, mas baseado em observações com CCD:

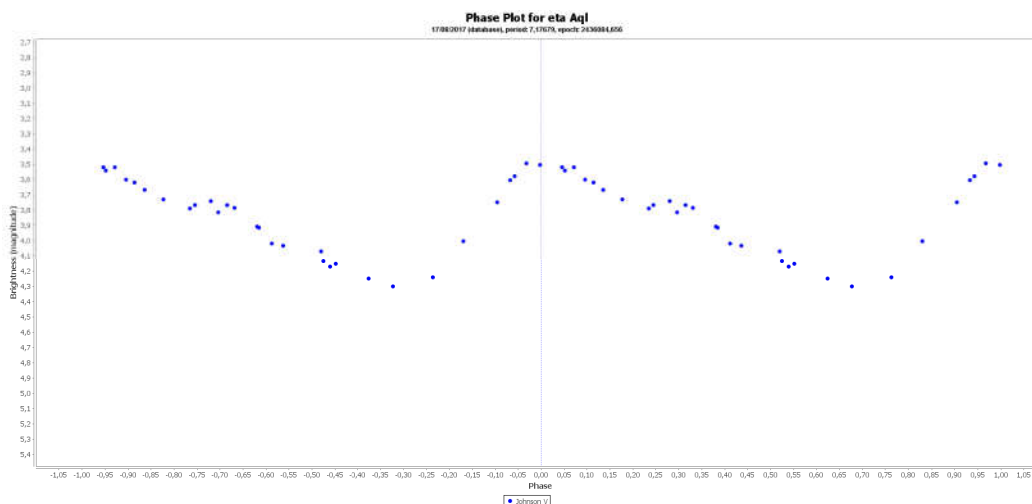


Figura 11.4 – Diagrama de fase de Eta Aql pelo VSTAR (estimativas com CCD). (Crédito: AAVSO.)

A amplitude de variação de Eta Aql (3,5 a 4,3) é também melhor delineada na Fig. 11.4. Em todos os exemplos anteriores, foi usada para a faseagem da curva de luz a sugestão de período dada pelo VSTAR, que provém do banco de dados VSX da AAVSO. O que aconteceria se não tivéssemos esse valor à mão? O exemplo seguinte demonstra esse caso. A Figura 11.5 apresenta a curva de luz da variável KZ Hydrae, obtida pelo autor com o uso de camera CCD a partir de 22:06 (Tempo Universal) da noite de 27 de maio de 2006. KZ Hydrae é uma variável da classe das Cefeidas anãs, com período ultracurto.

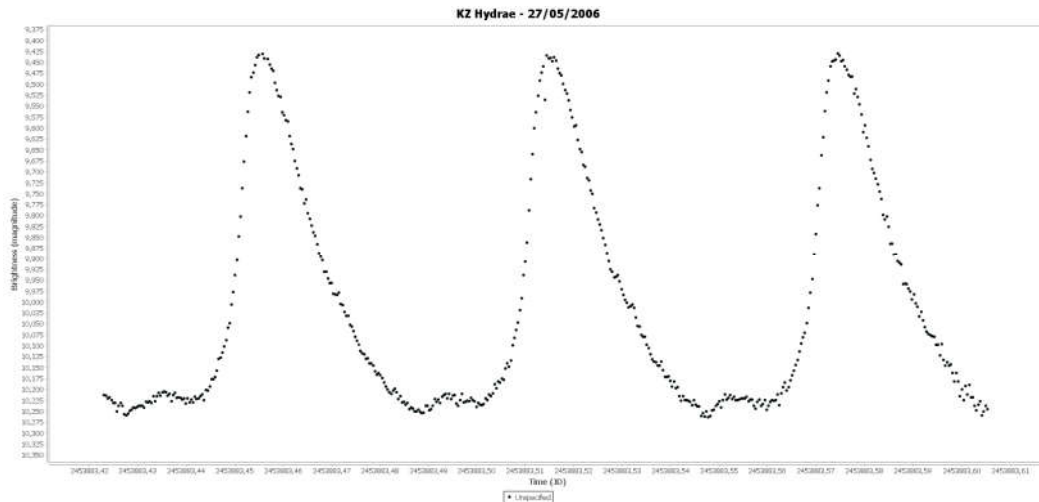


Figura 11.5 – Curva de luz de KZ Hya na noite de 27/05/2006 (CCD). (Crédito do autor.)

Uma inspeção preliminar da curva de luz feita com o uso de um software tipo planilha revelou que o período deve estar em uma faixa entre 1,41 h e 1,44 h (ou, em frações de dia, entre 0,0587 d e 0,0600 d). Com o auxílio do VSTAR, essa estimativa pode ser refinada. De início, testamos esses dois extremos, construindo o diagrama de fase com base em cada um (menu Analysis, Phase Plot e digita-se o valor do período estimado).

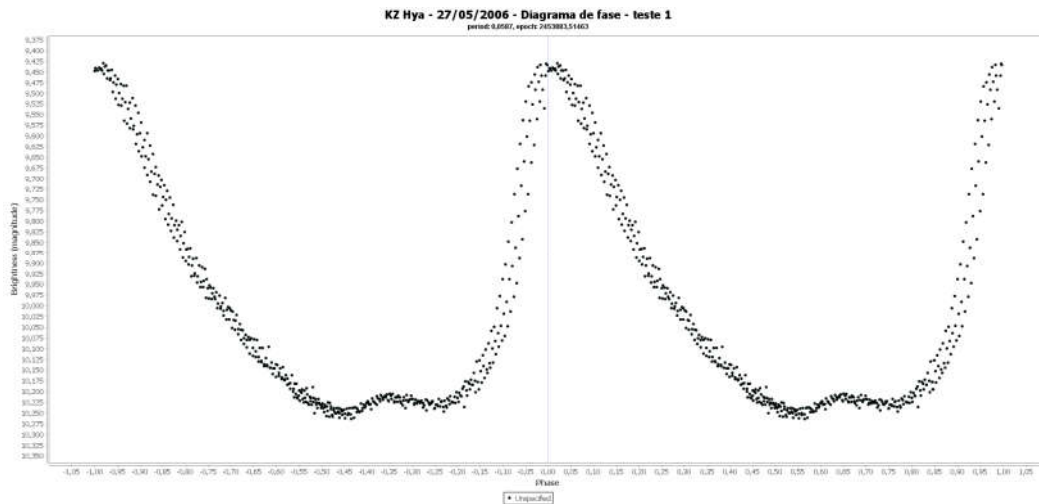


Figura 11.6 – Diagrama de fase de KZ Hya para o período 0,0587 dia. (Crédito do autor.)

Usando o período de 0,0587 dia, o diagrama de fase é o da Figura 11.6. Nota-se claramente certa dispersão (“espalhamento”) dos pontos, indicando que o período ainda não é precisamente esse. Repete-se o teste, agora com o período de 0,0600 dia. O resultado é visto na Figura 11.7. Pouco melhor, mas ainda não está perfeito. Então, a seguir, testamos os valores de período intermediários entre aqueles dois extremos (0,0588, 0,0589, 0,0590, 0,0591 e assim por diante, até 0,0599).

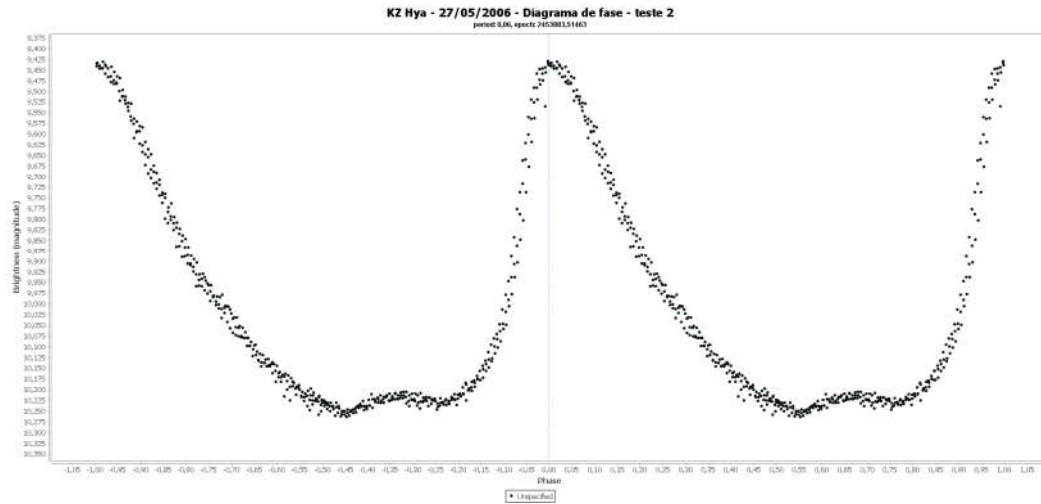


Figura 11.7 – Diagrama de fase de KZ Hya para o período 0,0600 dia. (Crédito do autor.)

Após essa nova série de testes, constatamos que a menor dispersão foi obtida para o período de 0,0595 dia, ou 1,428 hora (ou ainda 85m40,8s). Essa é a avaliação mais precisa do período de KZ Hya que se pode obter com essa técnica. Para comparação, o período de KZ Hya que consta da base de dados VSX da AAVSO é de 0,0595104212 d, o que é apenas 0,9 segundo diferente da nossa medição. A amplitude, por nossos dados, vai de 9,43 a 10,26 mag, contra 9,46 a 10,26 mag pelo VSX. Ver Figura 11.8.

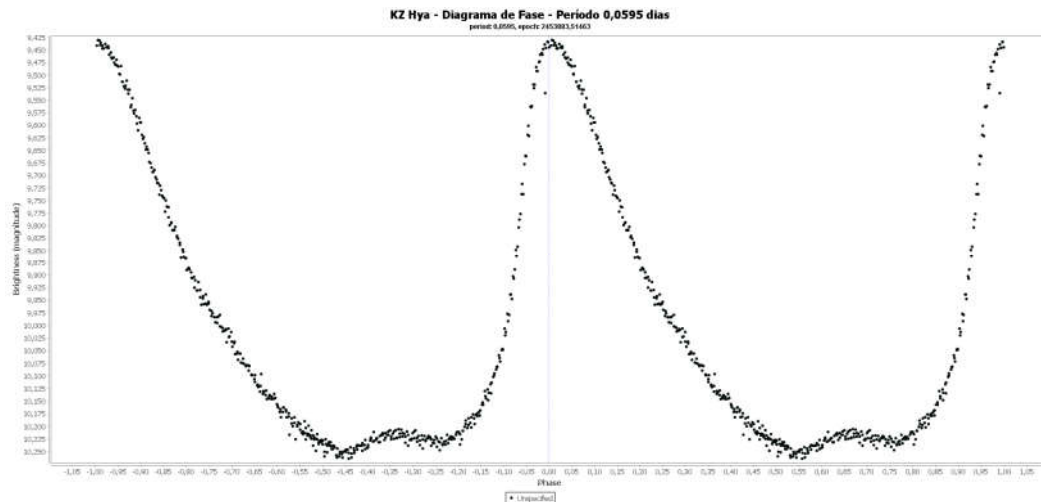


Figura 11.8 – Diagrama de fase de KZ Hya para o período 0,0595 dia. (Crédito do autor.)

11.2 Análise do período

11.2.1 Determinação aproximada do período pelo método “manual”

Um método simples para estimar o período de forma aproximada é subtrair as datas julianas de dois máximos (ou mínimos) adjacentes a partir da curva de luz da estrela. O primeiro passo é construir a curva, preferencialmente em um software tipo planilha.

Uma vez feito isso, o passo seguinte é a determinação dos máximos ou mínimos. Para isso, pode-se usar o método das cordas bisseccionadas, ou método de Pogson. Este é um processo gráfico, que pode ser executado facilmente sobre a curva de luz. O método de Pogson pode ser resumido nos seguintes passos:

- Traçam-se várias retas paralelas ao eixo horizontal do gráfico (eixo das abscissas) e determinam-se graficamente seus interceptos com a curva de luz.
- Determinam-se os pontos médios de cada um dos segmentos de reta (“cordas”) formados por esses interceptos.
- Unem-se graficamente esses pontos médios, traçando uma linha que passe por todos eles. A intersecção dessa linha com a curva de luz nos dará o máximo (ou mínimo) da estrela.

Embora o método de Pogson apresente limitações para trabalhos de precisão, ele permite uma forma simples e relativamente rápida de determinar os máximos e mínimos a partir da curva de luz – e assim avaliar também (grosseiramente) o período da estrela. O método é ilustrado graficamente na Figura 11.9, onde o ponto indicado pela letra “x” corresponde ao primeiro mínimo da estrela.67.88

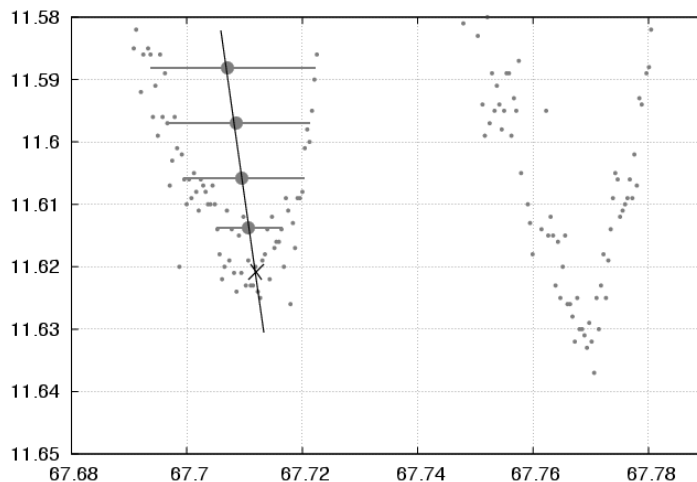


Figura 11.9 – Exemplo de aplicação do método das cordas bisseccionadas para encontrar graficamente o primeiro mínimo da estrela variável ASAS 002511. Nas abscissas, está indicado o valor de (Data Juliana – 2.453.200). (Crédito: RICHMOND, 2013.)

11.2.2 Análise do período usando o software VSTAR

O uso do VSTAR possibilita a determinação precisa do período rapidamente, através da utilização de sofisticadas ferramentas matemáticas. Consideremos, novamente, num primeiro exemplo, a Cefeida Eta Aquilae, cujo diagrama de fase vimos no item 11.1.4. Agora, no entanto, em vez de pedir apenas as observações feitas em 40 dias, vamos carregar *todas* as observações dessa estrela existentes no banco de dados VSX da AAVSO. O resultado é visto na Figura 11.10, que à primeira vista parece quase incompreensível. Não admira, pois aqui estão acumulados nada menos de 25.730 pontos, que constituem o número total de observações de Eta Aql entre 1865 e 2017!

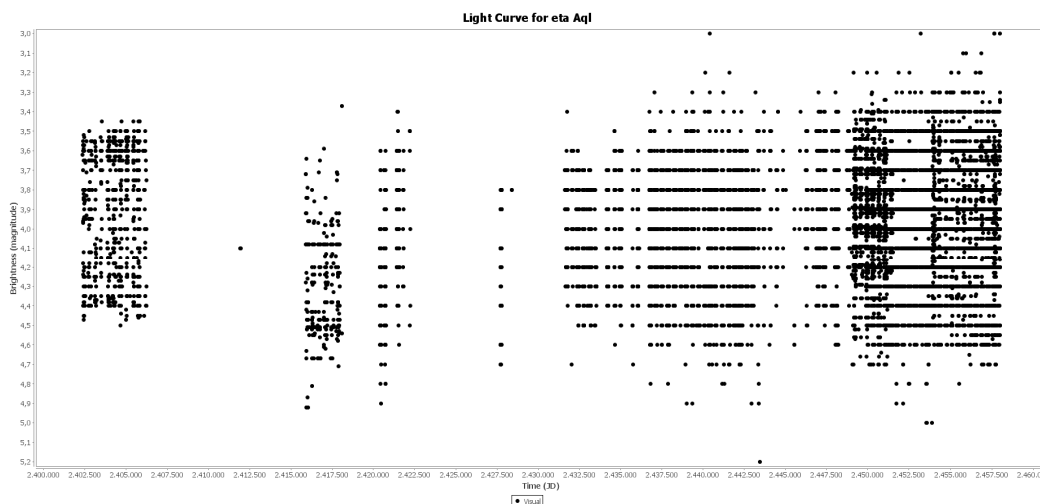


Figura 11.10 – Observações de Eta Aql desde 1865 até 2017. (Crédito: AAVSO.)

Em vez de pedir o diagrama de fase, contudo, agora iremos fazer uma determinação direta do período médio de Eta Aql durante esses 152 anos de observação. Para isso, usaremos apenas as estimativas visuais feitas nesse intervalo (23.809 observações). O VSTAR usa para a análise do período um poderoso algoritmo denominado DCDF (Transformada de Fourier Discreta com Compensação de Datas), desenvolvido pelo astrônomo brasileiro Sylvio Ferraz-Mello, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP⁴. No programa, basta entrar no menu Analysis/DCDF Standard Scan. A janela que se abre é um gráfico chamado periodograma (também chamado “power spectrum”, ou espectro de potência), que mostra a distribuição dos valores da potência do sinal recebido em função da sua frequência. O ponto máximo dessa distribuição (o ponto mais alto marcado em vermelho no gráfico) corresponde à frequência mais provável. Como o período, por definição, é o inverso da frequência, basta ler o valor da frequência (que o VSTAR fornece em ciclos/dia) e calcular seu inverso – ou então ler diretamente o valor do período, que o VSTAR já fornece na mesma tabela.

⁴ Uma versão simplificada desse método pode ser vista em FERRAZ-MELLO; QUAST, 1987.

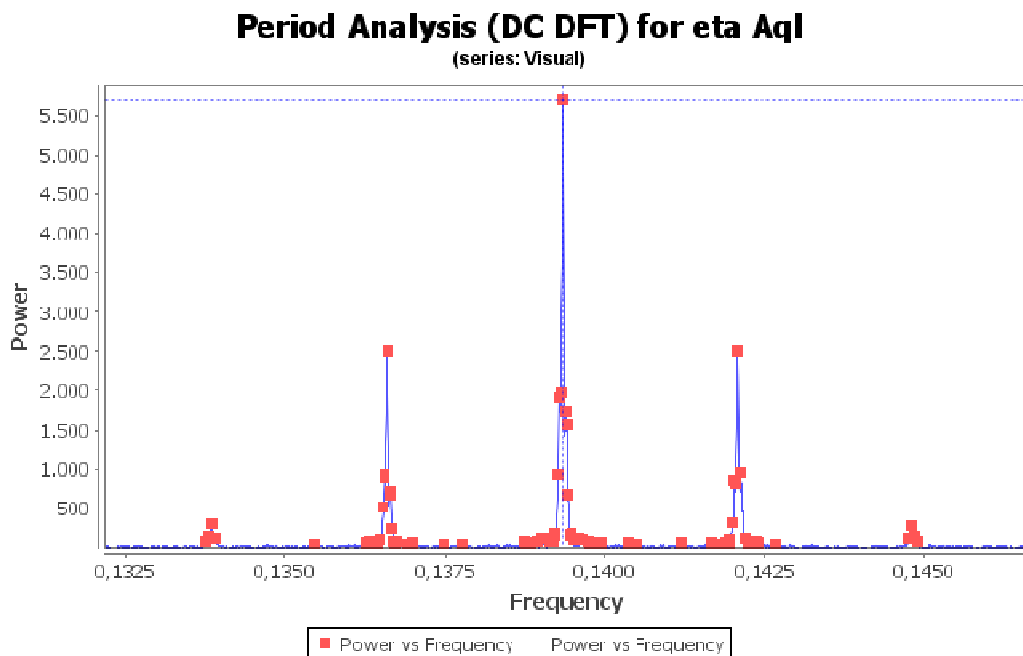


Figura 11.11 – Periodograma de Eta Aql com base em 23.809 observações. (Crédito: AAVSO.)

No caso de Eta Aql, o valor encontrado pelo VSTAR para a frequência foi de 0,139339 ciclo/dia e o do período correspondente, de **7,17671 dias**. Esse é o valor do período médio de Eta Aql entre 1865 e 2017. Como se trata de uma Cefeida clássica, o período não variou nesses 152 anos. A minúscula diferença entre esse valor e o período de 7,17679 dias informado pelo VSTAR para a construção do diagrama de fase do item 11.1.4 se deve ao fato de que este último considera também as medidas feitas com CCD no cálculo.

Consideremos agora uma variável de um tipo que não possui período perfeitamente regular: Omicron (Mira) Ceti, modelo das variáveis vermelhas de longo período.

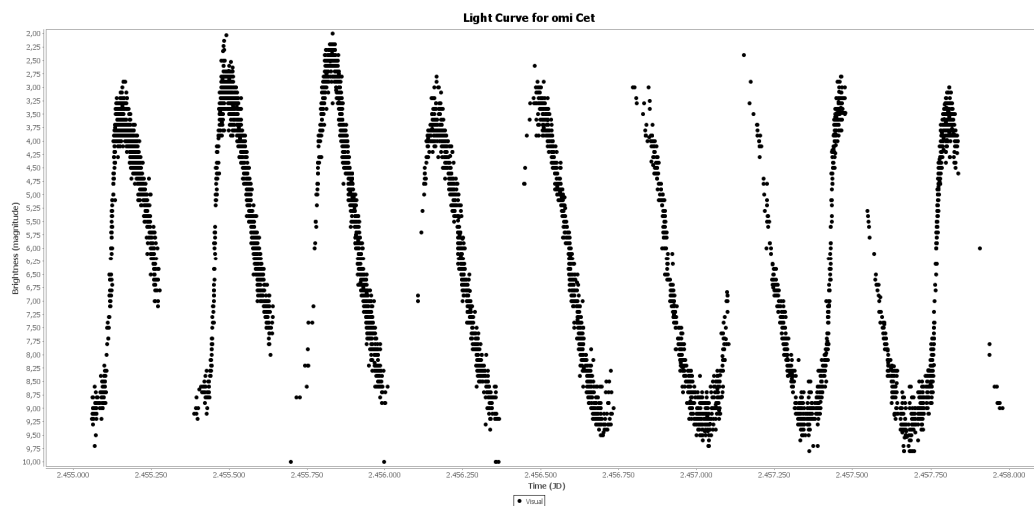


Figura 11.12 – Curva de luz de Mira Ceti entre 2009 e 2017. (Crédito: AAVSO.)

A Figura 11.12 apresenta a curva de luz visual de Mira Ceti entre 17/8/2009 e 17/8/2017, cobrindo 6.576 observações em oito anos. Notam-se pela curva as pequenas variações de ciclo para ciclo na amplitude e no período que caracterizam essa classe. Em especial, porém, são evidentes vários trechos “interrompidos” (descontinuidades) na curva de luz, que correspondem às épocas em que a estrela estava em conjunção solar, ofuscada pelo brilho do Sol durante o dia.

Para esse tipo de situação, o VSTAR oferece um recurso adicional: o algoritmo CLEANest, desenvolvido por Grant Foster e que, segundo o autor, permite remover matematicamente os “falsos picos” que aparecem no espectro de potência, compensando assim as descontinuidades (FOSTER, 1995). Para comprovar sua utilidade, fazemos um teste. Inicialmente, repetimos o procedimento de análise do período pelo processo “DCDFT Standard Scan” para Mira, exatamente como feito acima para Eta Aql. O VSTAR indicou um período médio de 335,12758 dias nos oito anos considerados. Em seguida, pedimos o diagrama de fase baseado nesse período. O resultado está na Figura 11.13. Nota-se que as descontinuidades ainda aparecem, principalmente na fase de ascensão ao máximo.

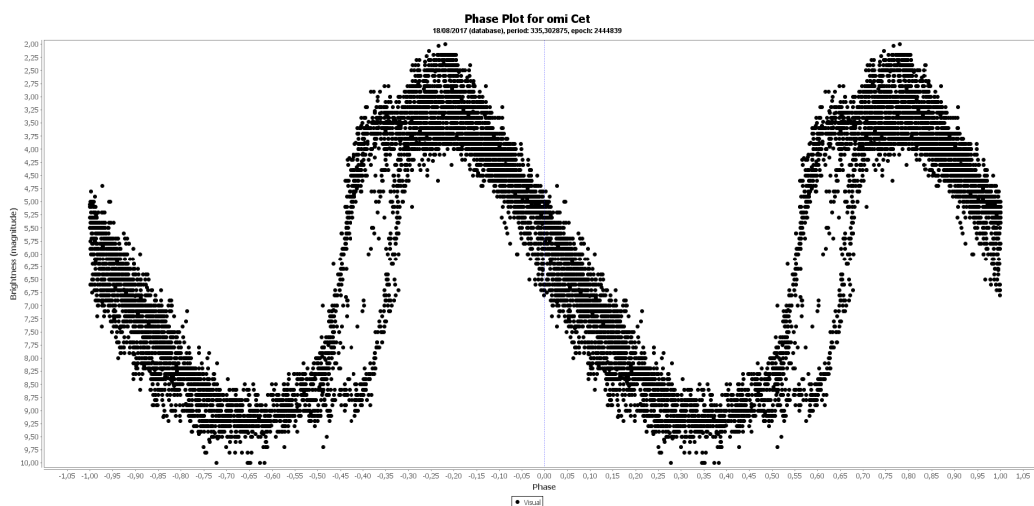


Figura 11.13 – Diagrama de fase de Mira Ceti entre 2009 e 2017 (DCDFT Std). (Crédito: AAVSO.)

Em seguida, vamos testar o algoritmo CLEANest. Num primeiro passo, montamos o periodograma, mas agora usando o comando “Analysis/DCDFT with Frequency Range” (em vez do “DCDFT Standard Scan”) e aceitando a sugestão de frequências dada pelo programa. Na janela do periodograma que se abre a seguir, aplicamos o algoritmo CLEANest com base na frequência mais provável (basta selecioná-la e clicar no botão “Cleanest”). O novo periodograma (recalculado pelo CLEANest) é visto na Figura 11.14. A frequência máxima obtida foi agora de 0,003018 ciclo/dia, correspondendo a um período de 331,345262 dias.

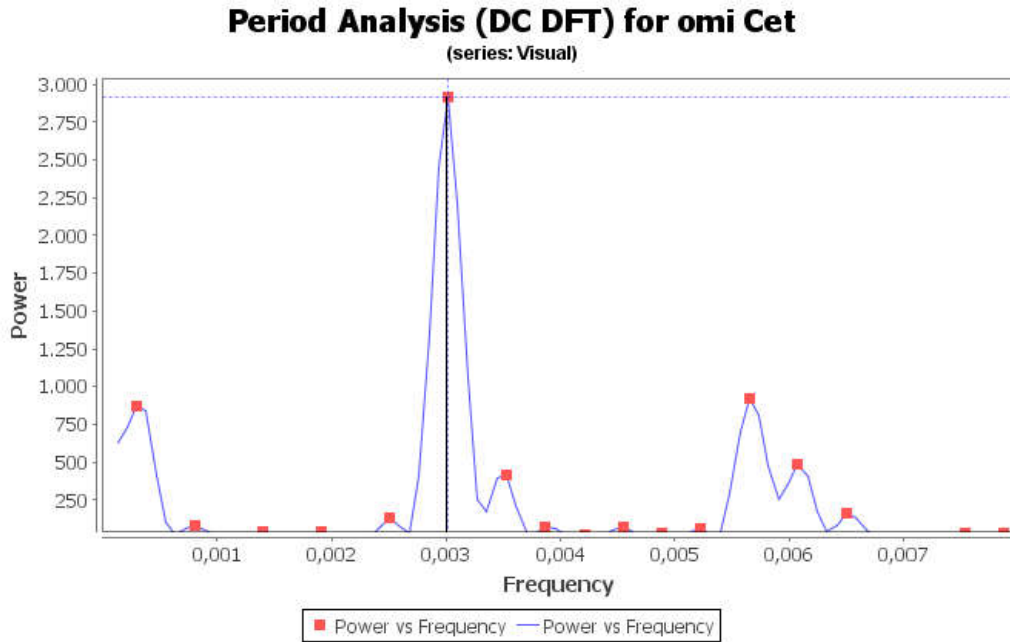


Figura 11.14 – Periodograma de Mira Ceti recalculado pelo CLEANest. (Crédito: AAVSO.)

Finalmente, montamos o diagrama de fase, agora com base no período calculado pelo CLEANest (331,345262 dias). O resultado é visto na Figura 11.15: as discontinuidades de fato foram removidas, e a amplitude de variação correspondente vai da magnitude 2,0 até magnitude 10,0. É notável a semelhança entre esses resultados e aqueles que constam do banco de dados VSX da AAVSO: neste último, encontra-se um valor de 331,96 dias para o período e uma faixa de 2,0 até 10,0 para a amplitude. Sempre é bom lembrar, entretanto, que o período encontrado é o melhor período *médio* que se pode obter para Mira – porém, pela natureza desse tipo de variável, o valor do período em ciclos individuais poderá variar levemente de ciclo para ciclo.

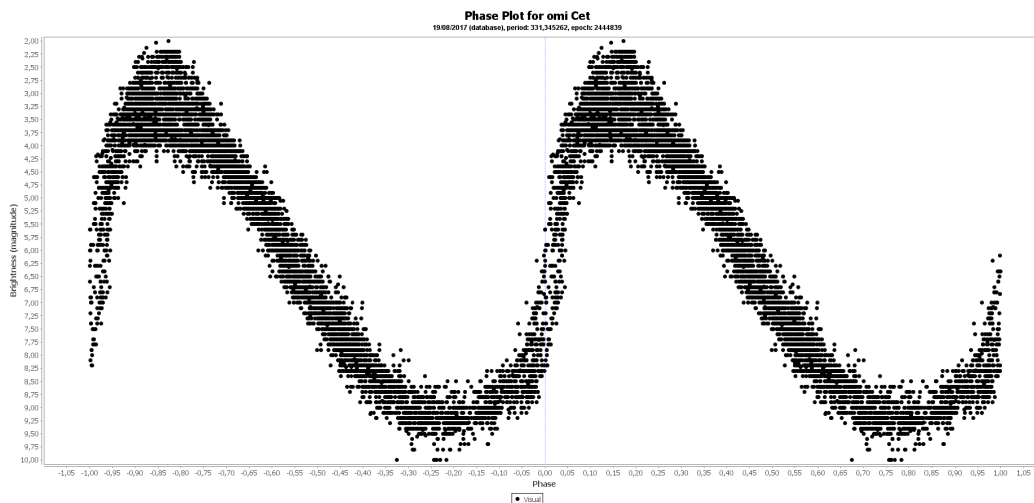


Figura 11.15 – Diagrama de fase de Mira Ceti recalculado pelo CLEANest. (Crédito: AAVSO.)

11.3 Diagramas (O-C)

O diagrama (O-C) é uma poderosa ferramenta para detectar possíveis variações do período da estrela a longo prazo, bem como para verificar se ela possui períodos secundários de variação (WILLSON, 1986). A expressão (O-C) significa "Observado menos Calculado". O termo "observado" se refere a uma estimativa de magnitude de uma estrela qualquer realizada em um determinado momento. O termo "calculado" corresponde à magnitude que a estrela deveria ter naquele instante, segundo uma efeméride previamente existente. Assim a quantidade (O-C) representa a diferença entre o valor *real* da magnitude e o valor *previsto* pela efeméride.

Plotando o valor dessa diferença em função do tempo (ou do número de ciclos), pode-se ter uma excelente indicação da correção ou não da efeméride considerada para o cálculo. De forma geral, ao se construir a primeira efeméride para uma estrela variável, assume-se que seu período seja constante ao longo do tempo. Mas isso não é necessariamente verdadeiro a longo prazo. Em muitos casos, a variável poderá retardar (ou acelerar) seu período, de forma constante ou não. A melhor forma de descobrir se (e por que) isso ocorre é através de uma longa série de observações da estrela ao longo de muitos anos, e da construção do diagrama (O-C) correspondente. O formato do diagrama resultante é importante para corrigir ou atualizar as efemérides anteriores. Mas não só isso: ele serve também para testar modelos teóricos que expliquem o mecanismo que causa a variação do período da estrela e da seus efeitos sobre sua evolução.

O procedimento para a construção de um diagrama (O-C) se inicia pela determinação precisa de uma série real de máximos (ou mínimos, conforme a estrela). Calculam-se as DJ (ou, o que é mais frequente, as HJD) correspondentes a cada observação. Esses serão os valores de "O". A seguir, calculam-se, pela efeméride disponível, os valores da DJ ou HDJ que corresponderiam teoricamente a esses máximos. Esses serão os valores de "C". Plota-se então em um gráfico, no eixo vertical, os valores da diferença (O-C) em dias e, no eixo horizontal, os valores do tempo em DJ ou HDJ (opcionalmente, pode-se indicar também o tempo em anos, ou ainda em número de ciclos). Esse procedimento é repetido (tipicamente ao longo de muitos anos) até que seja possível perceber uma linha de tendência definida no gráfico, cujo formato deverá ser então interpretado. A interpretação de um diagrama (O-C) pode não ser tarefa fácil. Além de testar a correção da efeméride usada, o formato do diagrama pode revelar alterações evolutivas na variável, ou ainda, se a estrela for binária, interações ou troca de massa entre as duas componentes. Vejamos a seguir alguns exemplos mais frequentes de formatos de diagramas (O-C) e sua interpretação. Os diagramas dos exemplos a seguir foram obtidos de KREINER; KIM; NHA, 2000.

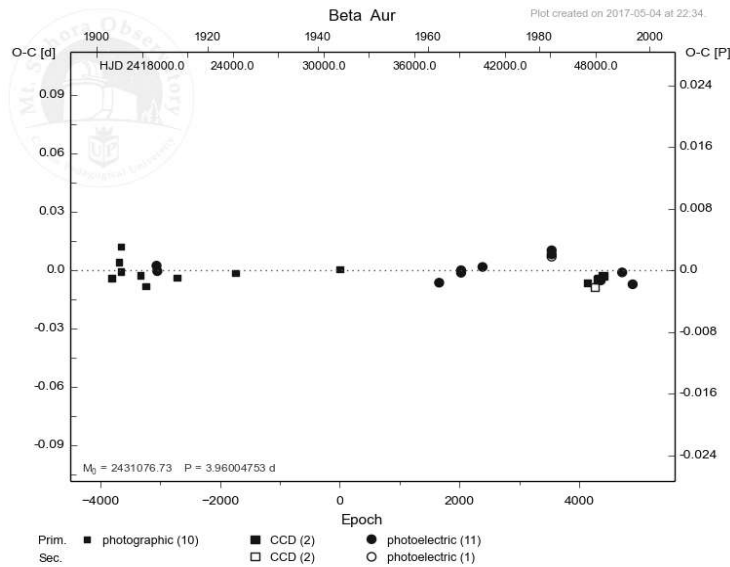


Figura 11.16 – Diagrama (O-C) de Beta Aur de 1900 a 2000. (Crédito: KREINER; KIM; NHA, 2000.)

Se o gráfico for uma reta coincidente com o eixo horizontal (como no caso da Figura 11.16 para Beta Aurigae), isso quer dizer que $(O-C) = 0$, ou seja, que os máximos (ou mínimos) observados são exatamente iguais aos calculados. Em outras palavras, o período de Beta Aur não se alterou em nada durante todo o intervalo de tempo coberto (no caso, todo o século XX), e a efeméride inicial continua válida.

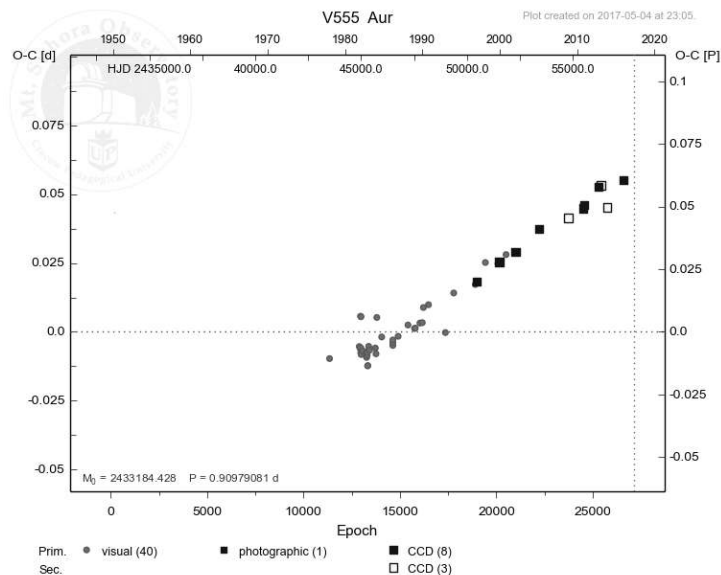


Figura 11.17 – Diagrama (O-C) de V555 Aur de 1980 a 2016. (Crédito: KREINER; KIM; NHA, 2000.)

Se o gráfico for uma reta com coeficiente angular positivo (inclinação crescente), como no caso da Figura 11.17 para V555 Aurigae, isso quer dizer que o período real é maior

que o estimado pela efeméride inicial ($O-C > 0$). Analogamente, se o gráfico for uma reta com coeficiente angular negativo (inclinação decrescente), isso significa que o período real é *menor* que aquele estimado pela efeméride inicial ($O-C < 0$). Se o diagrama (O-C) é retilíneo e houver uma mudança abrupta da inclinação da reta em qualquer ponto, isso quer dizer que o *período da estrela mudou*, a partir da data correspondente a esse ponto.

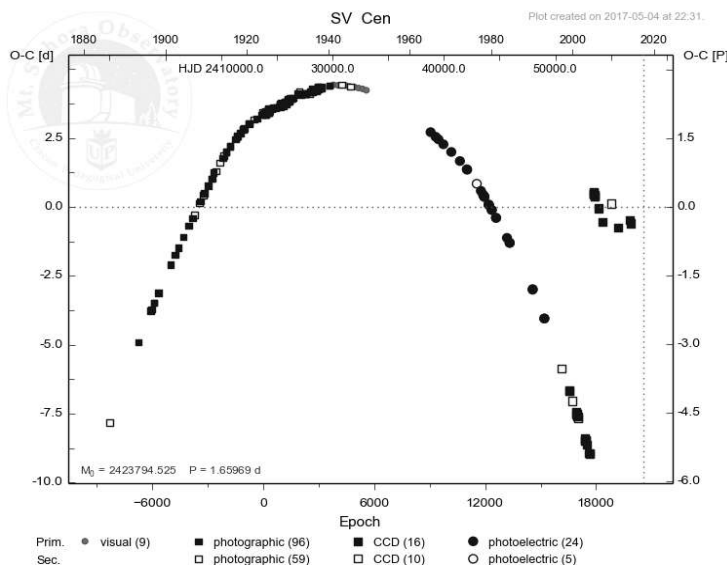


Figura 11.18 – Diagrama (O-C) de SV Cen de 1880 a 2016. (Crédito: KREINER; KIM; NHA, 2000.)

Se o gráfico for uma curva parabólica com a concavidade voltada para baixo (inclinação decrescente), como no caso da Figura 11.18 para SV Centauri, isso quer dizer que o período está *diminuindo gradualmente a uma taxa constante*.

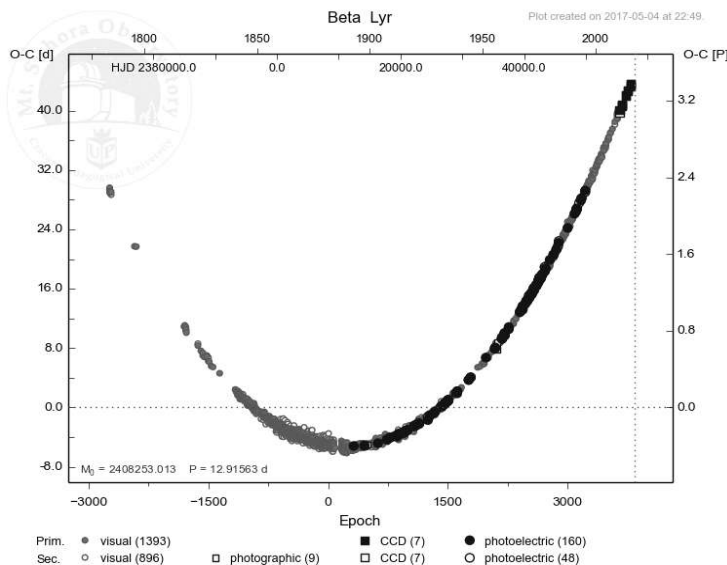


Figura 11.19 – Diagrama (O-C) de Beta Lyrae de 1800 a 2016. (Crédito: KREINER; KIM; NHA, 2000.)

Finalmente, se o gráfico for uma curva parabólica com a concavidade voltada para cima (inclinação crescente), isso quer dizer que o período está *aumentando gradualmente a uma taxa constante*. Esse é, por sinal, o caso real da nossa já conhecida binária eclipsante Beta Lyrae, cujo diagrama (O-C) é visto na Figura 11.19.

Beta Lyrae, por sinal, é um excelente exemplo daquilo que pode ser descoberto a partir de tudo o que foi visto neste capítulo. A partir do diagrama (O-C), as efemérides da estrela podem ser recalculadas (ver, por exemplo, KREINER, 2004, que fornece na forma mais atualizada a equação $HJD = 2452510.0 + 12,9423n$). O período orbital de Beta Lyrae teria assim aumentado desde 12,79 dias, quando observada pela primeira vez por John Goodricke (GOODRICKE, 1785), até o atual valor de 12,94 dias.

Baseados em cem anos de observações de Beta Lyrae, outros autores (HARMANEC; SCHOLZ, 1993) calcularam que existe um aumento gradual do período da ordem de 18,9 segundos por ano. A interpretação mais aceita para a causa desse atraso do período é a transferência de massa da componente primária, que é a maior, menos massiva e mais fria do sistema (uma estrela gigante do tipo espectral B7, massa de 3 massas solares e raio 15 vezes o solar) para a componente secundária, que é menor, mais quente e massiva (tipo espectral B0, de massa 13 vezes a solar e raio 6 vezes o raio do Sol). Essa transferência de massa se dá a taxas da ordem de 10^{-5} massas solares por ano (MENNICKENT; DJURASEVIC, 2013), o que significa quatro vezes e meia a massa da Terra a cada ano (BRUTON; LINENSCHMIDT; SCHMUDE, 1996). A idade do sistema é estimada em $2,3 \times 10^7$ anos.

Por esse modelo (Figura 11.20), a componente secundária de Beta Lyrae está totalmente imersa em uma corrente de matéria extraída da primária, que forma um toroide (com a forma de uma câmara de pneu) ao seu redor; o toroide tem um raio da ordem de 28 raios solares e espessura de 11 raios solares (MENNICKENT; DJURASEVIC, 2013).

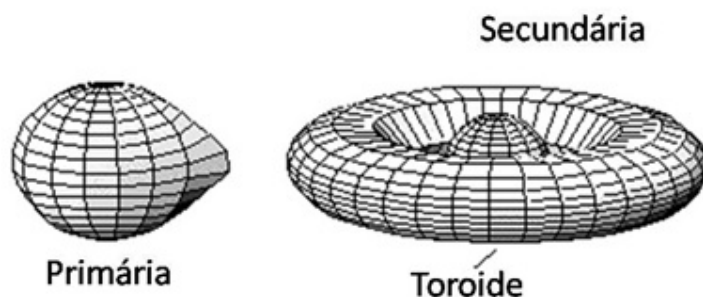


Figura 11.20 – Modelo esquemático do sistema de Beta Lyrae. (Crédito: BRUTON; LINENSCHMIDT; SCHMUDE, 1996.)

11.4 Atividades sugeridas (para professores)

Uma atividade bastante interessante é baixar o programa VSTAR e, usando os dados do banco VSX da AAVSO e/ou as estimativas de magnitude de algumas estrelas cuja observação foi recomendada no Capítulo 10, construir a curva de luz e o diagrama de fase correspondente. Se houver tempo suficiente, o professor poderá também usar o algoritmo DCDFT para estimar o período das variáveis escolhidas.

Referências bibliográficas para o Capítulo 11

BENN, D. Algorithms + observations = VSTAR. An overview of the history and possible future of VSTAR. *Journal of the American Association of Variable Star Observers*, v. 40, p. 852-66, 2012. Disponível em: <<https://www.aavso.org/media/jaavso/2881.pdf>>. Acesso em: 15 de agosto de 2017.

BRUTON, D. Heliocentric Julian Day. Stephen F. Austin State University. 2017. Disponível em: <<http://www.physics.sfasu.edu/astro/javascript/hjd.html>>. Acesso em: 19 de agosto de 2017.

BRUTON, D.; LINENSCHMIDT, R.; SCHMUDE, R.W. Watching β Lyrae evolve. *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication*, n. 63, p. 51, 1996. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1996IAPPP..63...51B>>. Acesso em: 12 de agosto de 2017.

FERRAZ-MELLO, S.; QUAST, G.R. Search and determination of periodicity. In: KLECZEK, J. (ed.), *Exercises in Astronomy*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., p. 231-5, 1987.

FOSTER, G. The CLEANest Fourier Spectrum. *Astronomical Journal*, v. 109:4, p. 1889-1902, 1995. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1995AJ....109.1889F>>. Acesso em: 18 de agosto de 2017.

GOODRICKE, J.; ENGLEFIELD, H.C. Observations of a new variable star. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 75, p. 153-64, 1785. Disponível em: <<http://rstl.royalsocietypublishing.org/>>. Acesso em: 14 de agosto de 2017.

HARMANEC, P.; SCHOLZ, G. Orbital elements of β Lyrae after the first 100 years of investigation. *Astronomy and Astrophysics*, v. 279, n. 1, p. 131-47, 1993. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1993A%26A...279..131H>>. Acesso em: 13 de agosto de 2017.

KREINER, J.M. Up-to-date linear elements for eclipsing binaries. *Acta Astronomica*, v. 54, p. 207, 2004. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004AcA...54..207K>>. Acesso em: 21 de agosto de 2017.

KREINER, J.M.; KIM, C.H.; NHA, I.S. An atlas of O-C diagrams of eclipsing binary stars. *Mt. Suhora Astronomical Observatory of Cracow Pedagogical University*, 2000. Disponível em: <<http://www.as.up.krakow.pl/o-c/index.php3>>. Acesso em: 20 de agosto de 2017.

KUKARKIN, B.V. et al. *General Catalog of Variable Stars: the 3rd edition containing information on 20.437 variable stars discovered and designated till 1968*. Moscow: Astronomical Council of the Academy of Sciences in the USSR, p. A23-A40, 1969.

MENNICKENT, R.E.; DJURASEVIC, G. On the accretion disc and evolutionary stage of β Lyrae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 432, issue 1, p. 799-809, 2013. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2013MNRAS.432..799M>>. Acesso em: 20 de agosto de 2017.

RICHMOND, M. Looking for the period. Notas de aula. Physics 445: Observational Astronomy, Rochester Institute of Technology, 2013. Disponível em: <<http://spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/period/period.html>>. Acesso em: 17 de agosto de 2017.

TEMPLETON, M. Time-series analysis of variable star data. *Journal of the American Association of Variable Star Observers*, v. 32, p. 41-54, 2004. Disponível em: <<https://www.aavso.org/media/jaavso/2059.pdf>>. Acesso em: 15 de agosto de 2017.

WILLSON, L.A. The (O-C) diagram: a useful tool. In: PERCY, J.R. (ed.), *The study of variable stars using small telescopes*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 219-28, 1986.

%%%%%%%%%%%%%%%%%