

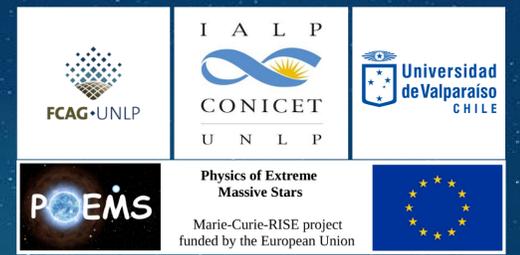
Estudio de curvas de luz sintéticas multiperiódicas aplicando análisis wavelet

Alberici Adam A.¹, Avila Marín G.F.², Christen A.², Cidale L.^{1,3}

¹ Instituto de Astrofísica de La Plata, Argentina

² Universidad de Valparaíso, Chile

³ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Argentina



Introducción

La detección y el estudio de estrellas pulsantes en sistemas binarios es fundamental para explorar la estructura interna de las estrellas y verificar los modelos de evolución estelar (Murphy, 2018), dado que permiten medir las masas de cada componente con precisión. Por el contrario a lo que se espera, los sistemas binarios detectados entre las estrellas B evolucionadas son muy escasos, lo cual indica una gran dificultad a la hora de reconocer estos sistemas, posiblemente debido a que la componente primaria más evolucionada sea una estrella intrínsecamente variable.

Hace unos años ha comenzado a tomar fuerza el análisis de datos utilizando las funciones *wavelet*, las cuales presentan ciertas ventajas frente al análisis de Fourier para analizar señales no estacionarias y con discontinuidades abruptas. Es por esta razón que son particularmente adecuadas para estudiar curvas de luz de estrellas supergigantes y binarias. Sin embargo, al analizar una señal pueden surgir efectos no deseados como la detección de períodos espurios y alias, que resultan del nivel de ruido de la señal o como resultado de un muestreo no-equidistante.

Debido a esto resulta relevante el estudio de curvas de luz sintéticas que simulan estrellas binarias eclipsantes con una compañera pulsante, donde los períodos son conocidos.

Metodología

El modelado de la estrella binaria se realizó utilizando el software PHOEBE, a partir de los datos fotométricos de HD 19356 obtenidos por el satélite espacial TESS. La curva sintética resultante con un período orbital de 2.87 días, fue afectada por pulsaciones con diferentes períodos y amplitudes. Se generaron de esta forma 9 curvas sintéticas utilizando 2 tipos de pulsaciones: sinusoidal (relacionada a modos p y g de pulsación), y radial (con la forma típica presente en las estrellas variables Cefeidas). Cada una de ellas fue afectada por un ruido ARMA, el cual fue asociado a curvas de luz de estrellas con anterioridad, por ejemplo en Caceres et al. (2019).

Se plantearon los siguientes escenarios:

- Modelo 1: Binaria + pulsación sinusoidal de período $P=0.7$ días.
- Modelo 2: Binaria + pulsación sinusoidal de $P=1.9$ días.
- Modelo 3: Binaria + pulsaciones sinusoidales de $P=0.7$ días y $P=1.9$ días.
- Modelo 4: Binaria + pulsación sinusoidal de $P=5$ días.
- Modelo 5: Binaria + pulsaciones sinusoidales de $P=0.7$ días y $P=5$ días.
- Modelo 6: Binaria + pulsaciones sinusoidales de $P=0.7$ días, $P=5$ días y $P=20$ días.
- Modelo 7: Binaria + pulsaciones sinusoidales de $P=3$ días y $P=2.9$ días.
- Modelo 8: Binaria + pulsación radial tipo Cefeida de $P=0.9$ días.
- Modelo 9: Binaria + pulsación radial tipo Cefeida de $P=0.9$ días y alta amplitud.

Las curvas sintéticas resultantes se muestran en la Figura 1.

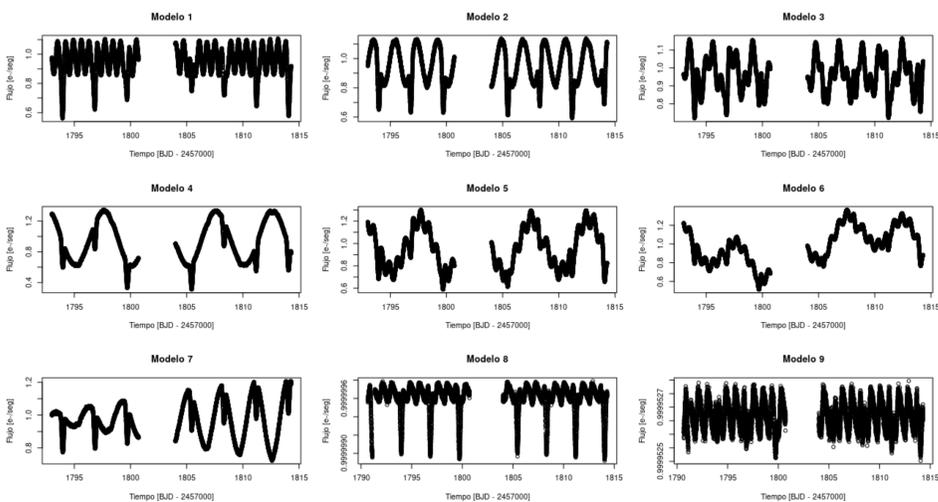


Figura 1: Curvas de luz sintéticas obtenidas a partir de una estrella binaria eclipsante afectada por pulsaciones sinusoidales y radiales tipo Cefeida.

El análisis se realizó utilizando el paquete WaveletComp (Roesch & Schmidbauer, 2018) escrito en el lenguaje de programación R. Cada curva ha sido separada en dos partes, debido a que presentan un salto de aproximadamente cuatro días que el programa no interpreta correctamente. Además, para realizar un análisis más completo utilizamos el software Period04 (Lenz & Breger, 2005) basado en la transformada de Fourier.

Resultados

En la Figura 2 se muestran los escalogramas (a), la potencia promedio (b) y la reconstrucción (c), para la primera y segunda parte de la curva Modelo 3. En los escalogramas, los valores más altos y más bajos de potencia wavelet se representan con una escala de color que va desde el rojo al azul respectivamente. Las líneas de color negro identifican períodos con una probabilidad mayor o igual a 0.95 y las líneas blancas delimitan regiones con una probabilidad de 0.9. En este trabajo se consideraron como períodos significativos a todos los representados por las líneas negras.

Para los períodos variables tomamos como referencia el valor medio de cada uno e indicamos que varían con el superíndice *var*. En el caso del análisis de Fourier la selección de períodos se realizó estableciendo que los máximos del periodograma estén 4σ sobre nivel del ruido (Lenz & Breger, 2005). Los resultados del análisis para cada curva se listan en la Tabla 1.

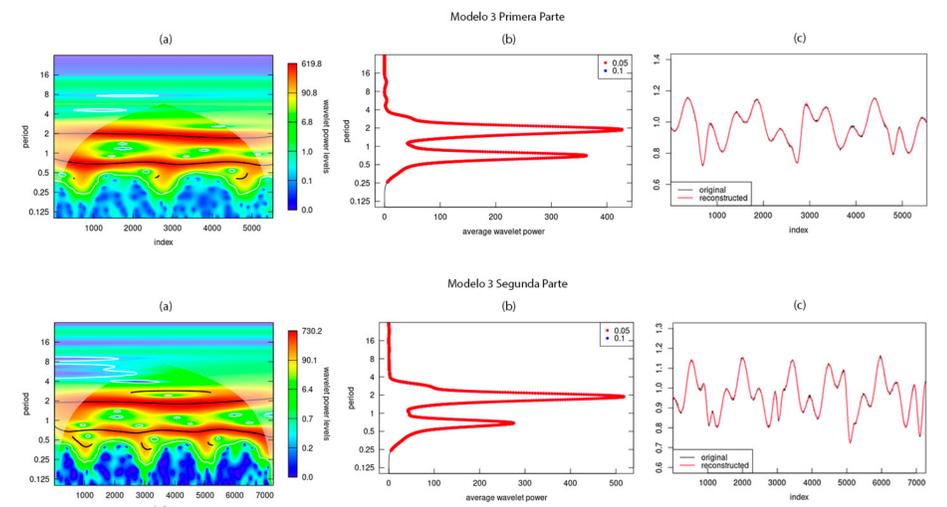


Figura 2: Resultados del análisis wavelet para la curva Modelo 3.

Simulación	Período [días] generado	Períodos [días] (wavelet)		Períodos [días] (Fourier)
		Primera Parte	Segunda Parte	
Modelo 1	2.87 ; 0.7	1.44 ^{var} ; 0.7 ^{var}	2.8 ^{var} ; 1.4 ^{var} ; 0.7 ^{var}	2.87 ; 1.43 ; 0.69
Modelo 2	2.87 ; 1.9	1.9 ^{var}	2.8 ^{var} ; 1.9 ^{var}	2.86 ; 1.9 ; 1.43
Modelo 3	2.87 ; 1.9 ; 0.7	1.86 ^{var} ; 0.7 ^{var}	2.8 ^{var} ; 1.9 ^{var} ; 0.7 ^{var}	2.86 ; 1.43 ; 1.9 ; 0.7
Modelo 4	5 ; 2.87	5.7 ^{var} ; 3.9 ^{var} ; 1.4 ^{var}	4.8 ^{var}	5 ; 2.87 ; 1.43
Modelo 5	5 ; 2.87 ; 0.7	5.7 ^{var} ; 3.9 ^{var} ; 1.3 ^{var} ; 0.7 ^{var}	4.8 ^{var} ; 0.7 ^{var}	5 ; 2.87 ; 1.43 ; 0.7
Modelo 6	20 ; 5 ; 2.87 ; 0.7	11.4 ; 5.7 ^{var} ; 3.9 ^{var}	4.7 ^{var} ; 0.7 ^{var}	25 ; 4.9 ; 2.85 ; 1.43 ; 0.7
Modelo 7	3 ; 2.9 ; 2.87	2.89 ^{var} ; 1.44 ^{var}	2.87 ^{var}	3 ; 2.7 ; 1.43
Modelo 8	2.87 ; 0.9	2.85 ^{var}	2.79 ^{var}	2.86 ; 0.96
Modelo 9	2.87 ; 0.9	1.48 ^{var} ; 0.93 ^{var}	2.81 ^{var} ; 1.44 ^{var} ; 0.91 ^{var}	2.85 ; 1.41 ; 0.9

Taula 1: Períodos obtenidos para las curvas simuladas.

Conclusiones

A partir de los resultados que se muestran en la Tabla 1 vemos que en la mayoría de los casos se obtuvieron resultados más exactos con el análisis de Fourier, aunque las reconstrucciones obtenidas con el análisis wavelet resultaron muy satisfactorias. Es posible que las diferencias entre ambas técnicas se deban al hecho de analizar la curva en 2 tramos.

En el caso donde las pulsaciones tenían períodos similares al período orbital de la binaria (Modelo 7) no fue posible con ningún método discernir entre ellos. También fallaron ambas técnicas para detectar de manera exacta el período de 20 días (Modelo 6), cercano al intervalo temporal total de la curva. En los Modelos 3, 6, y 9, la binaria eclipsante deja de ser reconocible en la curva de luz (Figura 1), aunque se recupera el período orbital con ambos métodos.

Las curvas sintéticas generadas en este trabajo se corresponden con curvas de luz observadas en estrellas binarias eclipsantes estudiadas por Shi et al. (2022). Los resultados obtenidos de estas simulaciones permitirán reconocer e identificar períodos en estrellas binarias y supergigantes. Queda pendiente para trabajos futuros la realización de más modelos de pulsaciones y la utilización de otros paquetes que permitan analizar wavelets en curvas con datos faltantes.

Referencias

- Caceres G. A., et al., (2019), The Astronomical Journal, 158, 57.
 Lenz, P., Breger, M. (2005). Period04 user guide.
 Murphy, S. (2018). Pulsating stars in binary systems: a review.
 Roesch, A., Schmidbauer, H. (2018). Waveletcomp: Computational wavelet analysis. (R package version 1.1)
 Shi X., Qian S., Li L., (2022). New Pulsating Stars Detected in EA-type Eclipsing-binary Systems Based on TESS Data.