

# Simulaciones y análisis temporal de curvas de luz de estrellas binarias pulsantes

A. Alberici Adam<sup>1,3</sup>, G.F. Avila Marín<sup>2</sup>, A. Christen<sup>2</sup> & L.S. Cidale<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

<sup>2</sup> *Universidad de Valparaíso, Chile*

<sup>3</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

Contacto / aldi.lvm@gmail.com

**Resumen** / 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. 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. Para estudiar cómo estos efectos interfieren en la detección de períodos se ha generado un diseño de simulación de curvas de luz de estrellas binarias eclipsantes que presentan fenómenos de pulsación. Se utilizaron funciones sinusoidales para emular pulsaciones no radiales con diferentes escalas de períodos y de amplitud, considerando un ruido tipo ARMA (1,1) para la señal. Las curvas resultantes se analizaron con la transformada de Fourier y con la función *wavelet* de Morlet, usando el software PERIOD04 y los paquetes SPECTRAL y WAVELETCOMP de R.

**Abstract** / The detection and study of pulsating stars in binary systems is essential to explore the internal structure of stars and verify stellar evolution models. However, undesired effects can arise when analyzing a signal, such as the detection of spurious periods resulting from the noise level of the signal or as a result of non-equidistant sampling. To study how these effects interfere with period detection, we generated a simulation design of light curves of eclipsing binary stars exhibiting pulsation phenomena. Sinusoidal functions were used to emulate non-radial pulsations with different period and amplitude scales, considering an ARMA (1,1) type noise for the signal. The resulting curves were analyzed with the Fourier transform and the Morlet wavelet function, using the PERIOD04 software and the SPECTRAL and WAVELETCOMP packages of R.

**Keywords** / methods: statistical — binaries: eclipsing — stars: oscillations (including pulsations)

## 1. Introducción

Para estudiar la estructura interna de las estrellas y verificar los modelos de evolución estelar es fundamental la detección de estrellas pulsantes que pertenezcan a sistemas binarios, dado que permiten medir las masas de cada componente con precisión (Murphy, 2018). Relevamientos observacionales de estrellas enanas masivas de tipo espectral O muestran que la mayoría se encuentra formando sistemas binarios (Sana et al., 2012). Sin embargo, para las estrellas B evolucionadas, los sistemas binarios detectados son muy pocos en relación a lo esperado (Simón-Díaz et al., 2020), probablemente debido a la dificultad para reconocerlos, a causa de que la componente primaria del sistema sea una estrella pulsante. En la fotometría estas pulsaciones se ponen de manifiesto produciendo variaciones que pueden ser identificadas con métodos astrosismológicos (Aerts et al., 2009).

Para la búsqueda de periodicidades se utilizan diversos tipos de periodogramas. Por ejemplo, el periodograma de Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982) y el periodograma generalizado de Lomb-Scargle (GLS) (Zechmeister & Kürster, 2009), basados en la transformada de Fourier. Estos permiten la descomposición de la serie de tiempo en infinitos términos sinusoidales, transformando la señal desde la base del tiempo a la base

de frecuencia y viceversa. Sin embargo, si la señal es no estacionaria, al pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo resulta complejo determinar en que instante de tiempo se presenta un cambio en la frecuencia. Debido a esto ha comenzado a tomar fuerza el análisis de datos utilizando el análisis *wavelet* (Grossmann & Morlet, 1984) dado que permite obtener una descomposición y reconstrucción detallada, a través de un análisis multiresolución con ventanas de longitud variable, adaptadas al cambio de frecuencia de la señal. Así, resulta ser un método adecuado para el análisis de fenómenos cuasi-regulares, transitorios y discontinuos, como las curvas de luz de estrellas binarias. Esta herramienta ha sido utilizada previamente por autores como Bravo et al. (2014) y Labadie-Bartz et al. (2020).

Un problema del análisis de datos observacionales es el nivel de ruido de la señal, por lo que ciertos máximos en un periodograma podrían ser espurios. Además, cuando los datos de la muestra no están equiespaciados en el tiempo, situación muy frecuente en el caso de las observaciones astronómicas, se producen los llamados *alias* (Baluev, 2012), es decir, falsos períodos.

En este trabajo se expone el diseño y los resultados obtenidos del estudio de curvas de luz sintéticas que simulan estrellas binarias con una compañera pulsante, empleando las técnicas del análisis *wavelet* y Fourier.

Modelo	Batido	Light time effect	N° de pul.	Período de pul. [días]	Amplitud* [%]
N°1	Si	No	2	0.7–0.77	2
N°2	Si	No	2	0.7–0.77	20
N°3	Si	No	2	5–5.5	2
N°4	Si	No	2	5–5.5	20
N°5	No	Si	1	0.7–0.56–0.92	2
N°6	No	Si	1	0.7–0.56–0.92	20
N°7	No	Si	1	5–1.82–6.73	2
N°8	No	Si	1	5–1.82–6.73	20

Tabla 1: Características del diseño de simulación. \* Amplitud de la pulsación respecto del eclipse primario. Los períodos indicados en púrpura corresponden a valores generados debido a *light time effect*.

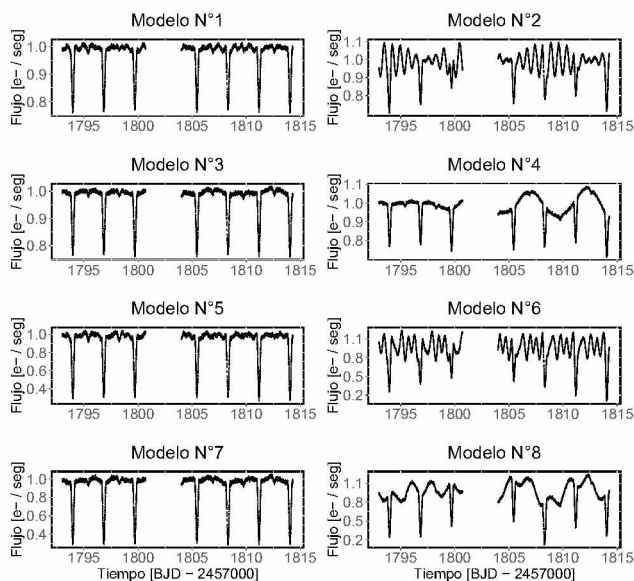


Figura 1: Curvas sintéticas del diseño de simulación.

## 2. Metodología

Para realizar las simulaciones partimos de una curva de luz sintética de una estrella binaria eclipsante con un período orbital de 2.87 días, generada utilizando el software PHOEBE (Physics Of Eclipsing Binaries) (Prša et al., 2016), a partir de los datos fotométricos de HD 19356 obtenidos por la misión *TESS* (Ricker et al., 2014). Dicha curva fue afectada, implementando en software R, funciones sinusoidales que emulan modos de pulsación no radiales. En todos los casos se aplicó un ruido ARMA (1,1) \* (Whittle, 1951). Se realizó un diseño de simulación con 4 variables y 2 categorías cada una, donde las variables batido y N° de pulsaciones están correlacionadas (ver Tabla 1). Por lo tanto, se generaron 8 modelos \*\* independientes cuyas curvas sintéticas se muestran en la Fig. 1. Se tuvo en cuenta el fenómeno de batido y el efecto de retardo de la luz (*light time effect*). Este último introduce un desdoblamiento del período,

\*Un ruido ARMA (*AutoRegressive Moving Average*) de orden (1,1), es una señal cuyo valor depende linealmente del valor anterior más una perturbación aleatoria.

\*\*Las curvas sintéticas generadas en este trabajo se asemejan a curvas de luz observadas en estrellas binarias eclipsantes estudiadas por Shi et al. (2022).

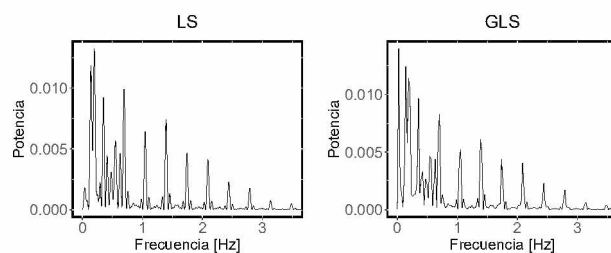


Figura 2: Modelo N°8, periodogramas de Lomb-Scargle (*izquierda*) y Lomb-Scargle generalizado (*derecha*).

debido al movimiento orbital de la estrella (Shibahashi & Kurtz, 2012).

El análisis de cada modelo se realizó utilizando el paquete WAVELETCOMP (Roesch & Schmidbauer, 2018) de R. Cada curva fue separada en dos partes, debido a que presentan una discontinuidad en la secuencia temporal. Se realizó un promedio ponderado de los períodos detectados en cada parte y se estimó su desviación estándar. Para el análisis de Fourier se utilizó el software PERIOD04 (Lenz & Breger, 2005) y el paquete SPECTRAL (Shyu et al., 2003) de R. Las incertezas se calcularon usando la Ec. (2) de Lamm, M. H. et al. (2004).

## 3. Resultados

En las Figs. 2 y 3 se muestran los resultados del análisis de Fourier y del análisis *wavelet*, para el Modelo N°8. En los escalogramas, los valores más altos y bajos de potencia *wavelet* se representan con una escala de color que va desde el rojo al azul. Las líneas negras identifican los períodos con una confianza mayor o igual a 0.95, que junto con los indicados en el gráfico de potencia media se han considerado como períodos significativos. Para el análisis de Fourier se seleccionaron aquellos períodos con una relación señal/ruido  $\geq 4$ . Los períodos obtenidos para cada curva se enumeran en la Tabla 2, donde se han descartado los alias armónicos siguiendo el criterio de resolución Rayleigh (Bognár, Zs. et al., 2015).

## 4. Discusión y conclusiones

A partir de los resultados que se muestran en la Tabla 2 vemos que en todos los casos fue posible obtener el período orbital. Considerando el valor fijado en el modelo y los valores detectados con cada herramienta, se determinó para el análisis *wavelet* una inexactitud de  $0.02 \leq \sigma \leq 0.07$ , mientras que con LS y GLS fue de  $\sigma \sim 0.01$  y  $\sigma \sim 0.03$ , respectivamente.

Todos los métodos detectaron mejor el *light time effect* que el batido, y se obtuvieron resultados más exactos cuando la amplitud de la pulsación fue del 20%. Por otra parte, ante dos períodos cercanos, *wavelet* tiende a detectar un valor intermedio.

En general ningún método logró recuperar todos los períodos. Aunque se obtuvieron resultados más exactos con el análisis de Fourier realizado con PERIOD04, las reconstrucciones obtenidas con *wavelet* resultaron muy satisfactorias. Las diferencias entre ambos tipos de análisis

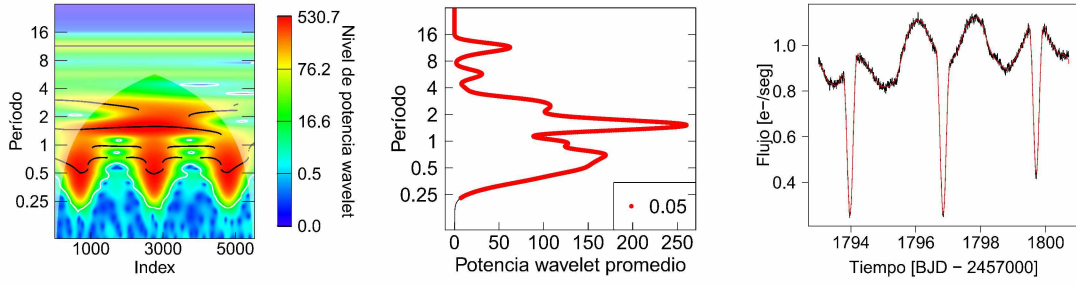


Figura 3: Resultado del análisis *wavelet* para la 1<sup>er</sup> parte, antes del *gap*, del Modelo N°8. De izquierda a derecha se presenta el escalograma, la potencia promedio y la reconstrucción de la curva de luz.

Modelo	Períodos fijados en el diseño [días]	Períodos detectados [días] (wavelet)	Períodos detectados [días] (LS)	Períodos detectados [días] (GLS)
N°1	2.87–0.70–0.77	2.814 ± 0.054	2.8788 ± 0.0003	2.8403 ± 0.0003
N°2	2.87–0.70–0.77	2.813 ± 0.069 0.784 ± 0.138	2.8788 ± 0.0003 0.7732 ± 0.0001 0.6950 ± 0.0001	2.8403 ± 0.0003 0.7746 ± 0.0002 0.6984 ± 0.0002
N°3	2.87–5–5.5	2.816 ± 0.038	2.8594 ± 0.0003	2.8403 ± 0.0003
N°4	2.87–5–5.5	4.852 ± 0.016 2.842 ± 0.096	6.1747 ± 0.0015 5.1332 ± 0.0010 2.8788 ± 0.0003	5.3257 ± 0.0011 4.7340 ± 0.0009 2.8404 ± 0.0003
N°5	2.87–0.70–0.92–0.56	2.815 ± 0.054	2.8788 ± 0.0003	2.8403 ± 0.0003
N°6	2.87–0.70–0.92–0.56	2.800 ± 0.067 0.811 ± 0.256 0.602 ± 0.157	2.8788 ± 0.0003 0.9165 ± 0.0001 0.6954 ± 0.0001 0.5628 ± 0.0001	2.8404 ± 0.0003 0.9262 ± 0.0003 0.6985 ± 0.0002 0.5606 ± 0.0001
N°7	2.87–6.73–5–1.82	2.810 ± 0.055	2.8594 ± 0.0003	2.8403 ± 0.0003
N°8	2.87–6.73–5–1.82	5.503 ± 0.119 2.849 ± 0.453 1.897 ± 0.383	6.6571 ± 0.0017 5.0124 ± 0.0010 2.8594 ± 0.0003 1.8286 ± 0.0001	7.1009 ± 0.0019 5.3257 ± 0.0011 2.8404 ± 0.0003 1.8524 ± 0.0001

Tabla 2: Períodos detectados para las curvas simuladas. **Período orbital del sistema binario.** **Período de la pulsación.**

posiblemente se deban a que los modelos fueron generados con funciones sinusoidales, y a la existencia de una brecha que requirió analizar los datos en dos tramos.

Los resultados obtenidos de este trabajo \*\*\* posibilitarán la detección y análisis de períodos en estrellas binarias y supergigantes. Queda pendiente para trabajos futuros la realización de más modelos de pulsación y la utilización de otros paquetes que permitan analizar *wavelets* en curvas con datos faltantes.

## Referencias

Aerts C., et al., 2009, *A&A*, 508, 409  
 Baluev R.V., 2012, *MNRAS*, 422, 2372  
 Bognár, Zs., et al., 2015, *A&A*, 581, A77  
 Bravo J.P., et al., 2014, *A&A*, 568, A34

\*\*\*Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea, Horizonte 2020 (2014–2020), acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie N° 823734.

Grossmann A., Morlet J., 1984, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 15, 723  
 Labadie-Bartz J., et al., 2020, *MNRAS*, 502, 242  
 Lamm, M. H., et al., 2004, *A&A*, 417, 557  
 Lenz P., Breger M., 2005, *Period04 User Guide*  
 Lomb N.R., 1976, *Ap&SS*, 39, 447  
 Murphy S., 2018, *Pulsating stars in binary systems: a review*  
 Prša A., et al., 2016, *ApJS*, 227, 29  
 Ricker G.R., et al., 2014, vol. 9143, 914320  
 Roesch A., Schmidbauer H., 2018, *WaveletComp: Computational Wavelet Analysis*. R package version 1.1  
 Sana H., et al., 2012, *Science*, 337, 444  
 Scargle J.D., 1982, *ApJ*, 263, 835  
 Shi X., Qian S., Li L., 2022  
 Shibahashi H., Kurtz D.W., 2012, *MNRAS*, 422, 738  
 Shyu M., et al., 2003, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 7, 203  
 Simón-Díaz S., et al., 2020, *XIV.0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society*, 186  
 Whittle P., 1951  
 Zechmeister M., Kürster M., 2009, *A&A*, 496, 577