

Estudio de curvas de luz sintéticas multiperiódicas aplicando análisis *wavelet*

A. Alberici Adam¹, G.F. Avila Marín², A. Christen², L. Cidale^{1,3}

(1) Instituto de Astrofísica de La Plata, Argentina

(2) Universidad de Valparaíso, Chile

(3) Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP

Resumen. Las características de las funciones *wavelet* las hacen adecuadas para analizar datos que presentan variaciones o discontinuidades abruptas; por esta razón son particularmente útiles para estudiar curvas de luz de estrellas supergigantes y binarias. Sin embargo, al analizar una señal pueden surgir efectos no deseados tales como la detección de períodos espurios y períodos 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 radiales y no radiales. Las curvas resultantes se analizaron con la transformada de Fourier y con la función *wavelet* de Morlet, usando el programa *Period04* y el paquete *WaveletComp* de R, respectivamente.

Abstract. The characteristics of wavelet functions make them suitable for analyzing data that present abrupt variations or discontinuities, which is why they are particularly useful for studying light curves of supergiant and binary stars. However, when analyzing a signal, undesired effects can arise 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 radial and non-radial pulsations. The resulting curves were analyzed with the Fourier transform and with the Morlet wavelet function, using the *Period04* software and the *WaveletComp* R-package, respectively.

1. 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. 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, probablemente debido a la dificultad para reconocerlos, si la componente pri-

maria del sistema es una estrella pulsante. En la fotometría estas pulsaciones se ponen de manifiesto con variaciones que pueden ser identificadas con métodos astrosismológicos (Aerts *et al.*, 2009).

Para la búsqueda de periodicidades usualmente se utilizan diversos tipos de periodogramas. Por ejemplo, el periodograma de Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982) basado en la transformada de Fourier, permite 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 qué instante de tiempo se presenta un cambio en la frecuencia. Debido a esto, hace unos años ha comenzado a tomar fuerza el análisis de datos utilizando el análisis *wavelet* como una herramienta que permite obtener una descomposición y reconstrucción detallada, para señales que presentan cambios abruptos, a través de un análisis de multirresolución con ventanas de longitud variable, adaptadas al cambio de frecuencia de la señal. De esta forma resulta ser una herramienta adecuada para el análisis de fenómenos transitorios, no estacionarios, variables en el tiempo y que presenten discontinuidades (como curvas de luz de estrellas supergigantes y binarias).

Un problema que aparece al analizar datos observacionales es el nivel de ruido de la señal, por lo que ciertos máximos en un periodograma pueden ser espurios y no deberse a ningún fenómeno real. También surgen inconvenientes cuando los datos de la muestra no están equiespaciados en el tiempo, situación muy frecuente en el caso de las observaciones astronómicas. Esto produce los llamados *alias*, es decir, falsos períodos.

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

2. Metodología

Para realizar las simulaciones partimos de una curva de luz sintética de una estrella binaria eclipsante (Alberici Adam, 2022), con un período orbital de 2.87 días, generada utilizando el programa 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 R funciones sinusoidales que emulan modos de pulsación no radiales, y una función analítica que simula el comportamiento de una pulsación radial. En todos los casos se aplicó un ruido ARMA(1,1) (Whittle, 1951). Se obtuvieron 9 modelos¹ cuyas características se detallan en la Tabla 1; las respectivas curvas sintéticas se muestran en la Figura 1.

El análisis de cada modelo se realizó utilizando el paquete **WaveletComp**² (Roesch & Schmidbauer, 2018). Para esto cada curva fue separada en dos partes, debido a que presentan un salto de aproximadamente cuatro días que el programa no

¹Las curvas sintéticas generadas en este trabajo se asemejan a curvas de luz observadas en estrellas binarias eclipsantes estudiadas por Shi *et al.* (2022).

²WaveletComp es un paquete de R (<https://www.r-project.org/>) para el análisis continuo de series de tiempo basado en la *wavelet* de Morlet.

Tabla 1: Características de las pulsaciones del diseño de simulación.

Modelo	Tipo	Número	Valor [días]	Amplitud ¹
Modelo N°1	No radial	1	0.7	40
Modelo N°2	No radial	1	1.9	60
Modelo N°3	No radial	2	0.7, 1.9	40, 60
Modelo N°4	No radial	1	5	100
Modelo N°5	No radial	2	0.7, 5	40, 100
Modelo N°6	No radial	3	0.7, 5, 20	40, 100, 100
Modelo N°7	No radial	2	3, 2.9	100, 100
Modelo N°8	Radial	1	0.9	30
Modelo N°9	Radial	1	0.9	100

Nota: (1) Respecto del eclipse primario.

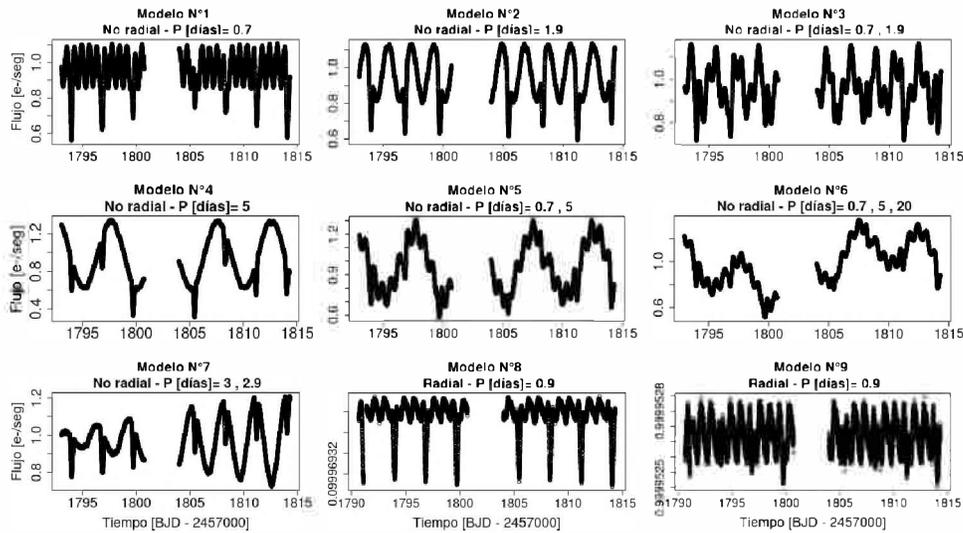


Figura 1: Curvas sintéticas obtenidas a partir del diseño de simulación.

interpreta correctamente. También se utilizó el programa *Period04* (Lenz & Breger, 2005) basado en la transformada de Fourier.

3. Resultados

En la Figura 2 se muestran los escalogramas, la potencia media y la reconstrucción, para la curva Modelo N°3. 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 respectivamente. 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. Dado que el análisis *wavelet* es local en el tiempo, produce una gran cantidad de períodos y, por lo tanto, se ha tomado como referencia el valor medio de cada uno. Para el análisis de Fourier se seleccionaron aquellos períodos con una potencia de 4σ por

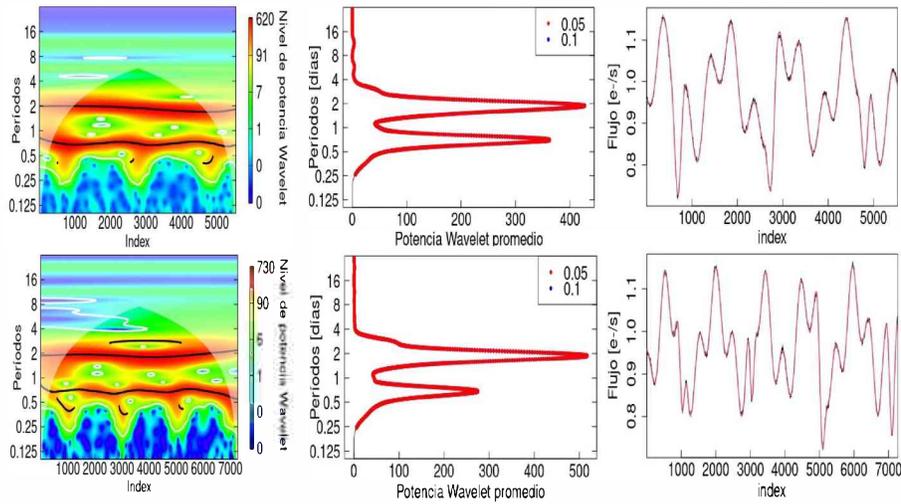


Figura 2: Resultados del análisis *wavelet* para el modelo N°3. De izquierda a derecha los escalogramas, la potencia media a través del tiempo y la reconstrucción, para la primera y segunda parte de la curva, respectivamente.

encima del nivel de ruido. Los períodos obtenidos para cada curva se enumeran en la Tabla 2.

4. Conclusiones

A partir de los resultados que se muestran en la Tabla 2 vemos que en todos los casos fue posible detectar el período orbital. Para los modelos N°2, 3, 4, 5 y 9 este período se encontró, con el análisis *wavelet*, más alejado del valor original con una variación entre $0.02 \leq \sigma \leq 0.09$, en comparación con el análisis de Fourier. Dichos modelos coinciden con una amplitud³ de pulsación entre 60 % y 100 %. En el Modelo N°8, la amplitud³ fue del 30 % y no pudo ser detectada con ninguna de las dos herramientas. En el caso donde las pulsaciones tenían períodos similares al período orbital de la binaria (Modelo N°7), no fue posible con ningún método discernir entre ellos. Ambas técnicas fallaron en detectar de manera exacta el período de 20 días (Modelo N°6).

En general no fue posible recuperar todos los períodos. Aunque se obtuvieron resultados más exactos con el análisis de Fourier, las reconstrucciones obtenidas con *wavelet* resultaron muy satisfactorias. Por otra parte, las diferencias entre los valores encontrados por ambas técnicas posiblemente se deban al hecho de que los modelos fueron generados con funciones sinusoidales, y a la existencia de una brecha que requirió analizar los datos en dos tramos.

³Respecto del eclipse primario.

Tabla 2: Períodos obtenidos (en días) para las curvas simuladas. En rojo: Período orbital del sistema binario. En azul: Período de la pulsación.

Simulación	Período modelado	Período (<i>wavelets</i>)		Período (Fourier)
		Primera Parte	Segunda Parte	
Modelo N°1	2.87, 0.70	2.87, 1.44, 0.70	2.88, 1.44, 0.70	2.87, 1.43, 0.95, 0.70, 0.57, 0.47
Modelo N°2	2.87, 1.90	11.66, 5.72, 2.90, 1.89, 0.97, 0.72, 0.51	2.88, 1.90, 0.98, 0.71, 0.54	2.86, 1.91, 1.43, 0.95, 0.71, 0.57, 0.47
Modelo N°3	2.87, 1.90, 0.70	12.06, 6.10, 2.89, 1.88, 0.70	2.81, 1.91, 0.70	2.86, 1.43, 1.91, 0.95, 0.69, 0.57, 0.47
Modelo N°4	5, 2.87	11.35, 5.70, 3.93, 1.40	23, 11.50, 4.77, 2.78, 1.39, 0.95, 0.71	5, 2.87, 1.43, 0.95, 0.71, 0.57, 0.47
Modelo N°5	5, 2.87, 0.70	11.46, 5.72, 3.93, 2.78, 1.33, 0.70	22.91, 11.45, 4.80, 1.44, 0.70	5, 2.87, 1.43, 0.95, 0.69, 0.57, 0.47
Modelo N°6	20, 5, 2.87, 0.70	11.42, 5.67, 3.87, 2.86, 1.35, 0.70	22.84, 11.42, 4.68, 2.86, 1.43, 0.68	25, 12.91, 4.89, 2.86, 1.43, 0.95, 0.69, 0.57, 0.47
Modelo N°7	3, 2.90, 2.87	10.92, 5.63, 2.89, 1.44, 0.92, 0.72, 0.49	10.88, 5.43, 2.87, 1.43, 0.95, 0.72, 0.50	3, 2.83, 1.43, 0.95, 0.71, 0.57, 0.47
Modelo N°8	2.87, 0.9	2.86, 1.42, 0.68	2.89, 1.44, 0.67	2.86, 1.43, 0.95, 0.71, 0.57, 0.47
Modelo N°9	2.87, 0.9	2.82, 1.48, 0.93, 0.45	2.81, 1.44, 0.91, 0.48	2.85, 1.42, 0.95, 0.90, 0.71, 0.57, 0.46

Estos resultados⁴ permitirán interpretar períodos detectados 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. Además se buscará estimar los errores en los períodos calculados utilizando simulaciones Monte Carlo u otras.

Referencias

- Aerts C., Puls J., Godart M., Dupret M. A., 2009, A&A, 508, 409
 Alberici Adam A., 2022, <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/137365>
 Lenz P., Breger M., 2005, Comm. in Asteroseismology, 146, 53
 Lomb N. R., 1976, Ap&SS, 39, 447
 Murphy S., 2018, doi:10.5281/zenodo.1739520
 Prša A., et al., 2016, ApJS 227, 29
 Ricker G. R., et al., 2014, doi:10.1117/12.2063489
 Roesch A., Schmidbauer H., 2018, <https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp>
 Sana H., et al., 2012, Science, 337, 444
 Scargle J. D., 1982, ApJ, 263, 835
 Shi X., Qian S., Li L., 2022, doi:10.3847/1538-4365/ac59b9
 Whittle P., 1951, <https://books.google.com.ar/books?id=k-KCNAACAAJ>

⁴Este proyecto ha recibido financiación del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea, Horizonte 2020 (2014–2020), bajo el acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie N° 823734.