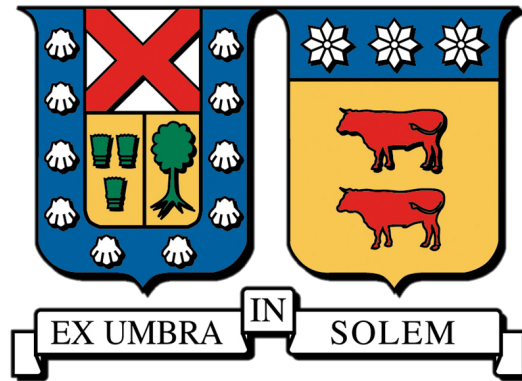


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



ESTUDIO DEL CAMBIO DE PERÍODO DEL SISTEMA BINARIO

ECLIPSANTE HS 0705-6700

ANTONIETA ROCIO SOTO MIRANDA

Tesina para optar al grado de licenciatura en Ciencias, mención Física

Profesora: Dra. Pía Amigo

Comité de revisión: Dra. Odette Toloza, Dr. Hugo Alarcón

8 de octubre de 2024

Abstract

Los sistemas binarios eclipsantes de post envoltura común son importantes ya que son fuente de investigación para diferentes parámetros físicos. Además, son progenitores de sistemas muy interesantes y exóticos. En esta investigación se estudió el sistema binario eclipsante HS 0705-6700, que presenta variaciones temporales en sus eclipses (ETVs). Se utilizaron datos obtenidos por el telescopio espacial *TESS* entre los años 2019 y 2024, con diferentes tiempos de exposición (20 – 1800s), para determinar su periodo orbital y construir un diagrama O-C usando una efeméride lineal. Utilizando *PERIOD04* se midió un período de $0,095645705 \pm 4,9 \times 10^{-8}$ d lo cual es 0.08s más corto que los reportados en la literatura. En el diagrama O-C se observó la continuación de la tendencia de que el período se está retrasando en comparación a lo calculado. Se concluyó que a pesar de que no hay cambio significativo entre el período obtenido con los datos de *TESS* en los últimos años y los períodos obtenidos por autores anteriores, si se puede ver un cambio de período en un intervalo de tiempo mayor. Por otro lado, se concluyó que el comportamiento que se muestra en el diagrama O-C no es debido a errores sistemáticos, sino a que son cambios que están sucediendo en el sistema, ya que la tendencia es visible por lo datos obtenidos los últimos años. El propósito del desarrollo de esta investigación es contribuir a la construcción de un diagrama O-C para el sistema en cuestión con datos de un tiempo lo bastante largo para poder encontrar una respuesta a cuál es el mecanismo que está cambiando el período.

Agradecimientos

Durante este proceso llamado vida, estoy agradecida con muchas personas, empiezo con estas palabras porque, al fin y al cabo, el pregrado es parte de la vida y las personas más importantes que están en mi vida también me acompañaron durante este proceso. Es bastante difícil decidir por quién comenzar a dar las gracias, pero seguiré un orden cronológico. Quiero dar gracias a mi familia, en primer lugar, a mi madre que me dio la vida y me ha apoyado, ayudado y dado consejo durante todos estos años, quiero seguir con mi papá quien también me ha ofrecido apoyo y ayuda durante toda la vida. Por otro lado, a mis hermanos, gracias a ellos porque me dieron diferentes puntos de vista de la vida y me dieron ejemplos buenos, para seguirlos y cometieron errores por mí de los que pude aprender.

Quiero dar gracias especiales al profesor de enseñanza básica Roberto Vargas, por la motivación para seguir mis sueños y para esforzarme por estos. Ahora, gracias a las personas que estuvieron durante mi proceso de formación durante la enseñanza media, a los profesores por hacer su trabajo de forma comprometida y motivar a un buen entendimiento y pasión por la ciencia. Gracias a mis amigas y amigos por darme su apoyo y compañía. Gracias especiales a Natalia Carvajal que ha estado durante mucho tiempo a mi lado como amiga, su compañía ha hecho este camino mucho más ameno y alegre.

Durante la universidad, también hubo compañeros y amigos que me motivaron a seguir con el proceso, gracias a mi amiga Tamara Fuenzalida, por su compañía y a mis amigos de licenciatura en Física, que me ayudaron a continuar en un momento difícil de mi vida, haciéndome compañía de forma personal y también académica, especialmente a Tamara y Barbara por su apoyo y por su permanencia en Física, que me enseñó que las mujeres también podemos surgir en la ciencia. Gracias al grupo de mentorías, que a pesar de ser yo mentora, compartir con ellas me ayudó mucho más a mí desde mi perspectiva. En este período también me ayudaron mucho para mantenerme estable el equipo de salud mental, tanto de la universidad como particular y especialmente a María Cecilia Verdugo, por su hospitalidad, amistad, apoyo, infinita ayuda y comprensión.

Gracias muy especiales e infinitas a mi profesora guía, Pía Amigo, por su compromiso con ayudarme y realizar una tesina completa, gracias por el tiempo que me dedicó incluso en las preguntas más básicas que realicé, gracias por presentar un tema interesante y mostrarlo de forma amena para tener un genuino interés en este. Gracias también a la profesora Odette Toloza, gracias a ella aprendí muchísimo sobre astrofísica durante las asignaturas y también por ser la profesora correferente para la investigación en la tesina. Por último, gracias a Pablo Fernández, su análisis de los datos facilitó mucho mi trabajo durante la metodología para el desarrollo de esta investigación.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Sistemas binarios post envoltura común	2
1.2. Mecanismos que cambian el período de un sistema binario	4
1.2.1. Presencia de un tercer cuerpo	4
1.2.2. Mecanismo Applegate	5
1.2.3. Pérdida de momento angular	5
1.2.4. Movimiento apsidal	5
1.3. Sistema binario eclipsante post envoltura común: HS 0705+6700	6
1.4. Objetivos	7
2. Metodología	8
2.1. Series de tiempo	8
2.2. Satélite de Exploración de Exoplanetas en Tránsito (<i>TESS</i>)	9
2.3. Determinación de Período con PERIOD04	12
2.4. Construcción diagrama O-C	17
3. Resultados y Discusión	19
3.1. Período orbital de HS 0705+6700 usando <i>TESS</i>	19
3.2. Variaciones temporales del eclipse detectados en O-C no son errores sistemáticos	21
4. Conclusiones	23
A.	27

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas binarios de estrellas son sistemas compuestos por dos estrellas ligadas gravitacionalmente, que giran alrededor de un baricentro. Hoy en día se sabe que la mayoría de las estrellas son parte de un sistema binario o múltiple (Iben and Tutukov, 1991). La mayoría de estos sistemas están lo suficientemente separados como para evolucionar de tal manera como si fueran estrellas aisladas (Parsons, 2012). Por otro lado, un 25 % de estos sistemas interactúan entre si en algún momento de su evolución (Willems and Kolb, 2004), por lo tanto la evolución individual de cada componente se verá afectada por la compañera. Esta interacción tiene lugar cuando una de las estrellas alcanza el lóbulo de Roche, una imagen representativa de éste es la Figura 1.1. El que corresponde a la superficie equipotencial más baja que envuelve a ambos miembros (Akabane et al., 2001). Cuando se alcanza este límite hay una transferencia de material entre las estrellas.

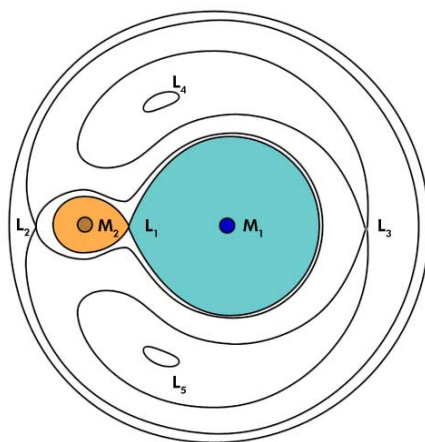


Figura 1.1: Representación gráfica del lóbulo de Roche. Las superficies rellenas con colores representan éste. La combinación del potencial gravitatorio de cada estrella y el potencial centrífugo crean el potencial del sistema, conocido como la geometría de Roche (Parsons, 2012). Lejos de la estrella la superficie equipotencial es distinta de esférica como lo es cuando estamos más cerca de ésta. También se distorsiona la forma de la superficie ya que el material no está conectado a la estrella como lo está más cerca de ésta. Las líneas del equipotencial de Roche dependen específicamente de la relación de las masas $q = M_1/M_2$, donde la escala está determinada por a , la separación orbital.

Cuando el miembro más masivo de un sistema binario se aleja de la secuencia principal (figura 1.2) y comienza a expandirse, se puede expandir más allá del lóbulo de Roche. Si esto ocurre entonces el

material comienza a transferirse a su compañera menos masiva. Debido a la conservación del momento angular, la separación de las estrellas debe disminuir, lo que conduce a la reducción al tamaño del lóbulo de Roche. La estrella que recibe el material no puede reajustarse lo suficientemente rápido a la masa adicional, por lo tanto, el material acreta y se acumula en una manta caliente sobre su superficie hasta que también alcanza su lóbulo de Roche, en ese momento se desarrolla una *envoltura común* (CE por sus siglas en inglés, common envelope). La CE puede no estar girando con el sistema binario, en ese caso, ambas estrellas experimentan una fuerza de arrastre, lo que hace que las dos estrellas giren en espiral hacia adentro. Se plantea que, cierta fracción de la energía antes comentada del sistema binario se utiliza para la expulsión de la CE (Parsons, 2012).

El proceso antes descrito usualmente da lugar a binarias muy cercanas y su evolución lleva a la creación de algunos de los objetos más interesantes de la galaxia, tales como variables cataclísmicas, binarias de rayos X de baja masa, estrellas sub-enanas tipo B, sistemas degenerados dobles, progenitores de explosiones de rayos gamma cortas y púlsares de milisegundos, sin embargo, aún no se tiene un entendimiento total de la evolución de estos objetos y sus progenitores.

Para entender la evolución es crucial tener varios sistemas caracterizados es decir: medir sus parámetros estelares y orbitales como el período con mayor precisión. Solo un pequeño número de estos sistemas binarios post envoltura común, son eclipsantes, es decir que gracias a su orientación respecto a la Tierra podemos observar cómo las estrellas se eclipsan una a la otra periódicamente (Wolf et al., 2021; Rattanamala et al., 2023), lo que ayuda a medir el período orbital con precisión, el cual es uno de los parámetros más importantes en sistemas binarios para entender la evolución de estos.

1.1. Sistemas binarios post envoltura común

Los sistemas binarios de post envoltura común son la continuación de la evolución luego de la CE. Están normalmente compuestos por dos cuerpos, uno primario y otro secundario. El objeto primario es comúnmente un objeto compacto, ya sea una enana blanca o una subenana (ver Figura 1.2). Mientras que el objeto secundario, es normalmente una estrella de secuencia principal o una enana marrón (ver Figura 1.2). Los PCEB se caracterizan por presentar períodos de pocos días o hasta horas y también porque se acercan lentamente en espiral debido a la pérdida de momento angular (ver Sección 1.2.3).

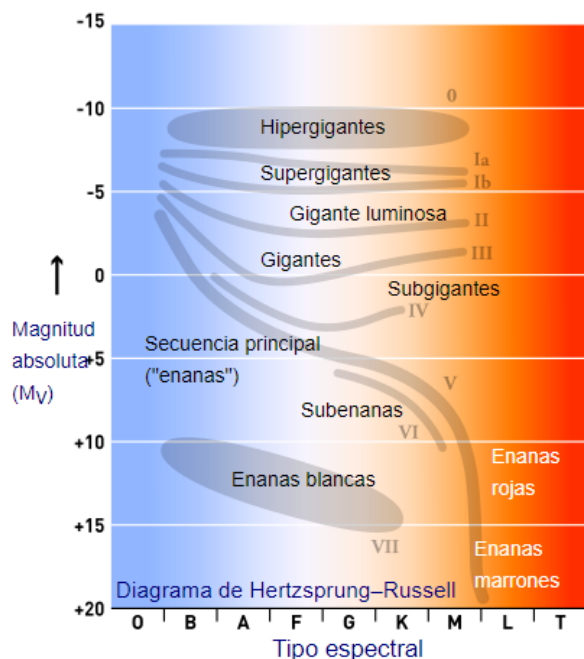


Figura 1.2: Diagrama Hertzsprung-Russel (H-R), representa la evolución de las estrellas, el cual muestra la luminosidad de los distintos tipos de estrellas en función de la temperatura usando la nomenclatura de tipo espectral (O, son estrellas muy calientes y se enfrían hasta llegar a la letra T). Dentro de los distintos tipos de estrellas, 4 tipos son relevantes de entender para esta investigación. Una subenana caliente representa un estado evolutivo avanzado de la estrella donde ha perdido sus capas externas mientras el núcleo aún está quemando helio, se encuentran justo arriba de la palabra secuencia en el diagrama. Luego, las enanas blancas son un tipo de estrellas que tiene aproximadamente la masa del Sol y el tamaño de la Tierra, por lo que se consideran masivas, y que a diferencia de las subenanas calientes estas no están quemando helio. También, estrellas de secuencia principal, son estrellas que, en su núcleo, debido a reacciones nucleares, están haciendo fusión de hidrógeno a helio. Por último, una enana marrón es un tipo de objeto que debido a su baja masa no logra tener reacciones nucleares en su núcleo (Carroll and Ostlie, 2017).

Algunos PCEBs son sistemas eclipsantes que podrían presentar variaciones en los tiempos del eclipse (ETVs por sus siglas en inglés, eclipsing time variations). Los ETVs son un fenómeno que ocurre en estos sistemas y tal como lo dice su nombre es una variación en el tiempo que ocurre el eclipse, o un cambio en el período. Este fenómeno se puede detectar mediante un diagrama llamado O-C (observado menos calculado). En este diagrama lo observado es el tiempo en que ocurre el eclipse, y que para un fenómeno periódico se puede calcular como una simple expresión lineal conocida como efeméride Ecuación 1.1.

$$T = T_0 + P \times E \quad (1.1)$$

Donde T corresponde al tiempo en el que se predice que el eclipse ocurrirá medido en fecha juliana Baricéntrica (BJD por sus siglas en inglés y corresponde a como si observáramos el eclipse desde el sol), luego \$T_0\$ corresponde al tiempo en BJD que se considera como la primera fecha del eclipse medio (figura 2.1), P corresponde al período del sistema, por último E corresponde a la época o ciclo, que se refiere a la cantidad de veces que ha ocurrido el eclipse desde la primera vez que se observó. La idea detrás de la construcción del diagrama O-C es que si no hubiera variaciones por distintos motivos en el período, en nuestro caso, de un sistema binario eclipsante, durante el tiempo se mantendría constante. Lo que podría no suceder debido a que hay mecanismos que pueden provocar un cambio en el período. Al observar un

O-C por un período de tiempo muy extendido (por años) se puede estudiar si existen variaciones en el período orbital ([American Association of Variable Star Observers, 2024b](#)).

Existen algunos sistemas binarios eclipsantes PCEB que presentan ETVs, dentro de los sistemas más estudiados están los tabulados en la Tabla 1.1. Las causas de las variaciones de estos sistemas, aún no es clara, sin embargo se postulan algunas ideas que se explicarán a continuación.

Sistema	α (J2000)	δ (J2000)	Distancia (pc)	Período (d)
DE CVn	13 26 53.27	+45 32 46.68	30.513	0.3641
GK Vir	14 15 36.41	+01 17 18.22	493.02	0.3443
NN Ser	15 52 56.12	+12 54 44.42	514.45	0.1301
QS Vir	13 49 52.00	-13 13 37.00	50.21	0.1508
RR Cae	04 21 05.56	-48 39 07.06	21.18	0.3037
RX J2130+4710	21 30 18.46	+47 10 07.40	80.02	0.5210
SDSS 0110+1326	01 10 09.09	+13 26 16.37	272.90	0.3327
SDSS 0303+0054	03 03 08.36	+00 54 43.92	120.50	0.1344

Tabla 1.1: Tabla resumen de principales características de sistemas que presentan ETVs.

1.2. Mecanismos que cambian el período de un sistema binario

Debido a que los sistemas post envoltura común están formados por un objeto primario caliente y de menor radio (i.e. enana blanca o subenana caliente) y un componente secundario más frío y mayor radio se produce un eclipse bastante profundo, por esto es posible encontrar cambios muy pequeños en los períodos mediante el diagrama O-C ([Rattanamala et al., 2023](#)). En la literatura existen cuatro posibles explicaciones que producen ETVs, que se detallarán a continuación.

1.2.1. Presencia de un tercer cuerpo

La presencia de un tercer cuerpo, actúa sobre el sistema de tal forma que cambia el baricentro del sistema completo, es decir las binarias y el tercer cuerpo. Esto retrasa o adelanta los tiempos de los eclipses a través de variaciones en el tiempo de viaje de la luz (LTT por sus siglas en inglés, light-travel-time) ([Irwin, 1959](#)). Este cuerpo puede ser circumbinario, es decir que orbita el sistema binario completo o circunstellar, es decir que orbita sólo una de las componentes. Este tercer cuerpo puede ser un planeta o una enana marrón, podemos ver la posición de una enana marrón en la evolución de una estrella en el diagrama HR en la Figura 1.2. Si el baricentro se acerca a la Tierra, los eclipses primarios ocurrirán antes de lo esperado; por el contrario, si el baricentro se aleja de la Tierra, los eclipses ocurrirán más tarde de lo esperado ([Pulley et al., 2015](#)). Por otro lado, el origen de un tercer cuerpo es bastante complejo y no está claro. Pueden que sean planetas de primera generación, es decir formados por material del disco protoplanetario antes del evento CE o sean objetos subestelares de segunda generación, es decir, formados por el material que ha perdido la enana blanca ([Han et al., 2018](#)). En este último artículo se plantea un rango de masas en la que puede estar el tercer cuerpo de acuerdo a su inclinación. Si la inclinación es mayor o igual a $51,8^\circ$, entonces las masas varían entre $0,011M_\odot \leq M_3 \leq 0,014M_\odot$, lo que corresponde probablemente a un planeta gigante, por otro lado, si la inclinación es mayor o igual a $8,4^\circ$, la masa del tercer cuerpo es $M_3 \leq 0,075M_\odot$, que puede corresponder a una enana marrón o un planeta, por último sin un planeta es coplanar con el sistema binario sería un planeta gigante.

1.2.2. Mecanismo Applegate

A medida que las estrellas del sistema pasan por distintos ciclos de actividad, las partes externas de éstas están sujetas a un par magnético, que cambia la distribución de momento angular y su achatamiento. Esto produce un cambio en el período en ciclos con una escala de tiempo determinada, ya que la órbita está directamente relacionada a la variación de la forma de las estrellas y ésta varía en ciclos (Applegate, 1992). Este mecanismo tiene el efecto de modular el período con amplitudes grandes en escalas de tiempo de décadas o más (Parsons et al., 2010).

Se puede comprobar que el cambio del período sea debido a este mecanismo calculando la energía necesaria para impulsar el cambio a través de este mecanismo y comparándola con la cantidad total de energía disponible para la estrella en secuencia principal (Parsons, 2012). Si la energía total disponible es menor que el mínimo requerido para impulsar el cambio de período a través del mecanismo, entonces se requiere otra explicación para el cambio del período. Por otro lado, si la energía está disponible no significa que el cambio de período sea causado por el mecanismo de Applegate, si no que es una posible causa (Parsons, 2012).

1.2.3. Pérdida de momento angular

El tiempo en el que ocurren los eclipses pueden ir haciéndose cada vez más cortos si el período orbital disminuye debido a la pérdida de momentum angular del sistema. Para la pérdida de momento angular existen dos mecanismos que la pueden explicar, el frenado magnético o la radiación gravitatoria, que serán explicados a continuación.

En el mecanismo de frenado magnético las partículas cargadas de la estrella, que quedaron de la fase de secuencia principal, son atrapadas por su viento magnetizado y éstas se ven obligadas a co-rotar con el viento magnetizado. Al arrastrar estas partículas, la estrella transfiere un momento angular que ralentiza su rotación. En sistemas binarios que por naturaleza son más cercanos, tanto el período rotacional como orbital están sincronizados, lo que significa que el momento angular se escapa de la órbita binaria, y esto hace que el período disminuya. En el apéndice A de trabajo de Knigge et al. (2011) se pueden ver un compilado de varias formulaciones. A pesar de esto, este fenómeno no se comprende por completo aún.

Otro mecanismo de pérdida de momentum angular es debido a la emisión de ondas gravitacionales. Un fenómeno común en sistemas binarios donde la emisión dependerá de que tan masivas son las estrellas que contenga la binaria y que tan cerca están. Una formulación analítica que depende de las masas de los componentes de la binaria y el período orbital es presentada en el artículo (Paczynski, 1967).

En el caso de de los sistemas PCEB, el momento angular perdido por frenado magnético es bastantes órdenes de magnitud mayor que el que se pierde por frenado gravitacional. Sin embargo, en muchos sistemas la estrella secundaria tiene una masa inferior a $0.3M_{\odot}$, lo que implica una atmósfera convectiva y por lo tanto, no debería producirse frenado magnético (Parsons, 2012).

1.2.4. Movimiento apsidal

El movimiento apsidal es la precesión de la línea de ápsides (línea que une los puntos de una órbita elíptica más próximos o más lejanos al cuerpo alrededor del que se está girando) en una órbita, generalmente en la misma dirección que el movimiento del cuerpo secundario. Para un sistema binario con una órbita excéntrica, la diferencia de fase entre el eclipse primario y el secundario depende del argumento del

periastrón ω (punto de la órbita de un cuerpo que orbita a otro más cercano al cuerpo que está orbitando). Si ω cambia con el tiempo, entonces los tiempos del eclipse primario y secundario no seguirán efemérides lineales simples. Cuando los tiempos del eclipse primario y secundario se ajustan a una efeméride común (los parámetros libres para este ajuste son el período común del eclipse primario y la diferencia de tiempo promedio entre los eclipses primario y secundario), los residuos en el diagrama O-C son aproximadamente sinusoidales con fases opuestas. Cuando se dispone de tiempos de eclipse durante un intervalo de tiempo suficientemente largo, entonces el período apsidal (por ejemplo, el tiempo que tarda ω en cambiar en 360°) se puede encontrar a través del diagrama O-C.

Matemáticamente, el movimiento apsidal se puede calcular como resultado de perturbaciones de una órbita kepleriana que incluyen una contribución de la relatividad general, contribuciones de marea y rotacional, y posiblemente una contribución de un tercer cuerpo (Dimoff and Orosz, 2023).

1.3. Sistema binario eclipsante post envoltura común: HS 0705+6700

El sistema HS 0705+6700 (o V470 Cam) es un sistema de post envoltura común y eclipsante que presenta ETVs en su diagrama O-C (en la Figura 1.3 se resalta con un óvalo celeste los cambios más notorios). El aumento en el O-C indica que la órbita está aumentando su separación, ya que el eclipse está sucediendo después de lo esperado. Este sistema está compuesto por un componente primario que corresponde a una sub-enana tipo espectral B, es decir tiene una temperatura superficial alrededor de 20.000 K. El componente secundario de este sistema corresponde a una estrella enana tipo M, es decir una estrella cuya temperatura superficial rodea los 3000 K. El estudio de la curva de luz indicó que el componente secundario tiene una masa y un radio de $0.13 M_\odot$ y $0.19 R_\odot$ respectivamente. En la Tabla 1.2 se encuentran las características principales del sistema.

Sistema	α (J2000)	δ (J2000)	Período (d)	Distancia (pc)
HS 0705-6700	071042,05	+670037,58	0,09564660	$1266,624 \pm 51,49$

Tabla 1.2: Tabla resumen de principales características del sistema HS 0705+6700.

Las observaciones de Qian et al. (2009) sugirieron que el período del sistema binario tenía un componente cíclico superpuesto con un período de 7.15 años y una amplitud del tiempo de viaje de la luz de 92.4s, en este análisis se descartó un cambio de período debido al movimiento apsidal, el mecanismo Applegate y la pérdida de momento angular, los anteriores explicados en la Sección 1.2 y se concluyó que la causa más probable del cambio de período era la presencia de un compañero circumbinario enano marrón de masa $39.5 M_J$, es decir un tercer cuerpo, también explicado en la Sección 1.2. Otros trabajos de este mismo autor en los años 2010 y 2013, Çamurdan et al. (2012) y Beuermann et al. (2012) han reforzado la predicción antes descrita con datos de 15 años que abarcan aproximadamente 1,7 períodos circumbinarios. Una revisión de Qian et al. (2009) sugirió una compañera circumbinaria enana marrón de masa $32 M_J$, con un período de 8.87 años. Por otro lado, las observaciones de Pulley et al. (2015) confirmaron inicialmente estos hallazgos, pero luego señalaron que los datos posteriores a febrero de 2015 indicaban una desviación del modelo circumbinario propuesto, esta desviación fue confirmada por Pulley et al. (2018). El análisis de los datos hecho por Bogensberger et al. (2017) utilizando una efeméride lineal, volvieron a validar la predicción de la enana marrón circumbinaria pero con un período significativamente más largo de 11.8 años (Faillace et al., 2019a). El último estudio de este sistema fue hecho por Er et al. (2024) y presenta un modelo que explica el cambio de período mediante la existencia de múltiples enanas marrones, sin embargo, concluye que la órbita del sistema es inestable en escalas de tiempo cortas. El

último estudio realizado, ha reforzado la idea de que el mecanismo de Applegate no puede explicar el cambio de período en este sistema a no ser que exista un quinto cuerpo, por otro lado plantea la existencia de varios cuerpos ya que el modelo de esto concuerda con el comportamiento de los datos. Por último, concluye que es necesario el estudio del sistema por más tiempo para asegurar la existencia de cuerpos adicionales (Er et al., 2024).

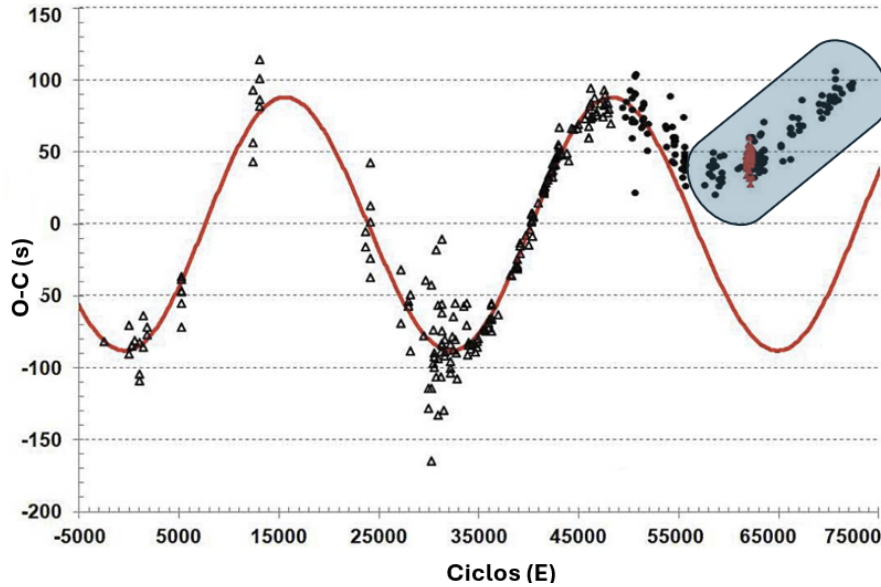


Figura 1.3: Diagrama O-C presentado por Faillace et al. (2019a). Se puede ver como en los últimos ciclos hay un comportamiento diferente respecto a los diagramas O-C para sistemas binarios eclipsantes que presentan un comportamiento sinusoidal y comienzan a subir los datos en el eje y, los datos resaltados en el gráfico (ovalo celeste), lo que indica que la órbita está aumentando su radio.

1.4. Objetivos

El objetivo general de esta investigación es analizar la curva de luz y analizar si con los datos obtenidos por *TESS* es posible la determinación del mecanismo que está cambiando el período en el sistema. Por otro lado, los objetivos específicos son mostrar que los **cambios que se han visto en el diagrama O-C del sistema elegido, se deben a cambios físicos reales que ocurren en el sistema y no por errores en la mediciones debido a los instrumentos o cálculos.** El segundo objetivo específico es **contribuir al diagrama O-C construido** en la literatura con más puntos para observar el comportamiento que está teniendo este sistema últimamente en el tiempo y también con respecto al pasado, los puntos agregados serán con información obtenida los años 2019 y 2021-2024 desde el telescopio espacial *TESS* y ayudarán a la investigación de este sistema ya que se cree que es necesario un estudio prolongado para conocer de manera exacta qué mecanismo está provocando el cambio de período en el sistema. El tercer objetivo específico es **construir un diagrama de comparación entre los períodos obtenidos** de manera observacional en este trabajo con los períodos calculados de manera observacional de la literatura. Esta comparación reafirmará el cambio de período significativo en el tiempo, además el período obtenido en este trabajo puede dar certeza del cambio del período gracias a que los datos de *TESS* son muy precisos y también son una gran cantidad, tiene archivos de hasta 103,880 datos para la curva de luz.

Capítulo 2

Metodología

Para la mejor comprensión del desarrollo de este trabajo, es importante definir algunos conceptos importantes, sobre el trabajo con series de tiempo. También, se introducirá información acerca de la herramienta que se utilizó para la obtención de los datos.

2.1. Series de tiempo

La curva de luz es una gráfica del brillo de un objeto celeste o región, en función del tiempo, o; representación visual de la evolución en el tiempo de la luminosidad (Akabane et al., 2001). Éstas se utilizan para estudiar diferentes objetos celestes, como estrellas variables, exoplanetas y supernovas. El análisis de la forma y el patrón de la curva de luz permite la inferencia de información tal como propiedades físicas, o naturaleza de la variabilidad que se observa.

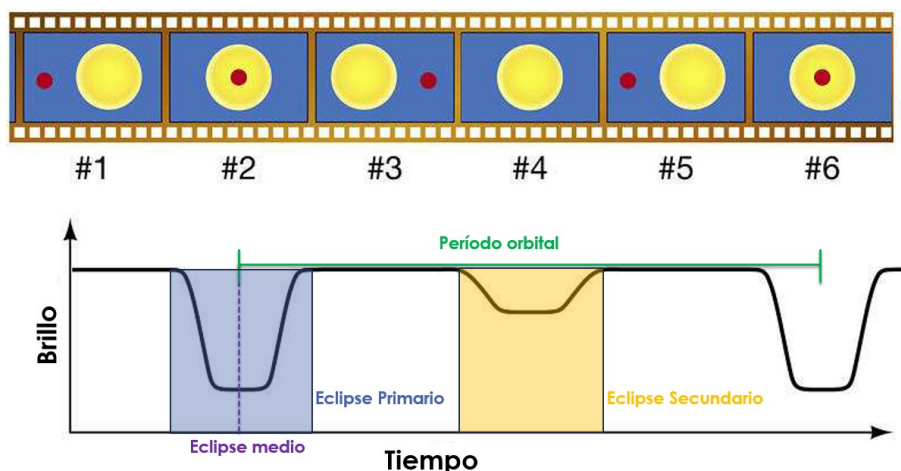


Figura 2.1: Imagen representativa de una curva de luz de acuerdo a lo que sucede cuando se eclipsan las componentes del sistema binario eclipsante y de como el brillo cambia en función del tiempo debido a los eclipses. Se puede identificar el ingreso y egreso del eclipse primario (banda azul) y secundario (banda naranja). También la figura muestra el *mid-eclipse* o eclipse medio, el cual es justo el tiempo en que las estrellas están alineadas a lo largo de la línea de la visión. Finalmente, el tiempo en que algún snapshot vuelve a ocurrir (i.e. tiempo entre los eclipse medios de eclipse primario) es el periodo orbital, el cual está representado en la figura por la línea horizontal verde.

En la Figura 2.1 podemos ver un ejemplo de una curva de luz de un sistema binario eclipsante. Cada

punto de esta gráfica representa una medición tomada en un momento específico. Una curva de luz de un sistema eclipsante tiene distintos elementos. Como el eclipse primario, el eclipse secundario y *mid-eclipse* (eclipse medio). El eclipse primario corresponde al eclipse con mayor profundidad (sombra azul en la figura 2.1 muestra el ingreso y egreso del eclipse primario), mientras que el secundario es el que tiene menor profundidad (sombra naranja en la figura 2.1). Algunas veces, este último puede no detectarse. El eclipse medio corresponde justo al tiempo en que se encuentra a la mitad de tiempo entre el ingreso y egreso del eclipse (línea segmentada morada en la figura 2.1). Para este trabajo es crucial el análisis de ésta para la obtención del período mediante sus eclipses (primario o secundario). El período corresponde al tiempo en el que el eclipse (primario o secundario) vuelve a ocurrir. Podemos ver en la Figura 2.1 representado en verde el período orbital. Para la determinación del período de una curva de luz se usa una herramienta llamada periodograma, que corresponde a la transformada de Fourier de la curva de luz, este se usa para determinar períodos dominantes en las curvas de luz (más detalles en la sección 2.3).

2.2. Satélite de Exploración de Exoplanetas en Tránsito (*TESS*)

TESS son las siglas para Transiting Exoplanet Survey Satellite, en español, Satélite de Exploración de Exoplanetas en Tránsito. *TESS* es un telescopio espacial, que fue lanzado en abril del 2018 por la NASA, con la misión de encontrar exoplanetas (Ricker et al., 2015). El método de detección que ocupa *TESS* es tránsito, el cual consiste en detectar una atenuación en la luminosidad de una estrella debido a que ésta es eclipsada por otro objeto, en este caso un planeta, y que es una herramienta muy útil para este trabajo. *TESS* se centra en estrellas cercanas y brillantes, con el objetivo de descubrir exoplanetas que puedan seguir siendo observados por otros telescopios, para caracterizar sus atmósferas y otras propiedades. El propósito es encontrar una amplia variedad de planetas, tanto rocosos como gaseosos alrededor de estrellas con diferentes características.

El tamaño en píxeles de los detectores de *TESS* son de aproximadamente $21''$, lo que corresponde a $21''$ cielo por cada píxel. *TESS* está equipado con 4 cámaras con 4 CCD, cada una captura un subsector de $24^\circ \times 24^\circ$, al combinarse todos estos subsectores se obtienen un sector de $24^\circ \times 96^\circ$ (ver figura 2.2). El rango de longitudes de onda en que opera este telescopio de aproximadamente 600-1050 (nm), lo que corresponde aproximadamente al rango visible y también el infrarrojo cercano. *TESS* tiene una estrategia de observación mediante sectores lo que le permite estudiar de manera eficiente el cielo, los sectores se pueden ver en la Figura 2.2.

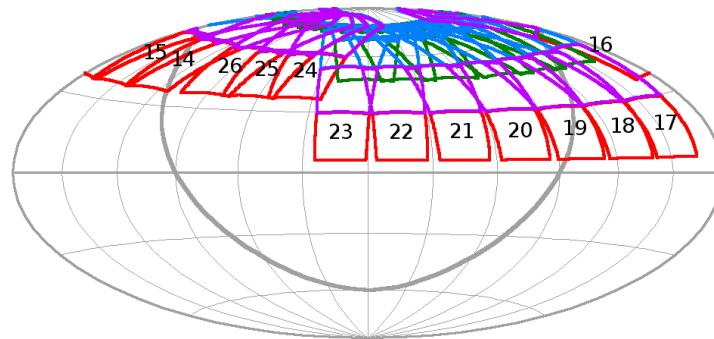


Figura 2.2: Representación de los diferentes sectores que analizó *TESS* el segundo año de su misión. Se puede ver que los sectores están distribuidos en el hemisferio norte del planeta en ese año y consideran todas las latitudes. Cada cuadradito de colores representa lo que cubre una de las cámaras.

Es importante hacer la aclaración de que al hablar de sectores no hablamos sobre diferentes puntos en el cielo, es una terminología usada por *TESS* para referirse a mismos sectores en el cielo pero con años de diferencia. Cada sector cubre una porción de cielo y se superpone con sectores adyacentes para garantizar una cobertura total. Cada sector se observa durante 27 días, y así monitorea continuamente el brillo de miles de estrellas, aunque se centra en algunas específicas en función de criterios como el brillo y la probabilidad de que exista un exoplaneta. Después de este período *TESS* rota al siguiente sector y así recorre todo el cielo a lo largo de la misión, en sus 7 años de misión, los sectores han cubierto toda la superficie de la Tierra ([NASA’s Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2024](#)).

Es importante mencionar que los datos obtenidos de *TESS* son idóneos para esta investigación, por la calidad que tienen, gracias a que es un telescopio espacial el efecto del seeing, que corresponde al efecto que produce la atmósfera de la Tierra en observaciones terrestres, no existe. También *TESS* observa continuamente con diferentes tiempos de exposición, (tiempo que la CCD recibe luz), lo que hace que la cantidad de puntos que contienen la curva de luz sean mucho más, en comparación a telescopios terrestres, que además no pueden observar durante el día. Los datos utilizados para el desarrollo de esta investigación son los datos entregados por *TESS*, que se detallan en la Tabla 3.1

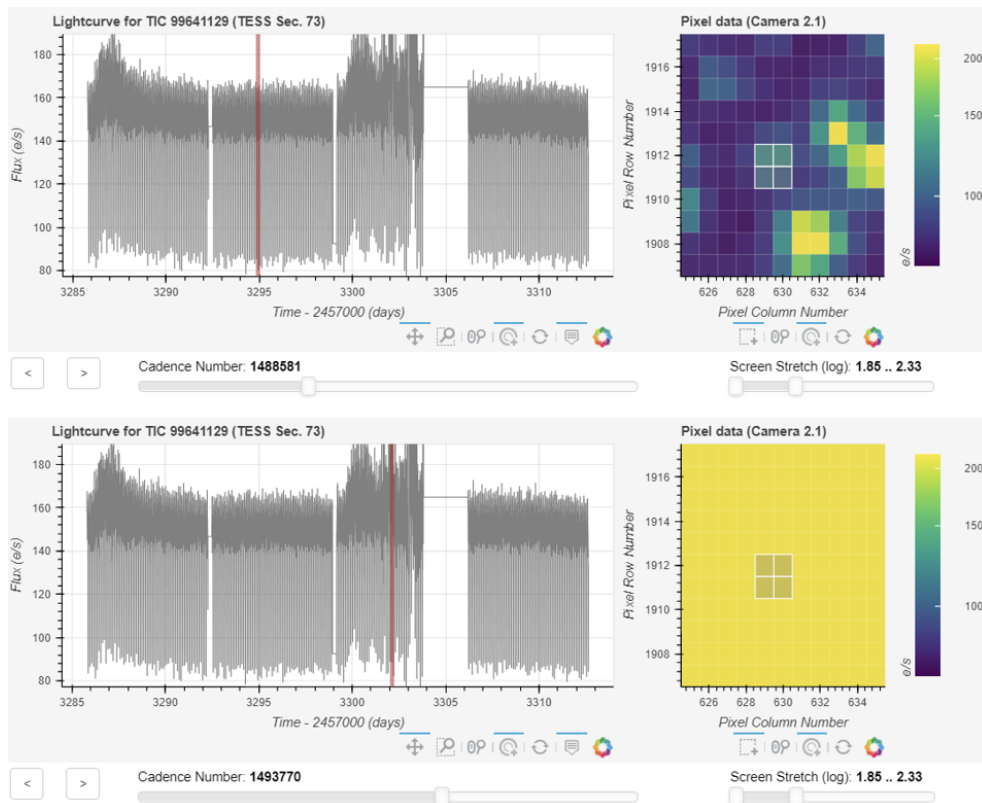


Figura 2.3: visualización de LIGHTKURVE, del código de Python utilizado por Pablo, compañero de investigación. En el lado derecho y arriba se muestra una imagen de *TESS* donde en el centro (cuadrados blancos) se ubica HS 0705+6700. Se utilizan miles de estas imágenes para construir la curva de luz que esta en la derecha (la imagen corresponde al tiempo demarcado con una línea roja vertical). En la parte de abajo, se muestra que en cierto instante (línea roja), la imagen tiene mucho brillo i.e. saturación (se ve toda amarilla). Esta saturación causa los outliers debido a un alto brillo que es falso. Esta saturación es un artefacto instrumental que *TESS* introduce y debe ser considerada al momento de trabajar con las curvas de luz de *TESS*.

Para descargar las curvas de luz de *TESS* se utilizó el paquete en PYTHON llamado LIGHTKURVE versión 2.4.1 desarrolla por el equipo de expertos en exoplanetas para procesar datos de *TESS*. Para descargar un curva de luz hay que seleccionar una apertura (i.e. un número de pixeles) el cual se extraerá el brillo en todas las imágenes. El lado derecho de la Figura 2.3 muestra una imagen de *TESS* donde los cuadrados blancos son los pixeles seleccionados para extraer el brillo. Y la curva de luz construida usando miles de estas imágenes se encuentra en en lado izquierdo de la figura. La curva de luz muestra varias líneas verticales que corresponden a los eclipses primarios. La Figura 2.4 muestra la curva de luz para para el sector 20, y que cada imagen tiene un tiempo de exposición de 120s. El panel de abajo muestra un zoom en una región, y claramente se puede apreciar la presencia de los dos eclipses. El eclipse primario y el eclipse secundario. Para el caso de HS 0705-6700, el eclipse primario ocurre debido a la que la estrella de la secuencia principal pasa en frente de la subenana caliente o hot subdwarf. Mientras que el eclipse secundario es cuando la subenana caliente, que es mucho más pequeña en comparación de tamaños, bloquea solo una parte de la luz de la secuencia principal.

Los datos extraídos de todos los sectores en que *TESS* observó HS 0705-6700 están listados en la Tabla 3.1, y es una tarea realizada por Pablo Fernandez. Los datos están almacenados en formato FITS, que comúnmente se utiliza para almacenar datos astronómicos. Los cuales serán los que se utilizarán para analizar con PERIOD04

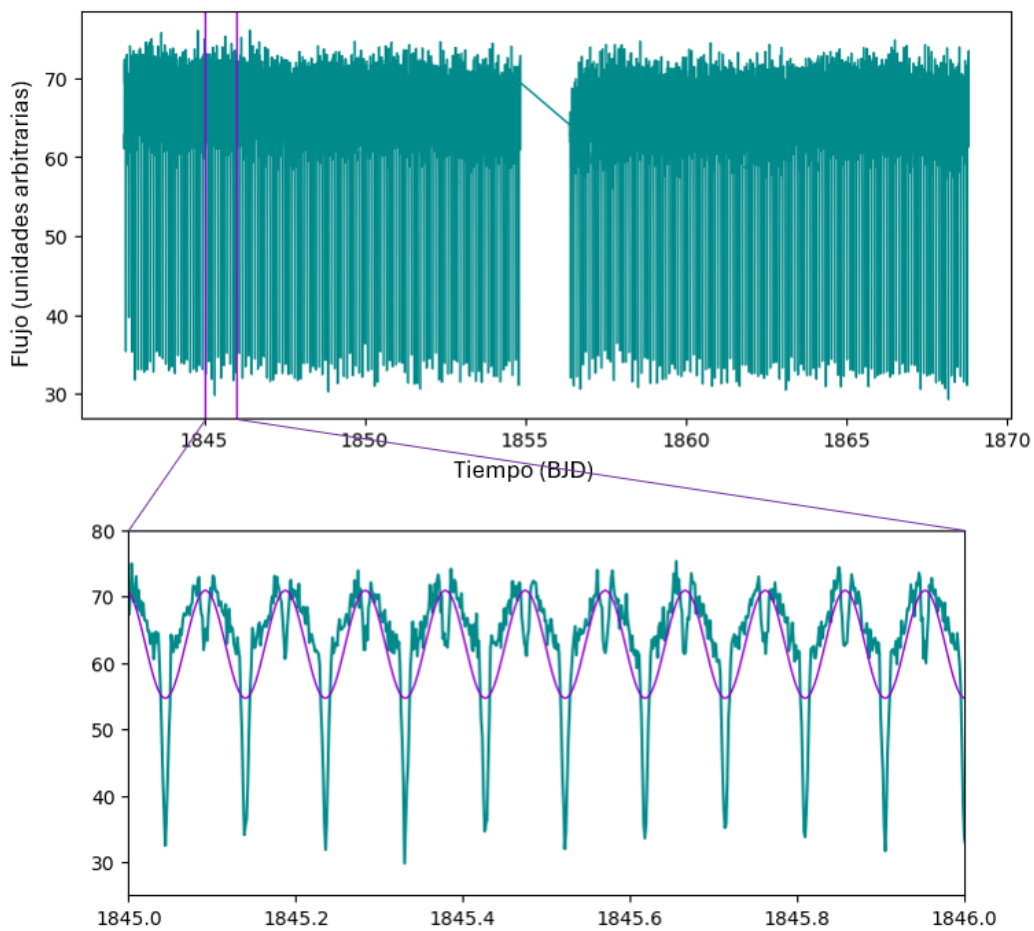


Figura 2.4: Curva de luz de HS 0705+6700 tomada por *TESS* el 2019, en el sector 20 con un tiempo de exposición de 120s. El panel de abajo muestra un zoom en el rango de 1845 y 1846 en BJD, correspondientes a un día.

2.3. Determinación de Período con Period04

Como se ha mencionado anteriormente, una técnica muy utilizada para determinar períodos en series de tiempos es a través de periodogramas. PERIOD04 (Lenz P., 2005) es un programa diseñado para calcular períodos y usa herramientas como análisis de Fourier, para obtener frecuencias desde la curva de luz. A modo de descripción de la metodología y también ejemplificación de ésta, resulta conveniente desarrollar un ejemplo y al mismo tiempo explicar el procedimiento.

Como ejemplo se utilizará los datos tomados por *TESS* el 2019, en el sector 20, con un tiempo de exposición de 120s. Los datos que fueron entregados en formato FITS, son transformados a archivo de texto usando el programa astronómico DS9. Al cargar en PERIOD04 la curva de luz en formato de texto, primero se debe hacer un análisis de los datos para verificar que son los datos correctos y si lucen bien o como es de esperar, es decir visualizar correctamente los eclipses primarios y secundarios (panel de abajo en la Figura 2.4). Para el sector 20 con tiempo de exposición 120s, al verificar como se ve la curva de luz, ésta lucía bien, pero para otro sectores, por ejemplo, el sector 47 con tiempo de exposición 20s, al revisar la curva de luz (ver Figura 2.5), en ésta podemos observar como hay puntos aislados, en inglés *outliers*. Estos puntos afectan el cálculo del período ya que son puntos que se escapan de la tendencia, se identificaron visualmente y con una herramienta de PERIOD04 se eliminaron. Finalmente se realizó el cálculo del período con los datos corregidos sin outliers.

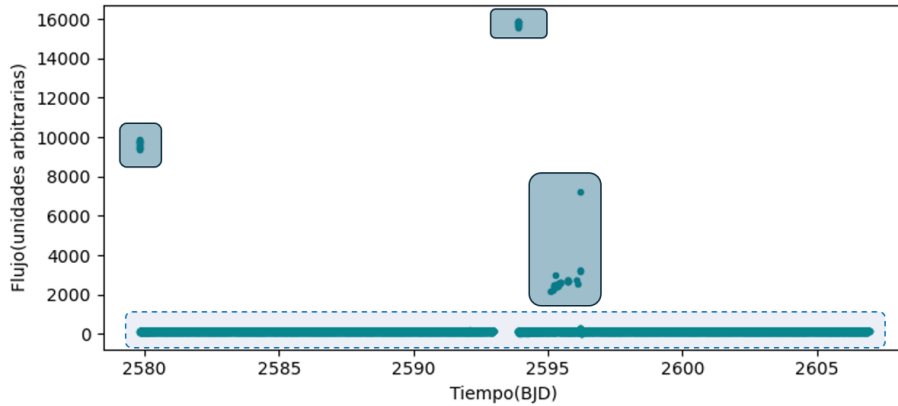


Figura 2.5: Curva de luz de HS 0705+6700 tomada por *TESS* el 2021, en el sector 47 con un tiempo de exposición de 120[s], donde podemos ver los outliers debido a la saturación de *TESS*, resaltados en la figura (cuadrado celeste). Si miramos el recuadro encerrado en línea segmentada veremos una curva de luz parecida a la de la figura 2.4.

Luego, para continuar con el análisis, en la pestaña de “Fourier”, mostrada en el lado izquierdo de la Figura 2.6, se especifica un rango de frecuencias, donde el límite inferior es cero y el límite superior está dado por la frecuencia Nyquist. La frecuencia de Nyquist es la frecuencia de una onda sinusoidal que es exactamente la mitad de la frecuencia de muestreo, esta frecuencia establece un límite superior para las frecuencias que se pueden buscar en un conjunto de datos determinado con una determinada frecuencia de muestreo (American Association of Variable Star Observers, 2024a). Luego se especifica que el cálculo se debe hacer con los datos originales. Al desplegar el gráfico en esta pestaña, se puede ver el periodograma, el cual está representado en la figura 2.7. En este periodograma se puede notar que hay una frecuencia con una amplitud muy sobresaliente y que corresponde a un período de 2,2955172813h, lo que coincide con el período de HS 0705+6700 reportado en la literatura (e.g. Pulley et al., 2015, 2018, 2022; Faillace et al., 2019b) y luego otras frecuencias que resultan ser armónicos de la frecuencia principal.

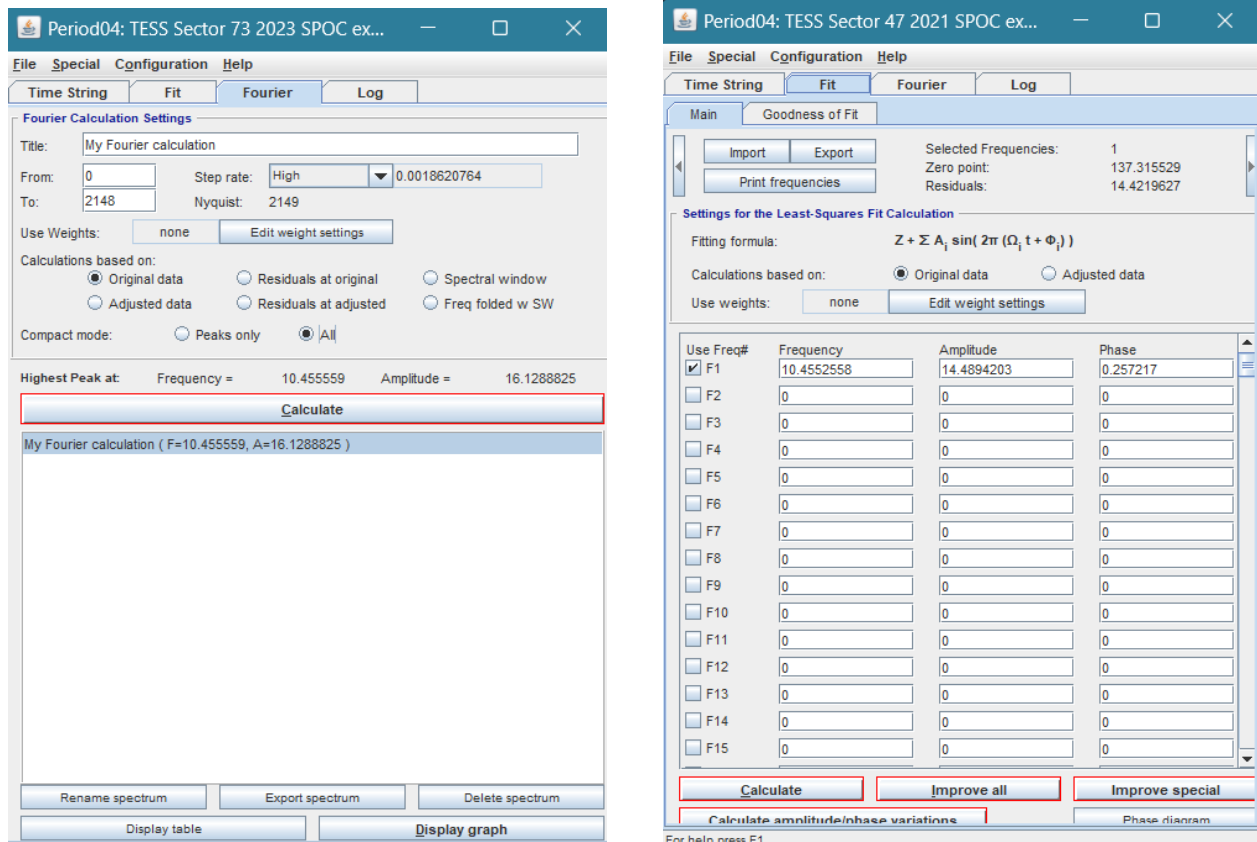


Figura 2.6: *Izquierda:* Imagen de la pestaña Fourier del programa PERIOD04, se puede ver el rango de frecuencias escogido, en este caso, para el sector 73 con tiempo de exposición 120(s), también en base a que datos se va a calcular la frecuencia y finalmente la frecuencia. *Derecha:* Imagen de la pestaña Fit del programa PERIOD04, se puede ver cual es la formula para ajustar la curva.

Para continuar es necesario explicar lo que es un diagrama de fase. En diagrama de fase representa como la curva de luz se pliega por período, esto da una imagen de como se ve cada ciclo, es decir como se ve cuando ocurre el eclipse primario, el secundario y cuando se pueden observar ambas componentes del sistema ([American Association of Variable Star Observers, 2024b](#)), se puede ver un ejemplo en la Figura 2.8.

Con la frecuencia principal obtenida se construye el diagrama de fase mostrado en la Figura 2.8, hecho esto, el cálculo está completo. Tenemos la frecuencia y en la pestaña “Time String” se puede verificar que el fit se ajuste a los datos, al desplegar el gráfico en esta última pestaña, (Figura 2.4, panel inferior), en ésta se puede ver que el fit ajuste de manera adecuada el eclipse medio primario, que es lo que nos interesa, ya que el eclipse medio es un punto más fácil de distinguir, en comparación por ejemplo al inicio del eclipse primario, en cambio el mid-eclipse va a ser el punto más bajo de la curva de luz y será más fácil de detectar. Para graficar el fit se utilizó la fórmula que ajuste PERIOD04, dada por la ecuación 2.1, donde Z corresponde al nivel de flujo arbitrario (eje y), luego A_i a la amplitud, Ω a la frecuencia y ϕ la fase.

$$f(t) = Z + \sum A_i \sin(2\pi(\Omega_i t + \phi_i)) \quad (2.1)$$

La ecuación, dados los parámetros para el fit del ejemplo (representada con línea morada en el panel de abajo de la Figura 2.4), es la siguiente

$$f(t) = 63,8928 + \sum 8,0083 \sin(2\pi(10,4554t + 0,0740))$$

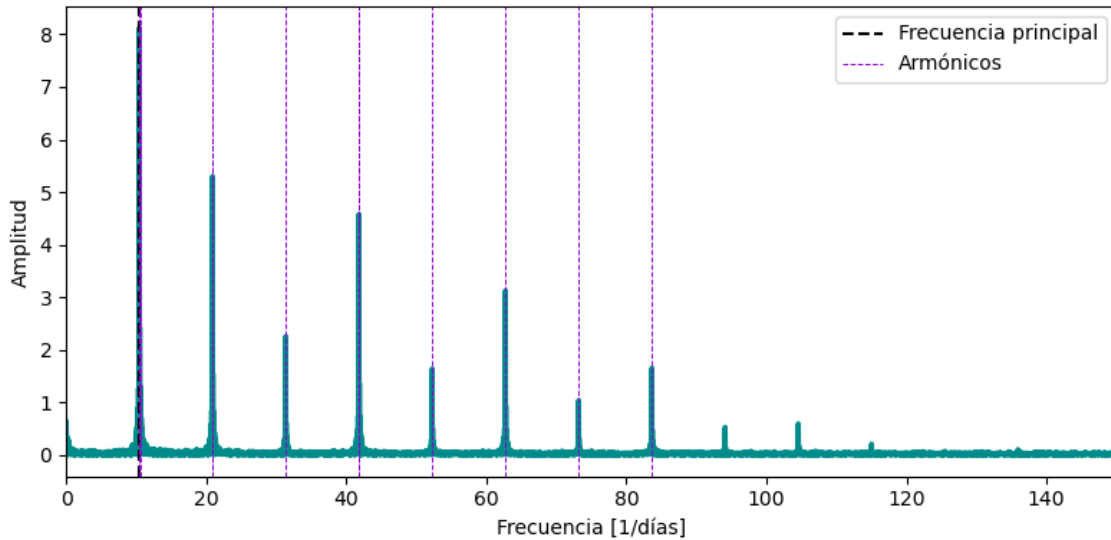


Figura 2.7: Periodograma de HS 0705-6700 tomada por *TESS* el 2019, en el sector 20 con un tiempo de exposición de 120(s). Se puede ver un pico grande (línea segmentada negra) alrededor de una frecuencia de 10,4551598 (1/d), que corresponde a 0,095644 d o en otras unidades, a 2,2955172813 h. Hacia el lado derecho vemos armónicos de la misma frecuencia (línea segmentada en púrpura).

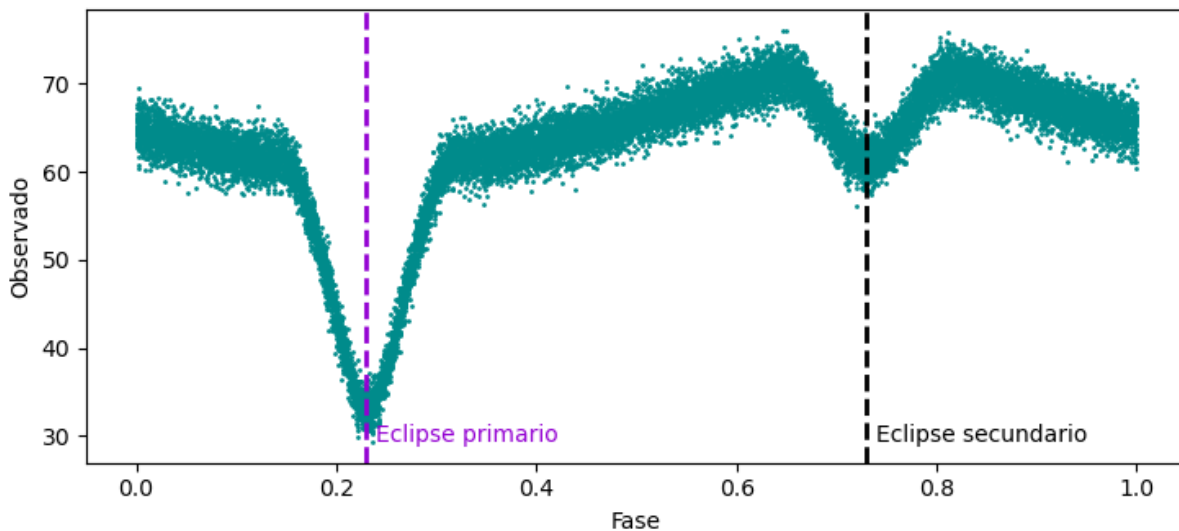


Figura 2.8: Diagrama de fase de HS 0705+6700 tomada por *TESS* el 2019, en el sector 20 con un tiempo de exposición de 120s, usando un período de 0,095644 d

El último cálculo extraído de PERIOD04 es el error, que se obtiene mediante “Goodness of Fit”, con

eso se obtiene el error de la frecuencia mediante un cálculo de mínimos cuadrados que realiza el programa. Al tener la frecuencia y su error, se puede calcular el período del sistema. Sabemos que el período es uno sobre la frecuencia pero se debe tener en cuenta la propagación del error, para realizar este cálculo se utilizó una fórmula conocida de propagación de error. Dada una función $x = au^b$, el error viene dada por la Ecuación 2.2.

$$\frac{\sigma_x}{x} = b \frac{\sigma_u}{u} \quad (2.2)$$

Donde, x corresponde al período, σ_x corresponde a el error del período, u corresponde a la frecuencia y σ_u al error de la frecuencia y b al exponente de la frecuencia en este caso igual a uno. Al realizar este cálculo, se obtuvo un período de $0,095644 \pm 0,000119$ [d] para el sector con el tiempo de exposición del ejemplo.

Este procedimiento se realizó para todas las curvas de luz de *TESS* donde el período para cada una de ellas se lista en la tabla 3.1, para los años 2019, 2021-2024, especificando cada sector y el tiempo de exposición.

En la Figura 2.9 podemos ver los diagramas de fase por sector y tiempo de exposición. En general, vemos que los tiempos de exposición varían entre 20, 120, 200, 600 y 1800 s. Varios de los diagramas muestran los eclipses sin tanto ruido, con excepción de dos tiempos de exposición. Para los diagramas con tiempo de exposición de 20 s, es un tiempo de integración muy corto para capturar más señal del sistema. Por ende, el error en la medición del brillo de la estrella es mayor, lo que se ve reflejado en los diagramas con una mayor dispersión en el eje y. Por otro lado, el diagrama de fase de 1800 s, aumenta considerablemente la señal de los fotones emitidos por el sistema binario, sin embargo empeora el sampling temporal, dado que 1800s es 0.5 h, se logran medir menos de 5 puntos en todo el ciclo. De esta manera se pierda resolución temporal de la curva de luz, lo que se ve reflejado en el empeoramiento en la forma que tienen los eclipses. En el eclipse primario se pierde todo el centro de este (i.e. comparando los paneles con curvas de fase verdes en figura 2.9, el flujo llega solo a 50, mientras que debería llegar a 30). Y el eclipse secundario pierde completamente su forma. Es por ello que para lo que sigue del análisis del trabajo, se utilizarán solo las curvas de luz con tiempo de exposición de 120 s. Esto último además de mejorar la señal a ruido y la resolución temporal, es debido a que todos los sectores tienen este tiempo de exposición y permite hacer una comparación de resultados en el cual el tiempo de exposición no debería ser responsable en el caso de encontrar diferencias.

En el apéndice se puede encontrar la Figura A.1, con los periodogramas, para todos los sectores con sus respectivos tiempos de exposición. Podemos ver que hay frecuencias que no corresponden a armónicos de la frecuencia predominante. Sin embargo, no es claro qué puede estar ocasionando este período, se puede atribuir a alias debido a la observaciones de *TESS*, sin embargo entender estos períodos no es el objetivo de esta tesis.

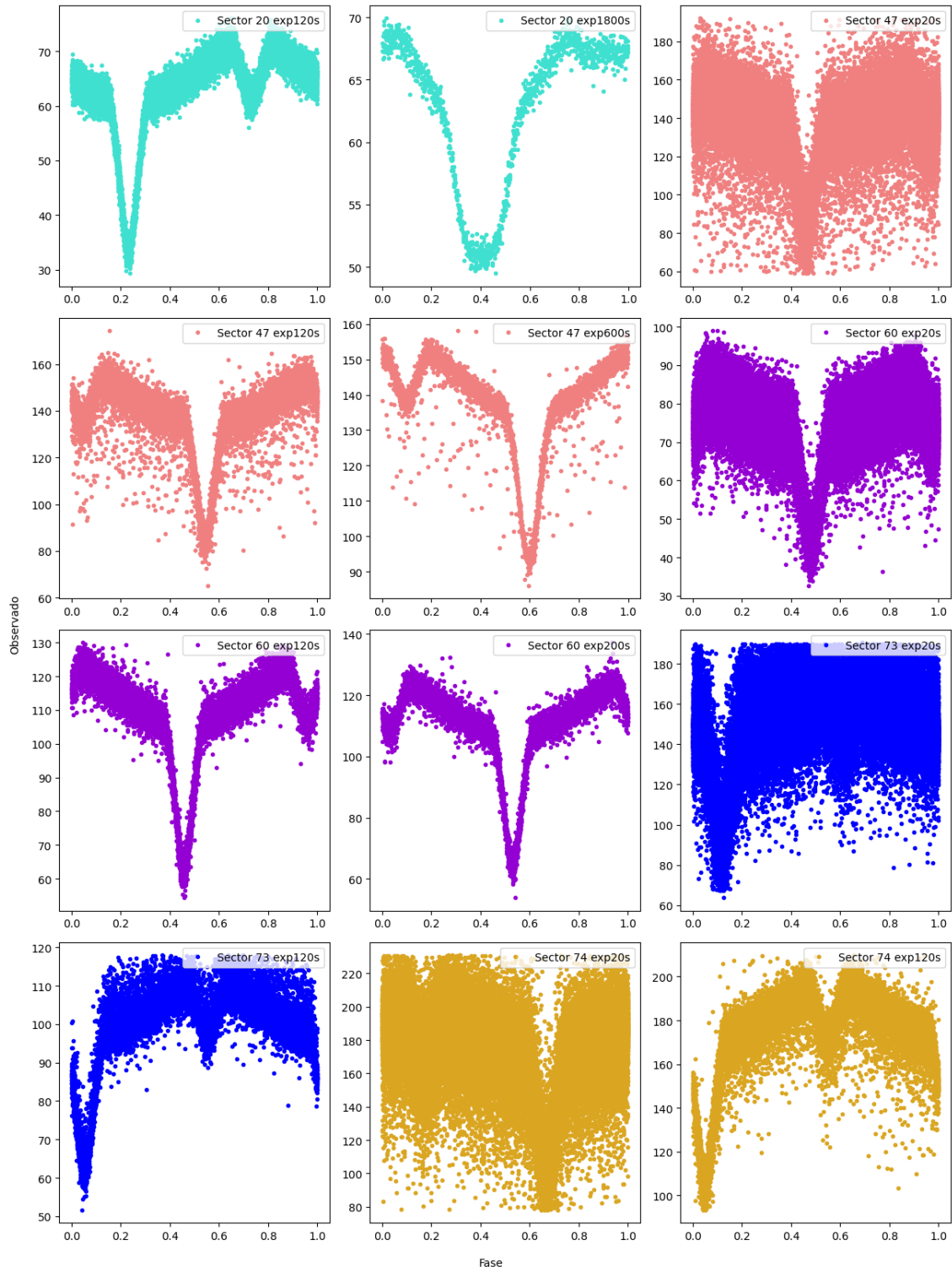


Figura 2.9: Diagramas de fase por sector y tiempo de exposición.

2.4. Construcción diagrama O-C

Para la construcción del diagrama O-C se necesita determinar los tiempos BJD de los eclipses medios realizado por Pablo Fernandez, compañero de investigación. Para cada curva de luz, buscó por cada punto en ésta un número determinado de vecinos, en el caso de una exposición de 120(s) analizó 45 puntos hacia atrás y 65 puntos hacia adelante, para comparar si es el punto más bajo respecto a sus vecinos en flujo. Luego, se guardan las coordenadas de este punto más bajo en el eclipse, es decir el tiempo y el flujo correspondiente. Pero no se tiene certeza de que este punto corresponda al punto más bajo de flujo para el eclipse por esto se le ajusta una función gaussiana invertida, para el eclipse primario, como la que se puede observar en la Figura 2.10.

Para esto, se toma una ventana de tiempo, para este caso aproximadamente de 36 minutos, para que se ajuste la gaussiana al eclipse que se quiere ajustar y a no a toda la curva de luz. Con esto hecho a una función constante horizontal, representada en la Ecuación 2.3.

$$\text{Gaussiana invertida}(t) = \text{offset} - A \times \exp\left(-\frac{(t - t_0)^2}{2 \times \sigma^2}\right) \quad (2.3)$$

Donde offset representa el flujo promedio de la curva de luz en esa ventana de tiempo, a éste se le resta una función gaussiana con los siguientes parámetros, “A” la diferencia entre el flujo mínimo y máximo de la ventana, σ , el ancho estimado del eclipse en la ventana, se estima un cuarto de la ventana en un inicio, t es el tiempo en BJD y t_0 es la media de la gaussiana y que para este caso, es el tiempo en el que ocurre el *mid-eclipse* o eclipse medio. Con esto realizado, se obtienen los tiempos en que ocurre lo observado de un diagrama O-C.

Para lo calculado, se utiliza un modelo, o efeméride. En este caso se utilizó el modelo de la Ecuación 1.1, en la que se reemplazan los valores acorde para el sistema binario de interés, i.e.

$$T = 2451822,75857 + 0,0956466435185185 \times E \quad (2.4)$$

donde el T_0 corresponde a la epoca de referencia obtenida desde [Faillace et al. \(2019a\)](#) y el período corresponde a el período encontrado por [Drechsel et al. \(2001\)](#), el más antiguo reportado.

Para construir O-C, se creó un código en Python, al tiempo en que ocurren los *mid-eclipses* medidos anteriormente restamos el modelo le restamos la predicción de cuando deberían ocurrir. Para los ciclos se utilizó la parte entera de la siguiente expresión

$$E = \frac{T - 2451822,75857}{0,0956466435185185} \quad (2.5)$$

Por otro lado, el código incluye una función para eliminar puntos que de desvían mucho del O-C, y que estos corresponden a un mal ajuste gaussiano debido a los outliers. Para la eliminación de estos puntos, se utilizaron valores de corte observados visualmente en el diagrama O-C.

Como se ha mencionado anteriormente, para la construcción del diagrama O-C, se utilizaron los sectores con tiempo de exposición 120(s). La primera razón es que éste tiempo se repite para todos los sectores, pero también se utilizó este tiempo de exposición ya que en comparación a tiempos de exposiciones menores o mayores, este presenta un mejor muestreo y menor ruido.

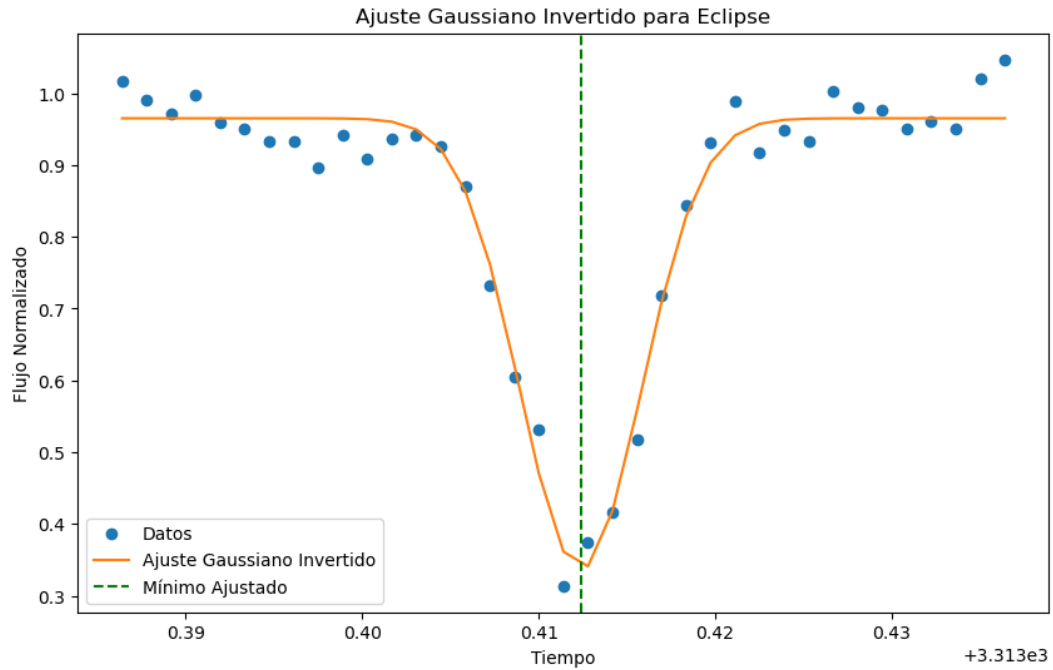


Figura 2.10: Ajuste gaussiano invertido realizado por Pablo para cada eclipse, la línea vertical verde representa el eclipse medio o *mid-eclipse* (t_0 en la ecuación 2.3) de acuerdo al ajuste de la gaussiana.

Capítulo 3

Resultados y Discusión

3.1. Período orbital de HS 0705+6700 usando *TESS*

En la Tabla 3.1 se puede ver un resumen de las frecuencias predominantes en los datos de *TESS* calculados con PERIOD04 y los períodos calculados, en días y horas, por sector y tiempo de exposición. Vemos que los períodos tienen una diferencia en el sexto dígito decimal, también que este dígito varía entre cuatro y siete, pero en un orden bastante pequeño que corresponde a una diferencia de menos de un segundo, i.e. 0.23743584(s). Ahora, respecto a los errores, podemos ver que son pequeños, ya que tienen cifra significativa en el séptimo dígito decimal, pero, los sectores con tiempos de exposición 20(s), tienen un error menor, la diferencia del mayor error, correspondiente al sector 74 con 20(s) de exposición, y el menor error, correspondiente a el sector 47 con 20(s) de exposición, es de 0.0000001363(d) o 0.01177632(s). Estos están resaltados en amarillo. Este cambio de error puede significar diferentes cosas: primero, que el período obtenido con estos errores se acerca más al período real, o el error puede ser menor debido a que hay una mayor cantidad de datos, la mayor cantidad de datos es debido a que hay un menor tiempo de exposición, lo que introduce un mejor muestreo de la curva, pero mayor ruido entre los datos por lo tanto tampoco se puede confiar totalmente en este resultado.

Sector	Tiempo exp (s)	Frecuencia (1/d)	Período (d)	Período (h)
20	120	10.4551598 ± 0.0001699525	0.0956465534 ± 0.0000015548	2.2955172813 ± 1,4 × 10 ⁻⁹
20	1800	10.4552524 ± 0.0003405788	0.0956457063 ± 0.0000031156	2.2954969504 ± 5,6 × 10 ⁻⁹
47	20	10.4552424 ± 0.0000857108	0.0956457977 ± 0.0000007841	2.2954991460 ± 4,0 × 10 ⁻¹⁰
47	120	10.4552745 ± 0.0001736161	0.0956455041 ± 0.0000015883	2.2954920983 ± 1,5 × 10 ⁻⁹
47	600	10.4552952 ± 0.0003365938	0.0956453147 ± 0.0000030792	2.2954875535 ± 5,5 × 10 ⁻⁹
60	20	10.4552372 ± 0.0000987167	0.0956458453 ± 0.0000009031	2.2955002876 ± 5,0 × 10 ⁻¹⁰
60	120	10.4552293 ± 0.0001959182	0.0956459176 ± 0.0000017923	2.2955020221 ± 1,9 × 10 ⁻⁹
60	200	10.4552542 ± 0.0002460931	0.0956456898 ± 0.0000022513	2.2954965552 ± 2,9 × 10 ⁻⁹
73	20	10.4551165 ± 0.0000922684	0.0956469495 ± 0.0000008441	2.2955267882 ± 4,0 × 10 ⁻¹⁰
73	120	10.4550971 ± 0.0001887271	0.0956471270 ± 0.0000017265	2.2955310477 ± 1,7 × 10 ⁻⁹
74	20	10.4552827 ± 0.0001006146	0.0956454291 ± 0.0000009204	2.2954902979 ± 5,0 × 10 ⁻¹⁰
74	120	10.4553975 ± 0.0001954374	0.0956443789 ± 0.0000017878	2.2954650935 ± 1,8 × 10 ⁻⁹

Tabla 3.1: Períodos calculados con los datos de *TESS* en días y horas, separados por sector y tiempo de exposición. En amarillo se resaltan los períodos con menor error en el fit de Fourier en comparación a los demás.

La Figura 3.1 muestra una comparación entre los períodos obtenidos en esta investigación y los períodos encontrados en la literatura. Se muestran los períodos obtenidos en los sectores 20, 47, 60, 73 y 74 con tiempo de exposición de 120s (estrellas cian oscuro). Se ha calculado un promedio de estos períodos obtenidos usando estos sectores de 120s (punto azul), y un promedio incluyendo todos los períodos obtenidos con PERIOD04 sin excepción del tiempo de exposición (estrella azul). Además, la figura incluye los períodos de la literatura si el modelamiento del O-C es lineal (puntos violeta oscuro) o cuadrático

(cuadrados negros).

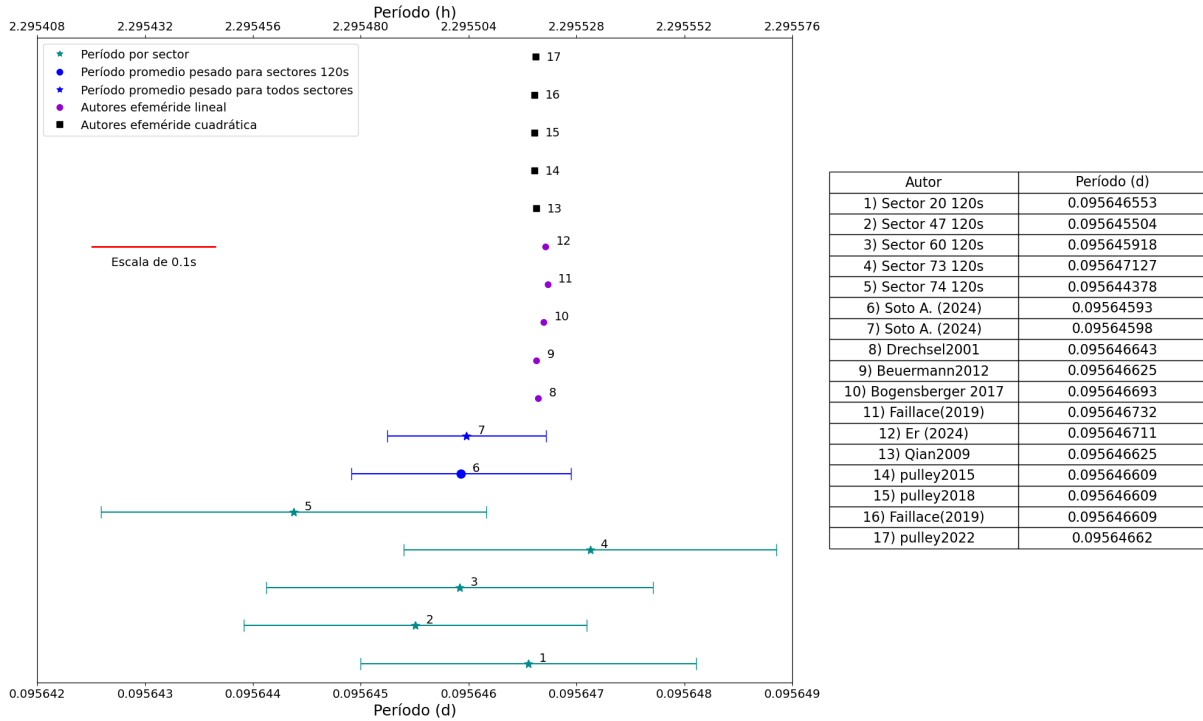


Figura 3.1: Gráfico de comparación entre períodos de la literatura (Drechsel et al., 2001; Qian et al., 2009; Beuermann et al., 2012; Pulley et al., 2015; Bogensberger et al., 2017; Pulley et al., 2018; Faillace et al., 2019b; Pulley et al., 2022; Er et al., 2024), donde los autores usan o un modelo lineal (en morado) o cuadrático (negro). El promedio de períodos de los sectores con 120s de exposición (punto 6 de color azul), promedios de períodos obtenidos con PERIOD04 (estrella 7 de color azul) y períodos obtenidos para cada sector con tiempo de exposición 120s (en cian oscuro con estrellas).

Desde la Figura 3.1 se puede analizar en primer lugar la comparación de los períodos para todos los sectores con un tiempo de exposición de 120[s], los sectores corresponden al mismo lugar en el cielo, pero en diferentes años, por lo tanto, se puede ver la diferencia de los períodos en los años, 2019, 2021, 2022, 2023 y 2024. Se puede observar que en todos los años el período es diferente, la diferencia entre el año 2019 y 2021 es de 0.09s, luego, la diferencia entre el año 2021 y 2022 es de 0.03s, la diferencia entre el año 2022 y 2023 es de 0.1s y la diferencia entre los años 2023 y 2024 es de 0.2s. Lo que es esperado dado que este sistema se ha reportado que su periodo está variando en escala de tiempo de años (Qian et al., 2009; Pulley et al., 2015, 2018, 2022; Bogensberger et al., 2017; Faillace et al., 2019b,a). Se puede ver de igual forma que las barras de error para estos períodos que son errores de ajuste se extienden incluyendo los períodos para otros años.

Por otro lado, se observa que los promedios obtenidos con los datos analizados en esta investigación están un poco alejados de los períodos de la literatura, esta separación corresponde a 0.000000938(d) o 0.0810432(s). Para explicar esta diferencia primero se pensó en que podría ser un truncamiento de la cifra, i.e. cantidad de decimales considerados a la hora de hacer el cálculo. Para esto en el programa PERIOD04 y también en el código de python se utilizó la mayor cantidad de decimales, pero el resultado continuó siendo el mismo, es importante el uso de la mayor cantidad de decimales para mayor precisión. Otra opción analizada fue la diferencia en los sistemas de referencias en los que estaban los períodos de los

autores y los datos obtenidos por *TESS*, ya que si estamos observando el suceso desde la Tierra va a ser un tiempo y si observamos desde el Sol va a ser otro tiempo, se verificó y los datos tanto de los autores como los datos obtenidos desde *TESS* se encontraban en el mismo sistema de referencia, ya que los datos de *TESS* están corregidos con el tiempo para la observación de Sol, por lo tanto debido a esto no era la diferencia. Por último, para descartar el uso de la metodología se compararon los períodos obtenido con PERIOD04 y el período que se estima usando LIGHTKURVE calculada por Pablo. Este último método da como resultado períodos corridos hacia la derecha de la tendencia de los autores, contrario al período obtenido con PERIOD04 que están corridos hacia la izquierda. Sin embargo, para este análisis no se han removido los outliers a la curva de luz (Figura 2.5), y también el sampling del periodograma es de baja calidad, por lo que estimar el período utilizando el máximo punto del periodograma no es apropiado. Sin embargo, no podemos determinar la razón de porque la medición de esta investigación es la que presenta una mayor desviación en respecto a los valores de la literatura. El promedio de los valores de la literatura (lineales y cuadráticas) es de 0.0956466476 d, lo que es solamente 0.0825 segundos distintos de nuestra medición (punto azul). A pesar de estas consideraciones se puede observar, en la figura, que la barra de error de los períodos informados por este trabajo, que fueron calculadas mediante la desviación estandar pesada, se extienden e incluyen los períodos informados en la literatura, lo que indica que los valores informados en este trabajo considerando su error pueden coincidir con los períodos de la literatura.

3.2. Variaciones temporales del eclipse detectados en O-C no son errores sistemáticos

Una pregunta siempre presente en los estudios, es la existencia de errores sistemáticos debido a los tiempos tan cortos de las observaciones realizadas por los trabajos previos, que por ende no pueden determinar la dispersión que tienen los eclipses medios. En este trabajo, se utilizaron datos de *TESS* que gracias a los 27 días de observaciones continuos, se puede determinar tal dispersión, este es quizás el mayor resultado de este trabajo.

En la Figura 3.2, podemos ver cómo hay una clara continuación de la tendencia que se ha notado en los últimos años por los autores ya citados, pero ahora con los datos obtenidos con *TESS*, los cuales describen la nube de puntos y entregan la dispersión en el O-C (eje Y de la figura). Se puede ver que esta tendencia es real y no es por un error de instrumentación o medición, ya que los puntos más arriba, en el eje O-C del diagrama, de la nube de dispersión para el sector 20 y los puntos de más abajo de la nube de dispersión de los datos del sector 74 tiene una diferencia de aproximadamente 0.00055(d) o 47.52(s), representada en la figura por la diferencia entre las cajas de colores representativas para el sector correspondiente. Esto indica que si se ajustara un modelo sinusoidal para el cambio del período este no podría pasar por la nube de dispersión del sector 20 y también por la nube de dispersión del sector 74, es por esto que se puede ver que la tendencia hacia arriba del cambio del período es real y está ocurriendo en el sistema.

Por otro lado, aún no es posible determinar mediante qué mecanismo está cambiando el período, para esto es necesario el estudio durante más tiempo del sistema. Esta figura es importante ya que demuestra la continuación de la tendencia como se mencionó antes y también los errores.

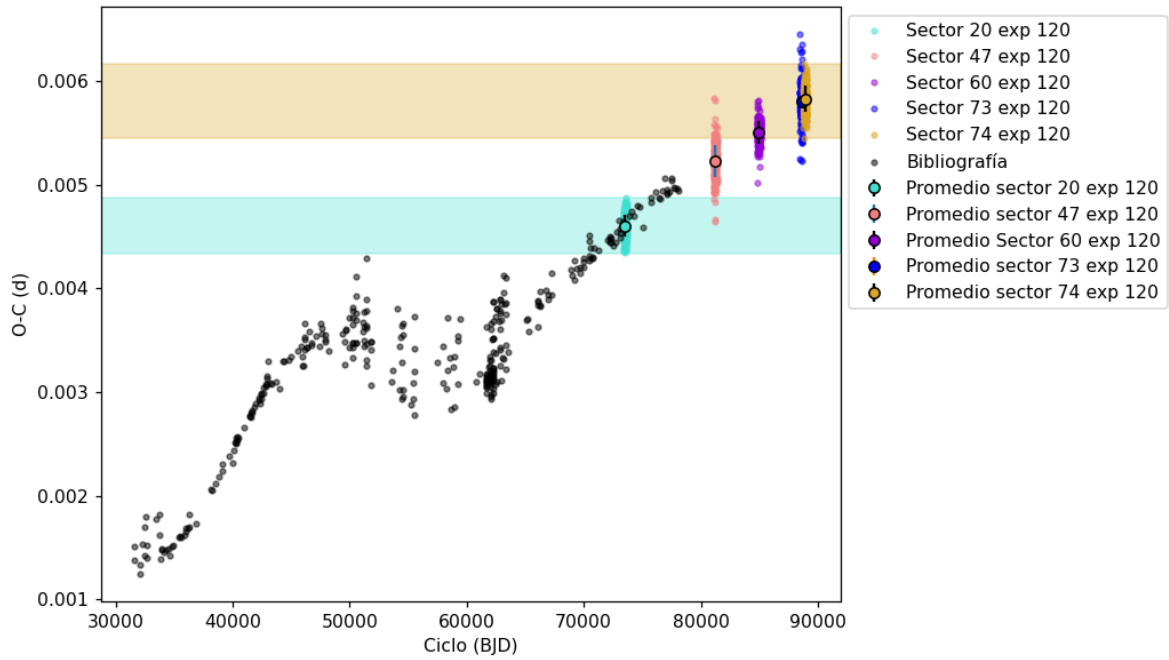


Figura 3.2: Diagrama O-C, los datos en color negro representan los puntos para la información de los mid eclipses encontrados en la literatura, los puntos de colores son datos de *TESS* para diferentes tiempos de exposición. Se puede ver claramente que no se superponen los puntos del sector 73 (azul) con los del sector 20 (cian) lo cual apoya el postulado de que el sistema eclipsante HS 0705+6700 presenta ETVs (variaciones del tiempo de eclipses) es real.

Capítulo 4

Conclusiones

El punto principal de este trabajo es la construcción del diagrama O-C para el sistema HS 0705+6700 para comprobar si los cambios que se han visto en este diagrama durante el tiempo y específicamente en el último tiempo, no son por errores sistemáticos sino por los mecanismos que fueron nombrados en la Sección 3.1. Este estudio es importante ya que determinar cuál es el mecanismo responsable del cambio de período, nos puede dar información para estudiar diferentes características del sistema. Gracias al análisis desarrollado a los datos obtenidos desde *TESS* se pudo encontrar una clara continuación de la tendencia que estaba teniendo este sistema, gracias a que los datos de *TESS* tienen un muestreo amplio, por los diferentes tiempos de exposición que utiliza, por ser un telescopio espacial no presenta seeing y ha observado el sistema por 5 años se puede concluir que el comportamiento en el O-C no es sistemático. Vimos que los períodos obtenidos con los datos de *TESS* resultaron ser diferentes a los entregados por la literatura, pero menos de un segundo, lo que puede estar dando este cambio es el ruido que presentan los datos, ya que se probaron otras metodologías u otras razones que pueden dar el cambio y estas no lo provocaron, además que las barras de error se extienden e incluyen los valores informados en la literatura. A pesar de que hay una clara tendencia del comportamiento del sistema, aún no es posible determinar cuál es el mecanismo responsable del cambio del período, es por esto que los puntos nuevos en el diagrama O-C de este trabajo son un aporte al estudio del sistema. Hay que seguir monitoreando el sistema para determinar el mecanismo que causa el cambio de período.

Bibliografía

- Akabane, T., Escalante, V., Alexander, D., Fryer, C. L., Araki, S., Gangui, A., Barandela, F. A., Higgins, C., Barlow, N., Kallenrode, M.-B., Barnbaum, C., Knight, J., Batchelor, D., Krasinski, A., Bernstein, M., Richard, L., Bhatnagar, V., Marziani, P., Breakiron, L., Matzner, R. A., Casadio, R., McCormick, N., Cline, T. I., Mitskevich, N., Mobley, C., Singh, T., Nemiroff, R., Stern, D. P., Trimble, V., Noerdlinger, P., Oganessyan, G., Turcotte, D. L., Parker, J., Wang, K., Pereyra, N., Wang, Z., Perjes, Z., Wilkinson, P., Peter, P., Williams, M., Podolak, M., Wolk, F., Roberto, C., Work, P., Rubenstein, E., Wuest, A., Shapiro, I., Xie, S.-P., Yang, H., Yoshioka, S., and Zatman, S. (2001). *Dictionary of geophysics, astrophysics and astronomy*. CRC Press, Boca Roton, London, New York, Wachington, D.C.
- American Association of Variable Star Observers (2024a). Time series tutorial. Accessed: 2024-08-01.
- American Association of Variable Star Observers (2024b). Variable star astronomy. Accessed: 2024-08-01.
- Applegate, J. H. (1992). A Mechanism for Orbital Period Modulation in Close Binaries. , 385:621.
- Beuermann, K., Breitenstein, P., Debski, B., Diese, J., Dubovsky, P. A., Dreizler, S., Hessman, F. V., Hornoch, K., Husser, T. O., Pojmanski, G., Wolf, M., Woźniak, P. R., Zasche, P., Denk, B., Langer, M., Wagner, C., Wahrenberg, D., Bollmann, T., Habermann, F. N., Haustovich, N., Lauser, M., Liebing, F., and Niederstadt, F. (2012). The quest for companions to post-common envelope binaries. II. NSVS14256825 and HS0705+6700. , 540:A8.
- Bogensberger, D., Clarke, F., and Lynas-Gray, A. E. (2017). Further Evidence of a Brown Dwarf Orbiting the Post-Common Envelope Eclipsing Binary V470 Cam (HS 0705+6700). *Open Astronomy*, 26(1):134–138.
- Carroll, B. and Ostlie, D. (2017). *An introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Çamurdan, C. M., Zengin Çamurdan, D., and İbanoğlu, C. (2012). Photometric observations and orbital period variations of HS 0705 + 6700 and NY Vir. , 17(3):325–330.
- Dimoff, A. J. and Orosz, J. A. (2023). Modeling Apsidal Motion in Eclipsing Binaries Using ELC. , 166(3):114.
- Drechsel, H., Heber, U., Napiwotzki, R., Østensen, R., Solheim, J. E., Johannessen, F., Schuh, S. L., Deetjen, J., and Zola, S. (2001). HS 0705+6700: A new eclipsing sdB binary. , 379:893–904.
- Er, H., Özdönmez, A., Nasiroglu, I., and Kenger, M. E. (2024). Orbital Period Variation Analysis of the HS 0705+6700 Post-Common Envelope Binary. *arXiv e-prints*, page arXiv:2405.13616.

- Faillace, G., Pulley, D., Watkins, A., Mallett, J., Sharp, I., and Mai, X. (2019a). Eclipse time variations and the continued search for companions to short period eclipsing binary systems. *arXiv e-prints*, page arXiv:1911.00125.
- Faillace, G., Pulley, D., Watkins, A., Mallett, J., Sharp, I., and Mai, X. (2019b). Eclipse time variations and the continued search for companions to short period eclipsing binary systems. *arXiv e-prints*, page arXiv:1911.00125.
- Han, Z. T., Qian, S. B., Zhu, L. Y., Zhi, Q. J., Dong, A. J., Soonthornthum, B., Poshyachinda, S., Sarotsakulchai, T., Fang, X. H., Wang, Q. S., and Voloshina, I. (2018). DE CVn: An Eclipsing Post-common Envelope Binary with a Circumbinary Disk and a Giant Planet. , 868(1):53.
- Iben, I. J. and Tutukov, A. V. (1991). Close Binaries with Evolved Components. In Lambert, D. L., editor, *Frontiers of Stellar Evolution*, volume 20 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 403.
- Irwin, J. B. (1959). Standard light-time curves. , 64:149.
- Knigge, C., Baraffe, I., and Patterson, J. (2011). The Evolution of Cataclysmic Variables as Revealed by Their Donor Stars. , 194(2):28.
- Lenz P., B. M. (2005). Period04. 1.2.0.
- NASA’s Transiting Exoplanet Survey Satellite (2024). Tess observations. Accessed: 2024-08-01.
- Paczynski, B. (1967). Gravitational Waves and the Evolution of Close Binaries. , 17:287.
- Parsons, S. G. (2012). Eclipsing white dwarf binaries. Unpublished.
- Parsons, S. G., Marsh, T. R., Copperwheat, C. M., Dhillon, V. S., Littlefair, S. P., Hickman, R. D. G., Maxted, P. F. L., Gänsicke, B. T., Unda-Sanzana, E., Colque, J. P., Barraza, N., Sánchez, N., and Monard, L. A. G. (2010). Orbital period variations in eclipsing post-common-envelope binaries. , 407(4):2362–2382.
- Pulley, D., Faillace, G., Smith, D., Watkins, A., and Owen, C. (2015). The eclipsing binary HS0705+6700 and the search for circumbinary objects. *Journal of the British Astronomical Association*, 125:284–291.
- Pulley, D., Faillace, G., Smith, D., Watkins, A., and von Harrach, S. (2018). The quest for stable circumbinary companions to post-common envelope sdB eclipsing binaries. Does the observational evidence support their existence? , 611:A48.
- Pulley, D., Sharp, I. D., Mallett, J., and von Harrach, S. (2022). Eclipse timing variations in post-common envelope binaries: Are they a reliable indicator of circumbinary companions? , 514(4):5725–5738.
- Qian, S. B., Zhu, L. Y., Zola, S., Liao, W. P., Liu, L., Li, L. J., Winiarski, M., Kuligowska, E., and Kreiner, J. M. (2009). Detection of a Tertiary Brown Dwarf Companion in the sdB-Type Eclipsing Binary HS 0705+6700. , 695(2):L163–L165.
- Rattanamala, R., Awiphan, S., Komonjinda, S., Phriksee, A., Sappankum, P., A-thano, N., Chitchak, S., Rittipruk, P., Sawangwit, U., Poshyachinda, S., Reichart, D. E., and Haislip, J. B. (2023). Eclipse timing variations in the WD + dM eclipsing binary RR Cae. , 523(4):5086–5108.

Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., Latham, D. W., Bakos, G. Á., Bean, J. L., Berta-Thompson, Z. K., Brown, T. M., Buchhave, L., Butler, N. R., Butler, R. P., Chaplin, W. J., Charbonneau, D., Christensen-Dalsgaard, J., Clampin, M., Deming, D., Doty, J., De Lee, N., Dressing, C., Dunham, E. W., Endl, M., Fressin, F., Ge, J., Henning, T., Holman, M. J., Howard, A. W., Ida, S., Jenkins, J. M., Jernigan, G., Johnson, J. A., Kaltenegger, L., Kawai, N., Kjeldsen, H., Laughlin, G., Levine, A. M., Lin, D., Lissauer, J. J., MacQueen, P., Marcy, G., McCullough, P. R., Morton, T. D., Narita, N., Paegert, M., Palle, E., Pepe, F., Pepper, J., Quirrenbach, A., Rinehart, S. A., Sasselov, D., Sato, B., Seager, S., Sozzetti, A., Stassun, K. G., Sullivan, P., Szentgyorgyi, A., Torres, G., Udry, S., and Villaseñor, J. (2015). Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1:014003.

Willems, B. and Kolb, U. (2004). Detached white dwarf main-sequence star binaries. , 419:1057–1076.

Wolf, M., Kučáková, H., Zasche, P., Hornoch, K., Kára, J., Merc, J., and Zejda, M. (2021). Possible substellar companions in dwarf eclipsing binaries. SDSS J143547.87+373338.5, NSVS 7826147, and NSVS 14256825. , 647:A65.

Apéndice A

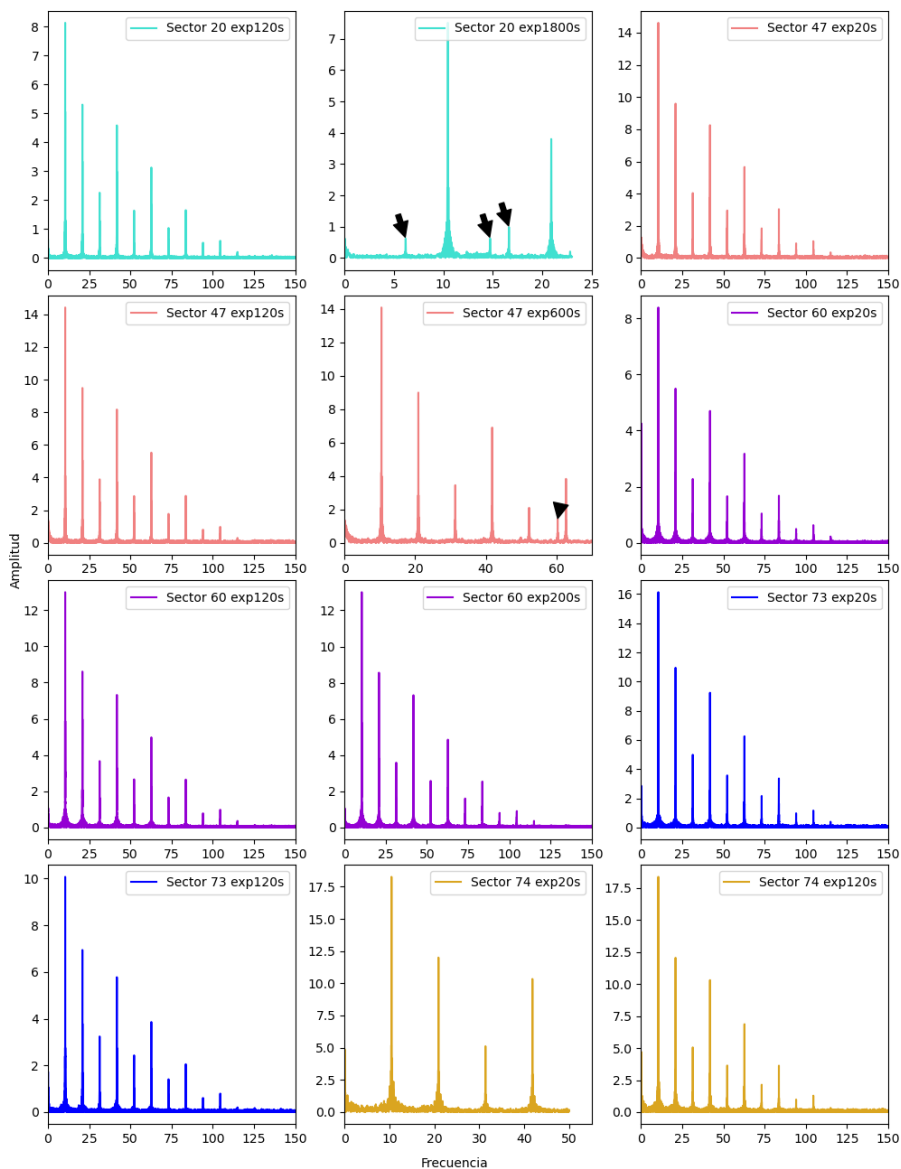


Figura A.1: Periodogramas por sector y tiempo de exposición. Las flechas demarcan otra periodicidades que creemos que están asociadas al largo tiempo de exposición de las imágenes, porque en las imágenes de menor tiempo estos alias no aparecen.