

DEPARTAMENTO DE ASTROFÍSICA

Universidad de La Laguna

**Análisis de los tiempos de mínimos del binario
eclipsante de baja masa CM Draconis**

Memoria docente y de investigación conducente al título de DEA que
presenta

Dña. Breezy Ocaña Flaquer

Supervisada por
Dr. Juan Antonio Belmonte Avilés
Dr. Hans-Jörg Deeg

INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

Octubre del 2006

Revisado

Resumen

El sistema binario CM Draconis ha sido estudiado anteriormente con datos obtenidos hasta 1999 (Deeg et al. 2000). Esta memoria de investigación pretende continuar con el estudio del sistema, ya que contamos con nuevos datos hasta 2004 con los que podemos hacer un mejor ajuste.

En el artículo presentado por Deeg et al. en el 2000 se hicieron 41 medidas individuales de los tiempos mínimos de los eclipses con una desviación estándar de una efeméride lineal de 5.74 segundos y se analizaban los espectros de potencia de los residuos donde aparece sólo una periodicidad de más de dos segundos de amplitud. Esta, con una periodicidad de 750 y 1050 días tiene una amplitud de 2.8 ± 0.5 segundos.

En este mismo artículo se sugiere la existencia de un planeta compatible con una órbita alrededor del sistema circumbinario a una distancia orbital de 1.1-1.45 U.A. del baricentro del sistema binario y con una masa entre los $1.5-3 M_J$.

En esta memoria se repitió el análisis con todos los datos que tenemos, que suman un total de 62 eclipses, 27 de ellos son eclipses primarios y los 35 restantes son eclipses secundarios. Con ellos hicimos un análisis de los tiempos mínimos de los eclipses y lo aplicamos a distintos casos; al caso donde la distancia no varía y el sistema parece no moverse con respecto al observador, el caso donde el sistema se mueve con una velocidad constante al observador, el caso donde el sistema binario tiene una aceleración relativa al observador y, finalmente, cuando el sistema tiene un movimiento sinusoidal y sinusoidal más lineal combinados. Con esto pudimos determinar que el sistema tiene una aceleración mínima de $9 \times 10^{-8} \frac{m}{s^2}$ y que tiene un comportamiento no-lineal. Esta aceleración implicaría la presencia de un tercer cuerpo con un período muy largo o la influencia de alguna estrella que se encuentre a una distancia tal que pueda ejercer algún tipo de fuerza gravitatoria sobre el sistema. Para poder resolver con más exactitud el tipo de curva no-lineal que más se ajusta, se necesita continuar con las observaciones de los eclipses primarios y secundarios de CM Draconis.

No encontramos evidencia de que existiera un planeta alrededor del sistema, aunque nuestros datos son compatibles con una masa de $1.4 \times 10^{27} \pm 1.01 \times 10^{27}$ kg, o lo que es lo mismo $0.74 M_{jupiter}$, con un período orbital alrededor del baricentro del sistema de aproximadamente 12 años.

Summary

The binary star system CM Draconis has been studied before with data up until the year 1999 (Deeg et al. 2000). Since we have new data, from that year to the year 2004, this report wishes to continue analyzing the binary star system, now including this new data, resulting in a thorough analysis.

In the article presented by Deeg et al. 2000, they had 41 measured sets of minimum times of the eclipses with a standard deviation of a linear ephemerides of 5.74 seconds, and they analyzed the power spectrum of the residuals where they show one periodicity of more than 2 seconds of amplitude. This result, plus a periodicity of 750-1050 days, has an amplitude of 2.8 ± 0.5 seconds.

In this project we repeated the analysis with the data that Deeg et al. had, plus the new data collected until the year 2004. This new set of data has a total of 62 eclipses; 27 of them are primary eclipses and 35 are secondary eclipses. Using this information we did a minimum time eclipses analysis and we did apply it to different situations. The case where the system did not change positions with respect to the observer; the case in which the system moves with a constant velocity with respect to the observer; the case in which the system moves with an acceleration relative to the observer; and finally the case of a sinusoidal motion and a combination between the sinusoidal and a linear motion. With this information we could determine that the binary star system has a very slow acceleration rate of about $9 \times 10^{-8} \frac{m}{s^2}$ and that it has a non-linear behavior. This acceleration could mean that there is a third body orbiting the system with a very long period, or it could also mean that there is a star relatively close that has some gravitational influence over the system. In order to be able to obtain some conclusions we need to continue the observations of the primary and secondary eclipses of CM Draconis.

We did not find any evidence of the existence of any planet orbiting the binary star system, but the system is compatible with a planet of about $0.74 M_{jupiter}$ orbiting the stars in about 12 years.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Sistemas Binarios	1
1.2	Proyecto TEP	2
1.3	Sistema de Referencia de Tiempo	2
2	Método de análisis de los tiempos de los mínimos de los eclipses binarios	5
2.1	A distancias constantes	6
2.2	Velocidad relativa al observador	7
2.3	Velocidad y aceleración relativa al observador	8
2.4	Distancias que varían sinusoidalmente	9
2.5	Distancias que varían sinusoidalmente con una velocidad relativa al observador	13
3	CM Draconis	15
3.1	Datos del sistema CM Draconis	15
3.2	Tiempos O-C del sistema binario CM Draconis	16
4	Análisis de los ajustes del sistema CM Draconis	21
4.1	Análisis de fase de los eclipses	21
4.2	Ajustes de los eclipses	22
4.2.1	Eclipses Primarios	25
4.2.2	Eclipses Secundarios	26
4.3	Análisis de los ajustes de los tiempos O-C	27
4.3.1	Lineal	27
4.3.2	Polinómico	29
4.3.3	Lineal+sinusoidal	30
4.4	Espectros de potencia	31
5	Conclusiones	39
6	Cursos de Doctorado	41
6.1	Atmósfera Estelar	41
6.1.1	Fecha de impartición	41
6.1.2	Profesores	41
6.1.3	Contenido	41

6.1.4	Motivación	43
6.1.5	Trabajo realizado	43
6.2	Interacció Estrellas-Medio Interestelar	43
6.2.1	Fecha de impartición	43
6.2.2	Profesores	43
6.2.3	Contenido	43
6.3	Estructura Estelar con métodos sismológicos	44
6.3.1	Fecha de impartición	44
6.3.2	Profesores	45
6.3.3	Contenido	45
6.3.4	Motivación	45
6.3.5	Trabajo Realizado	45
6.4	Técnicas de alta resolución para imágenes astrnómicas	45
6.4.1	Fecha de impartición	45
6.4.2	Profesores	46
6.4.3	Contenido	46
6.4.4	Motivación	46
6.4.5	Trabajo Realizado	47
6.5	Radioastronomía	47
6.5.1	Motivación	47
6.5.2	Trabajo Realizado	47
6.6	Análisis de Señales Tiempo-frecuencia	47
6.6.1	Fecha de impartición	47
6.6.2	Profesores	47
6.6.3	Contenido	48
6.6.4	Motivación	48
6.6.5	Trabajo Realizado	48
6.7	Escuela de Invierno de Astrofísica XVI, “Planetas Estrasolares”	48
6.7.1	Fecha de impartición	48
6.7.2	Charlistas	48
6.7.3	Temario	49
6.7.4	Motivación	52
A Comparación de Ajustes O-C en U.T. y en T.A.I.		53
B Programas		57
B.1	LacyUTtai.py	57
B.2	Epochs.py	66
B.3	TAI.py	69
B.4	Residuos.py	77
B.5	Espectros2.py	82

C	Gráficas Espectros de Potencia	89
C.1	Lineal	90
C.1.1	Períodos de 0 a 1000 días	90
C.1.2	Períodos de 0 a 100 días	91
C.2	Polinomio	92
C.2.1	período de 0 a 1000 días	92
C.2.2	Período de 0 a 100 días	93
C.3	Seno+Lineal	94
C.4	Período de 0 a 1000 días	94
C.4.1	Período de 0 a 100 días	95

1

Introducción

La investigación en el tema de los planetas extrasolares ha ido avanzando mucho desde 1995, cuando Michael Mayor y Didier Queloz publicaron el descubrimiento de un planeta que giraba alrededor de 51 Pegasus (Mayor & Queloz 1995), desde entonces se ha hecho una gran cantidad de descubrimientos. Hoy en día conocemos aproximadamente 200 planetas extrasolares y algunos de ellos forman parte de sistemas múltiples, así como nuestro Sol.

Muchas de las estrellas en el cielo son binarias, más de la mitad de las estrellas que hay forman parte de algún sistema múltiple, que consiste en dos o más estrellas en órbita alrededor de un centro de masa común entre ellas, también llamado baricentro. En la mayoría de estos sistemas las estrellas están tan separadas unas de otras que no notan sus impactos, crecen de manera independiente y sólo notan de ellas un poco de la gravedad al compartir el mismo centro de masa.

La búsqueda de planetas se ha expandido hasta el punto de encontrarlos en sistemas binarios. Hasta el momento se han encontrado planetas en por lo menos 15 sistemas binarios (Thébaud et al. 2004) pero todavía ninguno de estos sistemas son circumbinarios. En esta Memoria de Investigación vamos a estudiar el sistema binario CM Draconis ya que presenta un comportamiento particular en su curva O-C (método que será explicado más adelante) y que podría ser explicado por la presencia de un tercer cuerpo en el sistema.

1.1 Sistemas Binarios

Hay 3 tipos de sistemas binarios, éstos son:

Sistemas binarios de no contacto Cuando el radio de la estrella es mucho menor que la separación con su compañera, la estrella es casi esférica y evoluciona independientemente de la otra estrella, en este caso ambas estrellas están dentro del lóbulo de Roche y se clasifican como binarias de no contacto.

Sistemas binarios de semi contacto Cuando sólo una de las estrellas se expande lo su-

ficiente como para llenar su lóbulo de Roche estamos en presencia de una binaria de semi contacto. Aquella estrella que llena su lóbulo de Roche, y que pierde masa, es la estrella secundaria del sistema, y su compañera, aquella que no llena su lóbulo de Roche, es la estrella primaria. La transferencia de masa comienza cuando una de las estrellas se ha expandido más allá de su lóbulo de Roche.

Sistemas binarios de contacto Puede que ambas estrellas llenen o se expandan al exterior del lóbulo de Roche, en este caso las estrellas comparten la atmósfera y el sistema es el de binarias de contacto.

1.2 Proyecto TEP

El proyecto TEP¹ (Transit of Extrasolar Planets) se dedicaba, como su nombre indica, a la búsqueda de planetas alrededor de otras estrellas. Uno de los proyectos más grandes a los que se dedicaron los colaboradores de TEP fue a estudiar el sistema binario CM Draconis. Desarrollaron un método llamado TDA, por sus siglas en inglés, "Transit Detection Algorithm", o lo que es lo mismo en español, algoritmo de detección de tránsitos. Este algoritmo se ha ejecutado para más de 400 millones de modelos de curvas de luz, que representaban tránsitos de planetas con períodos desde 7 hasta 60 días. Este programa permite cuantificar la probabilidad de detección y de falsas alarmas (Doyle et al. 2000). Usando este programa, el grupo TEP anunció la presencia de varios candidatos, uno de ellos con un diámetro entre 2.3 y 2.5 del radio de la Tierra y con un período de 22.6 días, por lo tanto, colocado en la zona de habitabilidad.

Más tarde el grupo TEP dijo que ciertas desviaciones periódicas de los tiempos de los mínimos de efemérides lineales pueden indicar la presencia de un tercer cuerpo en el sistema. Los resultados que obtuvieron de CM Draconis son compatibles con un planeta circumbinario de 1.5 a 3 masas de júpiter con una distancia orbital al baricentro del sistema binario de 1.1 a 1.45 U.A. También se sugería continuar con las observaciones del sistema binario CM Draconis durante algunos años más (Deeg et al. 2000) para verificar o descartar a este candidato. El análisis de los tiempos de los mínimos, con datos más recientes, es el objetivo de esta memoria.

1.3 Sistema de Referencia de Tiempo

Generalmente se usa como sistema de referencia el de Tiempo Universal (UT). El tiempo UT está definido basado en el período de rotación de la Tierra. A este tiempo se le puede añadir o quitar 1 segundo en junio o en diciembre, dependiendo de si es necesario o no, debido a las variaciones en el movimiento de la Tierra. Algunas veces, por distintas causas, la tierra se retrasa un segundo y al tiempo UT se lo añadimos. Existe otra escala de tiempo, el Tiempo Atómico Internacional, (TAI) y es estrictamente basado en la duración de un segundo. Es el tiempo seguido por los relojes atómicos.

¹<http://www.iac.es/proyect/tep/tephome.html>

En enero de 1972 se empezó a definir UT y TAI por separado, empezando con $\text{TAI}-\text{UT}=10.0$ segundos. El primer cambio de tiempo UT sucedió, según el U.S. Navy Observatory (USNO), el 30 de junio de 1972, y actualmente, desde el 1 de enero del 2006 la cuenta es:²

\implies TAI tiene 33 segundos más que el UTC.

En la tabla 1.1³ podemos ver como se han hecho estas conversiones de los tiempos universales a los tiempos atómicos internacionales. En el Apéndice A, demostramos que el empleo del UT o del TAI causa diferencias relevantes en nuestro análisis. Como el TAI es la escala de tiempo que no introduce errores en el cálculo preciso de períodos, en este trabajo hemos expresado todos los tiempos de los mínimos de eclipses en la escala TAI.

²información obtenida en la página <http://tycho.usno.navy.mil/leapsec.html>

³<ftp://maia.usno.navy.mil/ser7/>

Tabla 1.1: Tabla de conversión UT a TAI

1972	JAN	1=JD 2441317.5	TAI-UTC=10.0S
1972	JUL	1=JD 2441499.5	TAI-UTC=11.0S
1973	JAN	1=JD 2441683.5	TAI-UTC=12.0S
1974	JAN	1=JD 2442048.5	TAI-UTC=13.0S
1975	JAN	1=JD 2442413.5	TAI-UTC=14.0S
1976	JAN	1=JD 2442778.5	TAI-UTC=15.0S
1977	JAN	1=JD 2443144.5	TAI-UTC=16.0S
1978	JAN	1=JD 2443509.5	TAI-UTC=17.0S
1979	JAN	1=JD 2443874.5	TAI-UTC=18.0S
1980	JAN	1=JD 2444239.5	TAI-UTC=19.0S
1981	JUL	1=JD 2444786.5	TAI-UTC=20.0S
1982	JUL	1=JD 2445151.5	TAI-UTC=21.0S
1983	JUL	1=JD 2445516.5	TAI-UTC=22.0S
1985	JUL	1=JD 2446247.5	TAI-UTC=23.0S
1988	JAN	1=JD 2447161.5	TAI-UTC=24.0S
1990	JAN	1=JD 2447892.5	TAI-UTC=25.0S
1991	JAN	1=JD 2448257.5	TAI-UTC=26.0S
1992	JUL	1=JD 2448804.5	TAI-UTC=27.0S
1993	JUL	1=JD 2449169.5	TAI-UTC=28.0S
1994	JUL	1=JD 2449534.5	TAI-UTC=29.0S
1996	JAN	1=JD 2450083.5	TAI-UTC=30.0S
1997	JUL	1=JD 2450630.5	TAI-UTC=31.0S
1999	JAN	1=JD 2451179.5	TAI-UTC=32.0S
2006	JAN	1=JD 2453736.5	TAI-UTC=33.0S

2

Método de análisis de los tiempos de los mínimos de los eclipses binarios

Sabemos que existen distintos métodos para buscar planetas, sin embargo en el caso de un sistema binario donde existe un planeta que orbita el baricentro de las estrellas con un período relativamente largo, necesitamos buscar otro método. El método de tránsito nos es útil cuando el planeta gira alrededor de la estrella, o baricentro en nuestro caso, con período relativamente corto, y con una órbita que esté alineada para causar tránsitos. Si estas condiciones no se cumplen nos conviene estudiar el comportamiento de la periodicidad del sistema binario para tratar de entender la existencia de un acompañante.

El método de análisis de los tiempos de los mínimos es también conocido como método observado menos calculado (O-C). Este consiste en la elaboración de un diagrama que representa los tiempos observados donde suceden los eclipses menos los tiempos que se han calculado de acuerdo a una efeméride adoptada (Zhou 1999). Esta representación se hace en función del tiempo. Los sistemas binarios también nos permiten el descubrimiento de planetas gigantes aunque no tengan una órbita plana, esto se debe a que el tercer objeto altera el baricentro del sistema, provocando así un desfase en los tiempos de los eclipses. Para poder calcular el tiempo donde creemos que ocurrirá el eclipse adoptamos una efeméride lineal "calculada" a la que le vamos a llamar época de referencia $T_{c,0}$, también necesitamos conocer el período del sistema (P_c), y con esto podemos obtener los tiempos de los mínimos calculados:

$$T_{c,n} = T_{c,0} + nP_c, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.1)$$

donde n es el número de ciclos o la fase del sistema desde nuestro valor de época inicial, y el cálculo O-C es entonces;

$$(O - C)_n = T_n - T_{n,c} = T_n - (T_{c,0} + nP_c) \quad (2.2)$$

donde T_n es el tiempo del eclipse observado.

Si suponemos que tenemos un sistema con un Período (P) constante, medimos los tiempos de los mínimos en los momentos $T_n = (T_1, T_2, \dots, T_n)$, donde las ecuaciones para T_n vienen dadas dependiendo del caso:

- la distancia del sistema binario es constante con respecto al observador.
- la velocidad del sistema binario es relativa al observador.
- la velocidad y la aceleración del sistema binario son relativas al observador.
- la velocidad angular del sistema binario es relativa al observador.
- la velocidad angular y la distancia del sistema binario varía con respecto al observador.

En todos los casos tratamos con las variables, T_n y P , que se refieren tanto al tiempo como al período observado; también tenemos T'_n y P' que se refieren tanto al tiempo como al período intrínseco del sistema de referencia β (situado dentro del sistema eclipsante) y también tenemos $T_{n,c}$ y P_c , que se refieren a los valores calculados con la efeméride.

2.1 A distancias constantes

Este caso se refiere a que el baricentro no cambia su posición con respecto al observador.

$$T'_n = nP' + T'_0 \quad (2.3)$$

donde, T'_n y P' se refiere al tiempo y al período en el sistema de eclipses

$$T_n = T'_n + \frac{d_n}{c_{luz}} \quad (2.4)$$

Este T_n se refiere, como se ha mencionado anteriormente, al tiempo visto por el observador, que como podemos ver está relacionado con los tiempos dentro del sistema de referencia β más una relación de la distancia partida por la velocidad de la luz, que sería el tiempo que tarda el observador en ver los eclipses; donde d_n es la distancia del observador al baricentro de un eclipse n y c_{luz} es la velocidad de la luz.

Ahora, en este caso en particular, donde la distancia al baricentro no varía, tenemos que:

$$T_n = T'_n + \frac{d}{c_{luz}}$$

$$T_n = nP' + T'_0 + \frac{d}{c_{luz}} \quad (2.5)$$

Entonces, con la ecuación 2.1, los tiempos O-C vendrán dados por:

$$(O - C)_n = T_n - T_{c,n} = nP' + T'_0 + \frac{d}{c_{luz}} - T_{c,0} - nP_c \quad (2.6)$$

$$= T'_0 + \frac{d}{c_{luz}} - T_{0,c} + n(P' - P_c) \quad (2.7)$$

$$= a + nb \quad (2.8)$$

Es decir, para el caso de la distancia constante, los tiempo O-C se pueden describir con una ecuación lineal $Y = a + nb$ en la cual:

$$a = T'_0 + \frac{d}{c_{luz}} - T_{c,0} = T_0 - T_{c,0} \quad (2.9)$$

vemos que a indica una diferencia dentro de la época inicial intrínseca u observada y la calculada, y;

$$b = P' - P_c \quad (2.10)$$

donde b indica una diferencia entre el período instrínseco u observado y el calculado.

2.2 Velocidad relativa al observador

En este caso las fórmulas dentro del sistema de referencia β son las mismas, tenemos que la distancia ahora depende de la velocidad V_0 tal que,

$$d_n = V_0(T'_n - T'_0) + d_0 \quad (2.11)$$

Y los tiempos observados son:

$$T_n = T'_n + \frac{d_n}{c_{luz}} \quad (2.12)$$

$$T_n = T'_n + \frac{V_0(T'_n - T'_0) + d_0}{c_{luz}} \quad (2.13)$$

$$T_n = nP' + T'_0 + \frac{V_0 nP'}{c_{luz}} + \frac{d_0}{c_{luz}} \quad (2.14)$$

$$T_n = nP' \left(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}\right) + T'_0 + \frac{d_0}{c_{luz}} \quad (2.15)$$

Entonces, los tiempo O-C en este caso son:

$$(O - C)_n = T_n - T_{c,n} = nP'(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}) + T'_0 + \frac{d_0}{c_{luz}} - T_{c,0} - nP_c \quad (2.16)$$

$$= n\left(P'(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}) - P_c\right) + T'_0 + \frac{d_0}{c_{luz}} - T_{c,0} \quad (2.17)$$

$$= nb + a \quad (2.18)$$

Similar a la sección 2.1, que es el caso de las distancias constantes, se obtiene una ecuación lineal, con los parámetros:

$$a = T_0 - T_{c,0} \quad (2.19)$$

que es similar al caso de las distancias constantes, y;

$$b = P'(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}) - P_c \quad (2.20)$$

que indica una diferencia dentro del período observado P y el calculado P_c , donde el período observado está relacionado al período instrínseco del sistema por la siguiente ecuación;

$$P = P'(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}) \quad (2.21)$$

Cabe mencionar que típicamente no conocemos ni V_0 ni P' , y entonces el conocimiento del parámetro b desde un ajuste lineal, sólo sirve para refinar el período observable P sobre un período P_c previamente calculado, con $P = P_c + b$. Es decir, el parámetro b permite corregir un pámetro previamente derivado.

2.3 Velocidad y aceleración relativa al observador

En este caso tenemos que el sistema no sólo se mueve si no que sufre una aceleración constante a_c como vemos más abajo a la hora de analizar las distancias relativas,

$$d_n = \frac{1}{2}a_c(T'_n - T'_0)^2 + V_0(T'_n - T'_0) + d_0 \quad (2.22)$$

Por lo tanto ahora nuestro análisis se desenvuelve así:

$$T_n = T'_n + \frac{d_n}{c_{luz}} \quad (2.23)$$

$$T_n = T'_n + \frac{\frac{1}{2}a_c(T'_n - T'_0)^2 + V_0(T'_n - T'_0) + d_0}{c_{luz}} \quad (2.24)$$

$$T_n = nP' + T'_0 + \frac{1}{2c_{luz}} a_c (nP')^2 + \frac{V_0 nP'}{c_{luz}} + \frac{d_0}{c_{luz}} \quad (2.25)$$

$$T_n = nP' \left(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}\right) + (nP')^2 \frac{a_c}{2c_{luz}} + T'_0 + \frac{d_0}{c_{luz}} \quad (2.26)$$

En consecuencia los tiempos O-C están dados por:

$$(O - C)_n = T_n - T_{c,n} = (nP')^2 \frac{a_c}{2c_{luz}} + nP' \left(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}\right) + T'_0 + \frac{d_0}{c_{luz}} - T_{c,0} - nP_c \quad (2.27)$$

$$= (nP')^2 \frac{a_c}{2c_{luz}} + n \left(P' \left(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}\right) - P_c \right) + T_0 \quad (2.28)$$

$$= n^2 c + nb + a \quad (2.29)$$

En este caso tenemos 3 parámetros, a , b y c :

$$a = T_0 - T_{c,0} \quad (2.30)$$

$$b = P' \left(1 + \frac{V_0}{c_{luz}}\right) - P_c \quad (2.31)$$

$$c = P'^2 \frac{a_c}{2c_{luz}} \quad (2.32)$$

El conocimiento del parámetro c permite una derivación de la aceleración del sistema:

$$a_c = \frac{2c_{luz}c}{P'^2} \quad (2.33)$$

2.4 Distancias que varían sinusoidalmente

Esto sucede debido a la presencia de un tercer cuerpo que orbita a ambas estrellas a la vez, y añade al sistema otro baricentro que provoca una rotación de ambas estrellas alrededor de este segundo centro de masa.

En los análisis anteriores hemos estudiado como se mide la distancia del observador al sistema, en un caso no variaba, en el otro variaba con una velocidad constante y en el tercer caso la variación tenía una aceleración relativa al observador. En este caso el sistema tiene un comportamiento distinto porque, aparte de girar alrededor del centro de masa común, ese mismo centro de masa gira alrededor de otro que tienen en común con el tercer cuerpo. Basándonos en este comportamiento buscamos la distancia en términos de tiempo, para poder calcular el tiempo no sólo según el observador, pero también el intrínseco del sistema. Para el caso de una órbita circular del tercer cuerpo alrededor del baricentro común, la distancia del observador a la del binario eclipsante puede describirse de la siguiente manera:

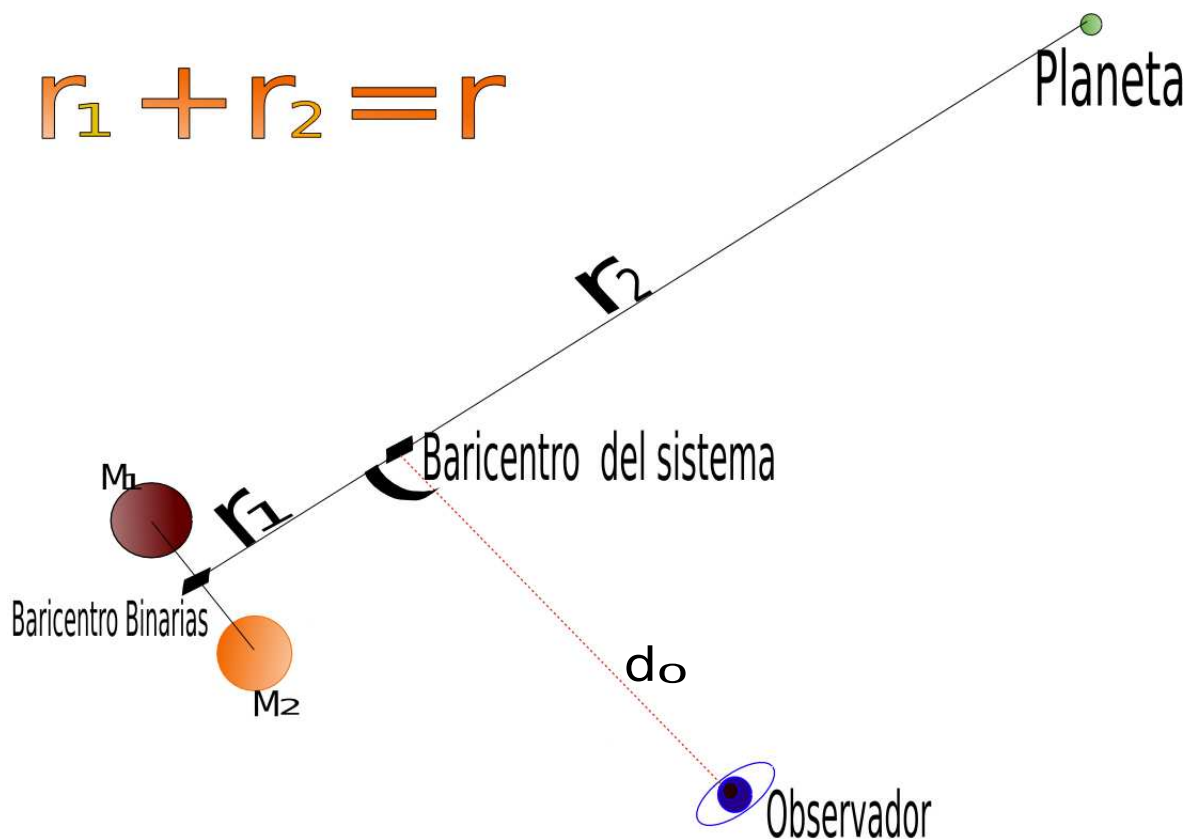


Figura 2.1: Representación de las binarias con un tercer cuerpo que las orbita y sus respectivos centros de masa. Podemos ver entre las estrellas una marca que nos indica alrededor de que punto giran ambas estrellas, a este punto lo llamamos baricentro de las binarias, BC_{bec} . También podemos ver otra marca entre el BC_{bec} y el planeta, este es el baricentro del sistema, BC_{bpl} , alrededor del cual giran tanto el planeta como el baricentro de las binarias.

$$d_n = A \sin(\kappa - 90^\circ) + d_0. \quad \text{Ver figura 2.1}$$

Más abajo vemos la ecuación de distancia representada con los términos con los que hemos estado trabajando;

$$d_n = A \sin\left(\frac{2\pi T'_n}{P_3} + \phi\right) + d_0 \quad (2.34)$$

Donde A es la amplitud del movimiento del baricentro del binario eclipsante alrededor del baricentro de los 3 cuerpos, ϕ es la fase del sistema en el momento $T' = 0$ y P_3 es el período del tercer cuerpo, o del baricentro de las binarias alrededor del baricentro del sistema.

Calculamos de nuevo los tiempos observados,

$$T_n = T'_n + \frac{d_n}{c_{luz}} \quad (2.35)$$

$$T_n = T'_n + \frac{A \sin\left(\frac{2\pi T'_n}{P_3} + \phi\right) + d_0}{C_{luz}} \quad (2.36)$$

Según la ecuación 2.3 podemos entonces decir que en este caso;

$$T_n = nP' + T'_o + \frac{A}{C_{luz}} \sin\left(\frac{2\pi T'_n}{P_3} + \phi\right) + \frac{d_0}{C_{luz}} \quad (2.37)$$

La ecuación para los tiempos O-C se desarrolla entonces como:

$$(O - C)_n = nP' + T'_o + \frac{A}{c_{luz}} \sin\left(\frac{2\pi T'_n}{P_3} + \phi\right) + \frac{d_0}{c_{luz}} - T_{c,0} - nP_c \quad (2.38)$$

Con $T'_n = nP' + T'_o$ y ordenando según las dependencias con n llegamos a:

$$(O - C)_n = T'_o - T_{c,0} + \frac{d_0}{c_{luz}} + n(P' - P_c) + \frac{A}{c_{luz}} \sin\left(\frac{n2\pi P'}{P_3} + \frac{2\pi T'_o}{P_3} + \phi\right) \quad (2.39)$$

$$= a + nb + m \sin(cn + d) \quad (2.40)$$

Antes de indicar los coeficientes a , b , c , d y m en detalle, para conocer la distancia A del baricentro de las binarias, al baricentro del sistema triple, aplicamos los conocimientos del centro de masa,

$$M_B BC_{bec-bpl} = M_P BC_{bpl-pl} \quad (2.41)$$

donde M_B es la masa de las binarias ($M_B = M_{B1} + M_{B2}$); M_P es la masa del planeta; $BC_{bec-bpl}$ es la distancia del baricentro de las binarias al baricentro del sistema y; BC_{bpl-pl} es la distancia del baricentro del sistema al planeta. Pero para mayor simplicidad vamos a renombrar los términos de distancia así:

$$BC_{bec-bpl} \rightarrow r_1 (= A)$$

$$BC_{bpl-pl} \rightarrow r_2$$

$r = r_1 + r_2$ y este término es igual a la distancia que hay entre el baricentro del sistema binario y el planeta.

Vamos a asumir que el sistema binario como uno solo, y la masa de éste como la suma de cada uno de sus componentes, como hemos mencionado anteriormente, por lo tanto partiendo de la fórmula que relaciona las masas con las distancias para buscar el centro de masa, que en nuestro caso es igual que el baricentro de las binarias, reescribimos la fórmula anterior así:

$$M_B r_1 = M_P r_2$$

$$M_B r_1 = M_P (r - r_1)$$

$$M_B r_1 = M_P r - M_P r_1$$

$$M_B r_1 + M_P r_1 = M_P r$$

$$r_1 (M_B + M_P) = M_P r$$

En conclusión;

$$r_1 = \frac{M_P}{M_B + M_P} r \tag{2.42}$$

Ahora tenemos la distancia del baricentro del sistema binario al baricentro del sistema de tres cuerpos, pero la tenemos en términos de la distancia total; esta distancia la podemos obtener a partir del período del sistema, como nos dice la tercera ley de Kepler:

$$P_3^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_B + M_P)} r^3 \tag{2.43}$$

donde P_3 se refiere al período del planeta alrededor del baricentro en común con las binarias. Despejando para r tenemos:

$$r = \sqrt[3]{\frac{P_3^2 G (M_B + M_P)}{4\pi^2}}$$

por lo tanto nuestra ecuación para encontrar la distancia entre el baricentro del binario y el baricentro del sistema completo es ahora:

$$r_1 = \frac{M_P}{M_B + M_P} \sqrt[3]{\frac{P_3^2 G (M_B + M_P)}{4\pi^2}}$$

Pero si asumimos que M_P es mucho menor que M_B , podemos dejar la ecuación así:

$$r_1 = \frac{M_P}{M_B} \sqrt[3]{\frac{P_3^2 G (M_B)}{4\pi^2}}$$

o lo que es lo mismo:

$$r_1 = \frac{M_P}{M_B^{\frac{2}{3}}} \sqrt[3]{\frac{P_3^2 G}{4\pi^2}} = A \tag{2.44}$$

La ecuación de ajuste sinusoidal viene dada por $Y = a + bn + m\text{Sen}(cn + d)$, donde a y b son similares a los casos anteriores, m se refiere a la amplitud de la variación de los tiempos O-C; c es el incremento en fase en cada intervalo T_n, T_{n+1} y d es la fase del sistema en el momento T'_0 .

En resumen:

$$a = T'_0 + \frac{d}{c_{luz}} - T_{c,0} = T_0 - T_{c,0} \quad (2.45)$$

$$b = P' - P_c \quad (2.46)$$

$$m = \frac{A}{c_{luz}} \quad (2.47)$$

$$c = \frac{2\pi P'}{P_3} \quad (2.48)$$

$$d = \frac{2\pi T'_0}{P_3} + \phi \quad (2.49)$$

2.5 Distancias que varían sinusoidalmente con una velocidad relativa al observador

Cuando hay dos estrellas que orbitan un centro de masas común, y hay un tercer cuerpo que orbita a ambas estrellas a la vez, existe un segundo centro de masas que se encuentra entre el centro de masa de las binarias y el tercer cuerpo, como vimos en la sección 2.4, donde el centro de masa de las binarias gira, al igual que el planeta, en torno al centro de masas común entre los 3 cuerpos. Si además de que observemos un comportamiento de este tipo en el sistema, podemos ver que tiene una velocidad relativa al observador, es entonces cuando el ajuste adecuado es el de la sumatoria del ajuste al seno más el del ajuste lineal. Cuando calculamos el O-C del ajuste sinusoidal(ver ecuación 2.40), no hemos considerado la velocidad relativa al observador, aunque ésta aparece de todos modos, que corresponde al término b calculado en la sección 2.2, éste ahora se expresa de forma similar al caso de la velocidad constante, $b = P' \left(1 + \frac{V_0}{C_{luz}}\right) - P_c = P - P_c$. El resto de los coeficientes son los mismos en este caso que en el anterior (sección 2.4).

3

CM Draconis

CM Draconis es uno de los sistemas binarios de menor masa y tamaño que conocemos que tenga a sus dos componentes de masas aproximadamente iguales, ambas estrellas son de tipo M4 de la secuencia principal, con un total de masa de $0.444M_{\odot}$ y con un área total de un 12% del área que ocupa el disco solar (Lacy 1977). Ésta es una de las razones por la que este sistema es de gran importancia, porque, gracias a que su área es tan pequeña, nos permitirá una alta precisión para los tránsitos planetarios de ciertos tamaños, mientras que el hecho de que la binaria no sea muy masiva permite un mayor movimiento de su baricentro cuando existe un tercer cuerpo que ejerce alguna fuerza gravitatoria sobre el sistema, permitiendo así un mejor análisis del método de la medida de los tiempos de los mínimos de las binarias eclipsantes.

3.1 Datos del sistema CM Draconis

Los Datos del sistema son los siguientes:

Tabla 3.1: Distintos períodos, en días, calculados para CM Draconis

Período (días)	1.268 389 65 \pm 0.000 000 10 (Lacy 1977)
	1.268 390 9 \pm 0.000 002 4 (Metcalfé et al. 1996)
	1.268 389 861 \pm 0.000 000 005 (Deeg et al. 2000)

Tabla 3.2: Distintas épocas, en días heliocéntricos, calculados para CM Draconis

Época (JD Heliocéntrico)	Mínimo Primario	2 442 893.932 49 \pm 0.000 10 (Lacy 1977)
		2 449 830.757 00 \pm 0.000 01 (Deeg et al. 2000)
	Mínimo Secundario	2 442 894.565 67 \pm 0.000 10 (Lacy 1977)
		2 449 831.390 03 \pm 0.000 01 (Deeg et al. 2000)

Tabla 3.3: Otros datos importantes del sistema binario CM Draconis

Inclinación Orbital	$89.82^\circ \pm 0.05^\circ$ (Lacy 1977)
Excentricidad	0.0050 ± 0.0015 (Metcalf et al. 1996)
Velocidad radial Baricentro	-118.71 ± 0.08 <i>Km/s</i> (Metcalf et al. 1996)
Distancia	14.49 pc (Chabrier & Baraffe 1995)

Tabla 3.4: Datos de los componentes del sistema CM Draconis

	CM Draconis A Componente Mayor	CM Draconis B Componente Menor
Semi Eje Mayor (Metcalf et al. 1996) a sin i ($10^6 km$)	1.2584 ± 0.0025	1.40 ± 0.05
Masa M sin i (Msol) (Metcalf et al. 1996) (Lacy 1977)	0.2306 ± 0.0010 0.238 ± 0.012	0.2135 ± 0.0010 0.208 ± 0.009
Luminosidad Relativa (Lacy 1977)	$53.4 \pm 0.2\%$	$46.6 \pm 0.2\%$
Radios Rsol,(Chabrier & Baraffe 1995)	0.252 ± 0.008	0.235 ± 0.007
Temperatura Efectiva (Chabrier & Baraffe 1995)	3150 ± 100	3150 ± 100
Magnitud bolométrica (Chabrier & Baraffe 1995) at 14.9pc	10.39	10.54
Magnitud visual (Chabrier & Baraffe 1995) at 14.9 pc	12.77	12.92
Tipo Espectral	M4.5	M4.5

3.2 Tiempos O-C del sistema binario CM Draconis

En la curva de luz de la figura 3.1 podemos ver tanto el eclipse primario como el eclipse secundario. Están representados con 17176 puntos obtenidos entre 1994 y 1996 con una cobertura completa de todas las fases de CM Draconis.

Como podemos ver en la tabla 3.5, tenemos datos de tiempos de los mínimos desde 1977 hasta 2005, datos éstos han sido tomados con varios telescopios. Los datos del 1977 fueron tomados por Lacy (Lacy 1977), los datos tomados entre 1994 y 2001 fueron tomados por varios telescopios del proyecto TEP (Deeg et al. 2000); los datos de 'Sleuth' han sido tomados como parte de la red TrES, y sólo uno de los puntos fue tomado de la IBVS5603 (Dvorak 2005). El total de datos que tenemos es de 62 eclipses tanto primarios como secundarios; 27 de esos eclipses son primarios y los restante 35 son secundarios. Los tiempos de los mínimos han sido medidos por Hans Deeg usando el método de 7-segmentos de Kwee-van-Woerden (Kwee & van Woerden 1956). Sólo se incluyeron aquellos eclipses

que estaban completos, o sea, aquellos que tenían tanto el ingreso y como el egreso, y también aquellos con errores formales de menos de 10 segundos. La última columna indica la diferencia O-C, dentro de los tiempos de mínimos medidos y la efeméride lineal publicado en Deeg et al. 2000, lo cual está dado por: $T_{c,n} = T_{c,0} + nP_c$ con un período de $P_{orb} = 1.268\ 389\ 861 \pm 0.000\ 000\ 005$ días y donde $T_0 = HJD\ 2\ 449\ 830.757\ 00 \pm 0.000\ 01$ para los mínimos primarios y $T_0 = HJD\ 2\ 449\ 831.390\ 03 \pm 0.000\ 01$ para los mínimos secundarios.

La figura 3.2 está elaborada con los residuos O-C del resto de los tiempos que esperábamos menos los tiempos donde sucedieron los eclipses. El sistema actualmente utilizado ha sido el de TAI-29 segundos. La razón para este cambio de escala ha sido la de mantener en el sistema TAI, la misma efeméride dada por Deeg et al.(2000) (que se basa en el tiempo UT) y con la época de referencia, $T_{c,0} = HJD\ 2\ 449\ 830.757\ 07$ (Ver tabla 1.1, indicando TAI-UT=29 seg en $T_{C,0}$, el 23 de abril de 1995). Los primeros datos, obtenidos por Lacy en 1977, no los hemos considerado porque, además de que existe un salto muy grande entre estos 3 eclipses y el resto de los eclipses, si nos fijamos en las barras de error veremos que esos datos tienen un error muy grande lo cual no nos conviene para calcular los ajustes. Pero lo seguiremos teniendo en cuenta para calcular los eclipses, porque es a partir de ellos que Deeg et al.(2000) calcularon la efeméride del sistema que seguimos utilizando en esta memoria.

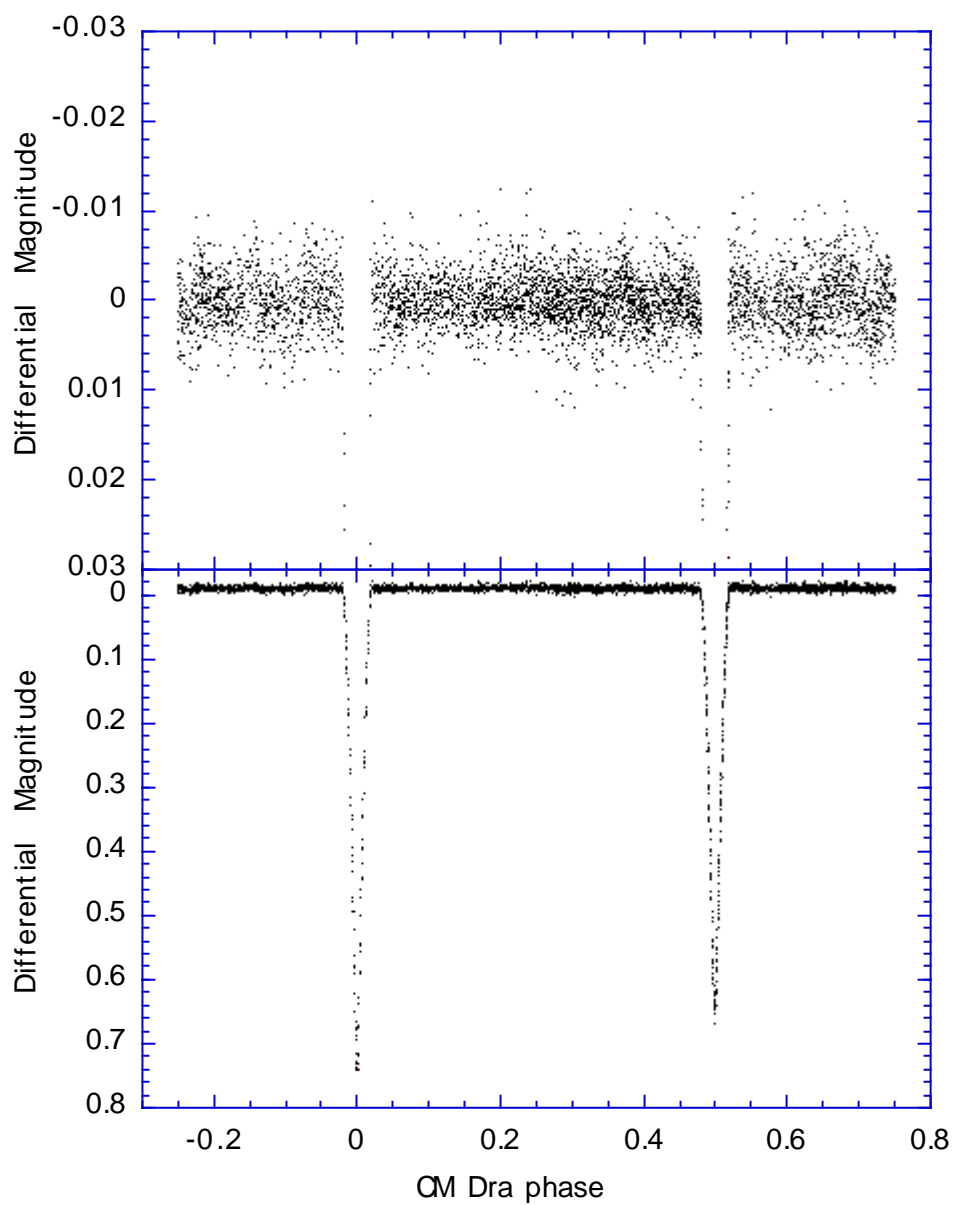


Figura 3.1: Curva de Luz del sistema CM Draconis en función de la fase. Tanto la imagen superior como la inferior muestran la curva de luz de CM Draconis pero con escalas de magnitudes diferentes. Esta imagen la tomamos del artículo presentado por Deeg et al. 1998.

Tabla 3.5: Datos usados en los análisis de los tiempos mínimos de CM Draconis, con sus valores O-C

HJDcorr(TAI-29)	Prim/Sec	Fuente	# Época	OC(segundo)	OC (error)
2442893,93248	1	lacy	-5469,00029	-32,16	4,37469
2442912,95875	1	lacy	-5453,99996	4,31	7,05335
2442994,76840	2	lacy	-5389,50114	-24,30	3,08189
2449494,63371	1	iac80	-264,99998	1,77	2,73283
2449497,80339	2	lick	-262,50100	-9,08	4,71105
2449499,70723	1	iac80	-261,00001	-1,2	2,39881
2449500,97551	1	lick	-260,00010	-11,2	6,27428
2449501,60875	2	iac80	-259,50085	7,27	8,87674
2449511,75580	2	lick	-251,50090	1,56	5,02010
2449562,49152	2	iac80	-211,50081	11,90	2,31016
2449815,53633	1	IAC	-11,99999	1,13	7,47360
2449828,85325	2	Lick	-1,50092	-0,02	2,04768
2449830,75707	1	Lick	0,00006	6,05	1,22688
2449833,92675	2	Lick	2,49903	-5,16	1,42560
2449840,90410	1	Lick	7,99999	-1,63	3,00672
2449853,58807	1	JKT	18,00004	4,54	4,06944
2449855,48953	2	JKT	19,49915	8,00	2,80800
2449858,66157	1	JKT	21,99999	-0,6	3,28320
2449872,61381	1	IAC	32,99996	-4,38	3,83616
2449881,49253	1	IAC	39,99995	-5,16	4,05216
2449947,44884	1	OHP	91,99998	-2,35	1,58976
2449949,35023	2	OHP	93,49904	-4,93	1,33056
2449954,42392	2	OHP	97,49914	6,35	2,80800
2450221,42119	1	IAC	308,00009	9,51	1,41696
2450222,68932	1	IAC	308,99988	-13,03	2,35008
2450243,61673	2	IAC	325,49907	-0,74	8,81280
2450244,88511	2	Lick	326,49907	-1,13	4,61376
2450252,49540	2	OHP	332,49903	-5,38	2,74752
2450257,56903	2	OHP	336,49909	0,72	3,07584
2450259,47272	1	OHP	337,99996	-4,44	4,39776
2450262,64264	2	INT	340,49913	5,08	2,88576
2450272,78967	2	Lick	348,49906	-2,60	2,64384
2450636,81775	2	Lickcl	635,49921	13,95	3,56607
2450643,79496	1	Lickcl	641,00005	5,38	3,03221
2450650,76987	2	Lickcl	646,49908	-0,61	4,76064
2450710,38432	2	IAC	693,49917	9,87	3,45211
2450905,71629	2	IAC	847,49912	3,94	1,83341
2450993,87049	1	Lick	916,99999	-0,81	5,26366
2450995,77196	2	Lick	918,49911	3,52	4,11074
2451000,84553	2	Lick	922,49912	4,43	3,66051
2451009,72426	2	Lick	929,49912	4,52	4,21684
2451340,77398	2	Lick	1190,49910	1,74	2,41626
2451359,79990	2	Lick	1205,49915	7,97	2,22843
2451373,75218	2	Lick	1216,49915	7,24	1,52945
2451616,65007	1	IAC	1408,00011	12,54	3,15801
2451766,32007	1	Ural	1526,00012	12,69	3,65567
2451780,27238	1	Ural	1537,00013	14,55	2,62380

2452416,36877	2	Ural	2038,49924	17,45	3,60072
2452799,42255	2	INT	2340,49928	21,60	1,33056
2452853,33033	1	Ural	2383,00023	25,05	2,47294
2453082,90893	1	IBVS5603	2564,00026	28,61	8,64000
2453117,78853	2	Sleuth	2591,49938	32,24	7,69850
2453120,96065	1	Sleuth	2594,00028	30,55	0,91385
2453136,81427	2	Sleuth	2606,49929	22,92	4,00317
2453138,71824	1	Sleuth	2608,00038	41,95	5,71657
2453145,69303	2	Sleuth	2613,49932	25,60	6,35671
2453153,93884	1	Sleuth	2620,00032	35,19	6,33087
2453160,91388	2	Sleuth	2625,49945	40,43	8,35307
2453456,44854	2	ural	2858,49931	24,80	4,72055
2453472,30468	1	ural	2871,00030	33,25	2,90442
2453498,30546	2	ural	2891,49935	29,43	5,32138
2453503,37902	2	ural	2895,49935	29,30	3,64444

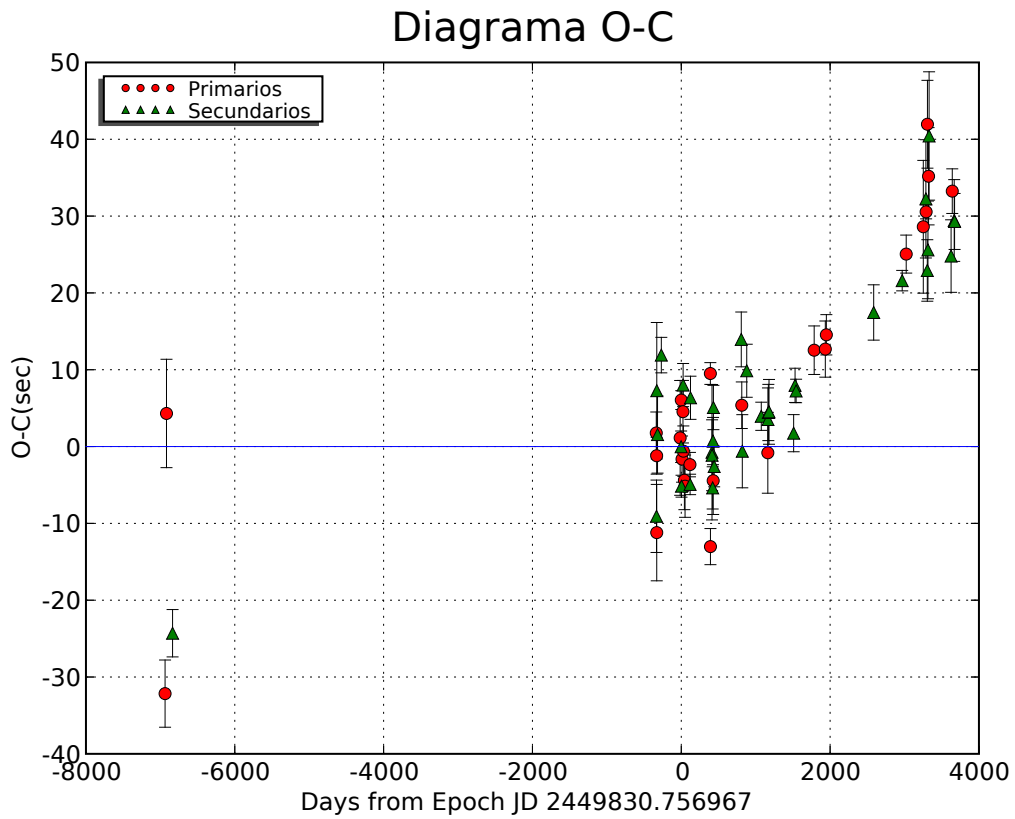


Figura 3.2: Resúdos O-C de CM Draconis desde 1944 hasta el 2000

4

Análisis de los ajustes del sistema CM Draconis

4.1 Análisis de fase de los eclipses

Un cambio en la fase del eclipse secundario, suponiendo que el primario tiene una fase igual a cero, puede indicar un cambio del ángulo del periastro y/o un cambio de la excentricidad. Para comprobarlo, vamos a hacer dos grupos con los datos que tenemos, y vamos a utilizar los puntos donde haya mayor concentración de datos. En este caso la muestra 1 abarca los tiempos desde 0 días hasta 500 días, mientras que la muestra 2 abarcará los días desde 3,100 días hasta 4,000 días (estos días son con respecto a la época DJH 2 449 830.757 07). Lo primero que hemos hecho es buscar el promedio de las fases de los eclipses primarios y los secundarios. Lo que se espera encontrar, en caso de que no haya ninguna alteración en el sistema binario, es que los eclipses primarios tengan una fase igual a cero mientras que los eclipses secundarios tengan una fase aproximadamente igual a 0.5. Para determinar esto tomamos el valor de las fases de los días deseados basado en la efeméride de Deeg et al (2000), separamos los eclipses primarios de los eclipses secundarios y sacamos un promedio de estos valores. Para esto se ha usado un programa escrito en “python” llamado “Epochs.py” que podemos ver en más detalle en el apéndice B.2. Los valores que hemos obtenido para estos datos en ambas muestras y para los eclipses primarios y secundarios son los siguientes:

- El valor promedio de las fases de los eclipses Primarios de la muestra 1 es:
 $1.83 \times 10^{-05} \pm 1.00 \times 10^{-05}$
- El valor promedio de las fases de los eclipses Primarios de la muestra 2 es:
 $30.94 \times 10^{-05} \pm 2.10 \times 10^{-05}$
- El valor promedio de las fases de los eclipses Secundarios de la muestra 1 es:
 0.4990818 ± 0.0000143

- El valor promedio de las fases de los eclipses Secundarios de la muestra 2 es:
0.4993484 \pm 0.0000202

La diferencia entre el eclipse primario y secundario para la muestra 1 es de 0.4990635 \pm 0.0000174 fases. Mientras que la diferencia entre los eclipses primarios y secundarios para la muestra 2 es de 0.4990390 \pm 0.0000292 fase.

Como podemos ver estos números se solapan con sus errores indicándonos que no hay cambio relevante en la fase del eclipse secundario.

4.2 Ajustes de los eclipses

Ajustar nuestro diagrama O-C a distintas curvas nos da información sobre el comportamiento de nuestro sistema binario. Esta información viene dada en forma de la ecuación que mejor se ajuste a nuestros datos. Hemos hecho el mismo análisis para los eclipses primarios, secundarios y para todos los eclipses a la vez.

En el caso de un ajuste lineal, si asumimos que el período intrínseco del sistema es constante, éste nos indica que el período que vemos desde nuestro sistema de referencia es más largo o más corto dependiendo de si la pendiente es positiva o negativa (Zhou 1999). Cuando tenemos un ajuste polinómico es una indicación de que el período del sistema está cambiando de manera constante (Zhou 1999). En el caso de que el mejor ajuste sea sinusoidal podemos deducir que hay un cambio periódico del período (Zhou 1999).

Se han usado unos programas en “python” y “gnuplot” para encontrar los mejores ajustes y los valores de los χ^2 y de las σ . El χ^2 es un término estadístico que nos da información sobre la calidad del ajuste, a menor χ^2 mejor es el ajuste de nuestros datos en la curva porque menor es la dispersión entre estos datos y su ajuste. La σ representa el valor medio cuadrático que es la raíz cuadrada del χ^2 . En “gnuplot” hay una rutina llamada ‘fit’ que sirve para encontrar los mejores ajustes, a partir de unos datos iniciales, dados por nosotros mismos. Este programa también nos da los errores junto con los datos, además de los valores de los pesos y de los χ^2 . Con “python” se ha escrito un programa llamado “TAI.py” (apéndice B.3) que usa los valores de mejor ajuste de “gnuplot” para poder representar estos ajustes. El programa trabaja tanto con los datos de los eclipses primarios y secundarios combinados como por separado, y también nos da los valores estadísticos de esos ajustes. Hemos ejecutado tanto los programas de “gnuplot” como “TAI.py” para los ajustes lineales, polinómicos, sinusoidales y para la combinación del lineal y el sinusoidal, usando las siguientes ecuaciones;

Lineal:

$$Y = A + Bx \quad (4.1)$$

Polinómico:

$$Y = A + Bx + Cx^2 \quad (4.2)$$

Sinusoidal:

$$Y = A + M \sin(Cx + D) \quad (4.3)$$

Lineal + Sinusoidal:

$$Y = A + Bx + M \sin(Cx + D), \quad (4.4)$$

donde x se refiere al número de días dentro de un tiempo de mínimo T_n y la época de referencia, T_0 ; $x = T_n - T_0$.

Para calcular los χ^2 tenemos que saber el peso de los errores de las muestras y dividimos éstos por el total de puntos menos el número de parámetros que tiene la fórmula del ajuste que estamos calculando. Mientras que para σ sólo tenemos que sacar la raíz cuadrada del χ^2 . Con estos valores nos guiamos para encontrar el mejor de los ajustes. Para ver esto en más detalle se puede ver el apéndice B.3.

En la figura 4.1 podemos apreciar tanto los ajustes de todos los eclipses como los valores estadísticos para cada caso.

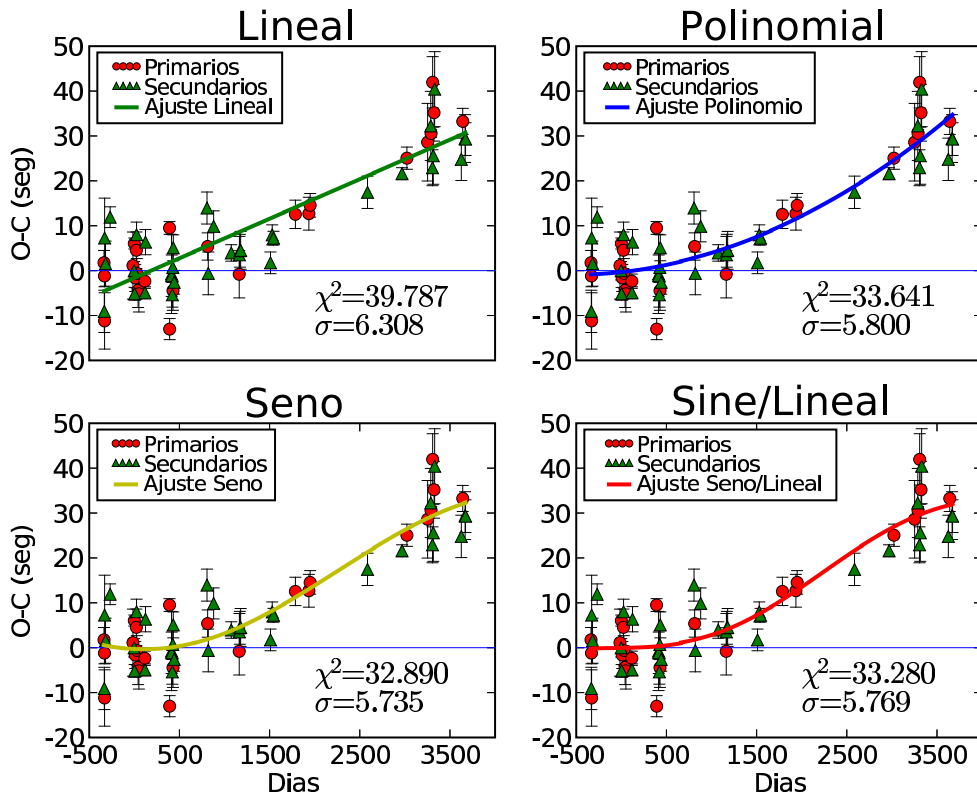


Figura 4.1: Ajustes a los eclipses tanto primarios como secundarios con sus valores estadísticos

Para la representación de estas gráficas hemos usado tanto los eclipses primarios como los secundarios, pero hemos dejado fuera de los ajustes los 3 primeros puntos de Lacy 1977, ya que están muy separados y hay un vacío de datos muy grande entre ellos y los datos que estamos usando; otra razón es que de estos 3 eclipses, dos de ellos son eclipses primarios y

tienen errores muy grandes, de 25 segundos entre ellos.

En esta gráfica vemos representados en el eje x los tiempos de los eclipses. Estos tiempos están en días y se leen a partir de la época del día juliano 2449830.75707; en el eje y tenemos la diferencia de los tiempos de los eclipses observados menos los eclipses calculados, representados en segundos.

Los ajustes y sus parámetros se obtuvieron con ecuaciones en términos de tiempos en días x , pero ahora nos interesa poder analizarlos en números de fase o épocas (ver columna 4 de la tabla 3.5) para poder aplicar las ecuaciones derivadas en el capítulo 2, y por lo tanto convertir las x en n .

$$n = \frac{T_{obs} - T_{c,0}}{P_c}$$

Por lo tanto;

$$x = P_c n \quad (4.5)$$

Lineal:

En días:

$$Y = A + Bx \Leftrightarrow Y = A + BnP_c$$

En fase:

$$y = a + bn \quad (4.6)$$

Con:

$$a = A$$

$$b = B.P_c$$

Polinómico :

En días:

$$Y = A + Bx + Cx^2 \Leftrightarrow Y = A + BnP_c + Cn^2P_c^2$$

En fase:

$$y = a + bn + cn^2 \quad (4.7)$$

Con:

$$a = A$$

$$b = B.P_c$$

$$c = C.P_c^2$$

Sinusoidal:

En días:

$$Y = A + Msen(Cx + D) \Leftrightarrow Y = A + Msen(CnP_c + D)$$

En fase:

$$y = a + msen(cn + d) \quad (4.8)$$

Con:

$$a = A$$

$$m = M$$

$$c = C.P_c$$

$$d = D$$

Lineal + Sinusoidal:

En días:

$$Y = A + Bx + Msen(Cx + D) \iff Y = A + BnP_c + Msen(CnP_c + D)$$

En fase:

$$y = a + bn + msen(cn + d) \tag{4.9}$$

Con:

$$a = A$$

$$b = B.P_c$$

$$m = M$$

$$c = C.P_c$$

$$d = D$$

Vemos que en los 3 casos analizados (primario, secundario y todos los eclipses) consistentemente el χ^2 da un valor claramente más alto comparado con los ajustes del polinomio o del seno. En el caso del seno, se hicieron también ajustes a una función sinusoidal simple ("seno" en figuras 4.1-4.3 y en tablas 4.1-4.6), pero como vimos en el capítulo 2, un sistema binario orbitado por un tercer cuerpo está mejor descrito por una ecuación del tipo "seno más lineal". Con lo cual no vamos a dedicarle mucho tiempo, ya que estamos analizando el ajuste lineal más el sinusoidal.

Analizando estos datos a simple vista después de ver la gráfica 4.1 podríamos decir que el sistema tiene una tendencia a acelerarse y que puede que también haya un tercer cuerpo involucrado en el sistema.

4.2.1 Eclipses Primarios

Estudiamos el comportamiento de los eclipses primarios independientemente de los secundarios, para esto repetimos los ajustes y los representamos utilizando los programas mencionados anteriormente.

Tenemos un total de 25 eclipses primarios donde el mejor de los ajustes corresponde al polinómico con un $\chi^2=31.579$ y una $\sigma=5.619$, y el que menos se ajusta, sin fijarnos en el sinusoidal, es el lineal con $\chi^2=37.566$ y $\sigma=6.129$, como vemos en la figura 4.2.1.

Las tablas 4.3 y 4.4 nos muestran los valores de los parámetros de los eclipses primarios, tanto calculado con respecto a las épocas, como con respecto a la fase.

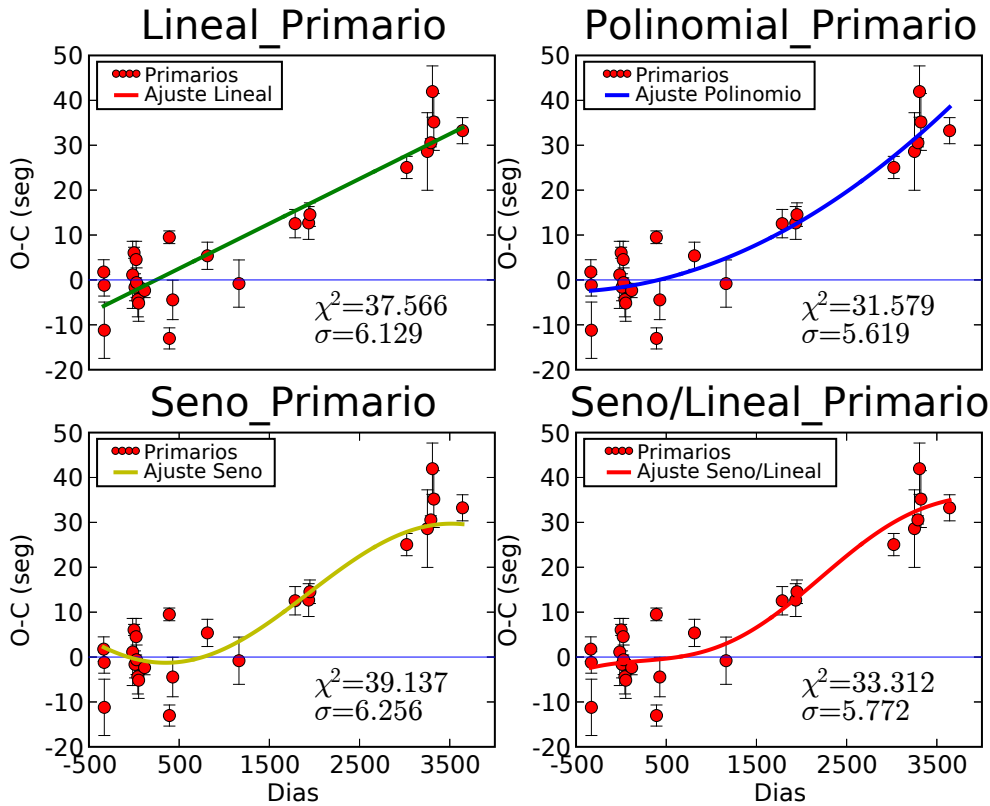


Figura 4.2: Ajustes de los eclipses primarios

4.2.2 Eclipses Secundarios

Al igual que con los eclipses primarios, estudiamos los eclipses secundarios de manera independiente, donde los resultados son distintos de éstos. En este caso contamos con 34 eclipses y el mejor de los ajustes fue el de polinomio con $\chi^2=32.491$ y $\sigma=5.700$; nuevamente el lineal es que menos se ajusta a los datos con $\chi^2=39.898$ y $\sigma=6.316$, para verlo más en detalles podemos ir a la gráfica 4.3.

Los valores de los parámetros de los ajustes de los eclipses secundarios los podemos ver, tanto en el caso de las épocas como en el caso de las fases, en las tablas 4.5 y 4.6.

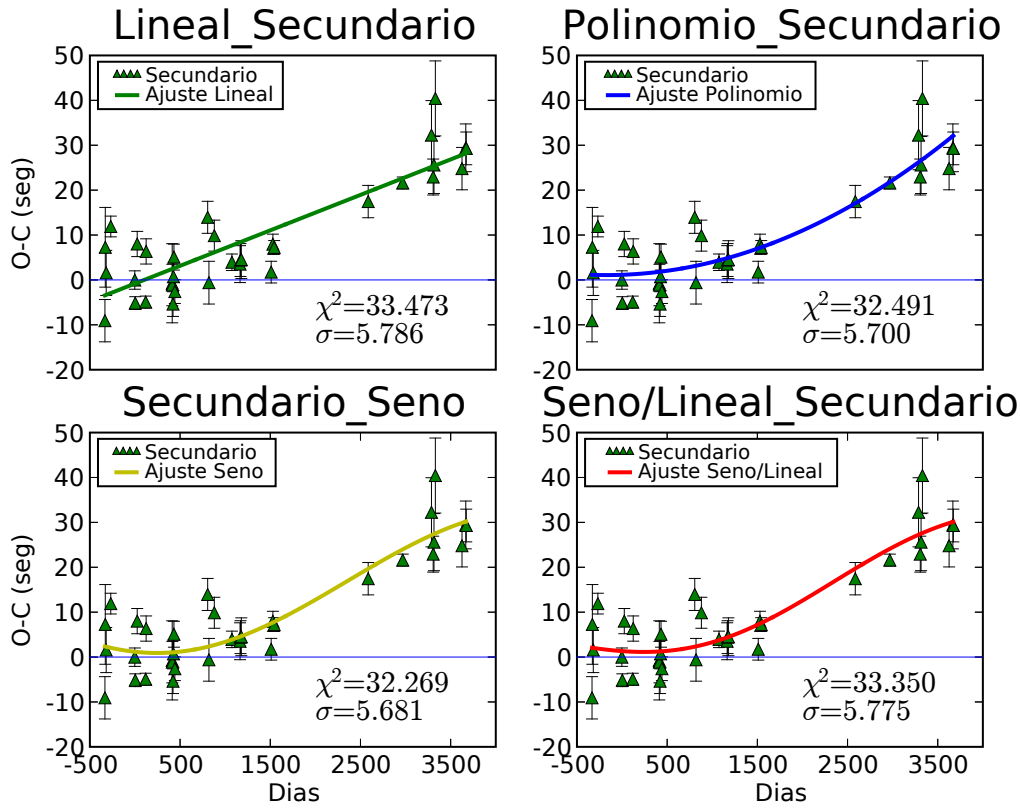


Figura 4.3: Ajustes de los eclipses secundarios

Tabla 4.1: Parámetros de ajustes de todos los eclipses CM Draconis con respecto a los tiempos de las Épocas

Tipo de Ajuste	A	B	C	D	M
Lineal $Y = A + Bx$	$-1.6 \pm 1.1s$	$(8.8 \pm 0.6)x10^{-3} \frac{s}{d}$	-	-	-
Polinómico $Y = A + Bx + Cx^2$	$-1.7 \pm 1.11s$	$(5.5 \pm 2.1)x10^{-3} \frac{s}{d}$	$(11 \pm 5.98)x10^{-07} \frac{s}{d^2}$	-	-
Seno $Y = A + Msen(Cx + D)$	$17.22 \pm 4.4s$	-	$(7.3 \pm 2.2)x10^{-4} \frac{1}{d}$	-1.7 ± 0.2	$17.64 \pm 4.1s$
Seno+Lineal $Y = A + Bx + Msen(Cx + D)$	$0.5 \pm 7.5s$	$(7.3 \pm 3.3)x10^{-3} \frac{s}{d}$	$(1.4 \pm 0.75)x10^{-3} \frac{1}{d}$	-3.03 ± 1.5	$5 \pm 3.6s$

4.3 Análisis de los ajustes de los tiempos O-C

4.3.1 Lineal

El ajuste lineal nos da información sobre la relación que hay entre el período que hemos calculado y el período intrínseco del sistema, como podemos ver en la ecuación 2.10.

Tabla 4.2: Parámetros de ajustes de todos los eclipses CM Draconis con respecto a las Fases

Tipo de Ajuste	a	b	c	d	m
Lineal $Y = a + bn$	$-1.6 \pm 1.1s$	$(1.12 \pm 0.076)x10^{-2}s$	-	-	-
Polinómico $Y = a + bn + cn^2$	$-1.7 \pm 1.11s$	$(6.98 \pm 2.66)x10^{-3}s$	$(18 \pm 10)x10^{-07}s$	-	-
Seno $Y = a + msen(cn + d)$	$17.2 \pm 4.4s$	-	$(9.3 \pm 2.8)x10^{-4}$	-1.7 ± 0.2	$17.6 \pm 4.1s$
Seno+Lineal $Y = a + bn + msen(cn + d)$	0.5 ± 7.5	$(9.26 \pm 4.18)x10^{-3}s$	$(1.77 \pm 0.95)x10^{-3}$	-3.03 ± 1.5	$5 \pm 3.6s$

Tabla 4.3: Parámetros de ajustes eclipses Primarios de CM Draconis con respecto a los tiempos de las Épocas

Tipo de Ajuste	A	B	C	D	M
Lineal $Y = A + Bx$	$-2.45 \pm 1.57s$	$(9.99 \pm 0.884)x10^{-3}\frac{s}{d}$	-	-	-
Polinómico $Y = A + Bx + Cx^2$	$-1.64 \pm 1.49s$	$(3.02 \pm 3.12)x10^{-3}\frac{s}{d}$	$(2.2 \pm 0.95)x10^{-06}\frac{s}{d^2}$	-	-
Seno $Y = A + Msen(Cx + D)$	$14.22 \pm 2.15s$	-	$(9.92 \pm 2.37)x10^{-4}\frac{1}{d}$	-1.92 ± 0.31	$15.49 \pm 1.78s$
Seno+Lineal $Y = A + Bx + Msen(Cx + D)$	$-3.09 \pm 5.88s$	$(9.41 \pm 2.54)x10^{-3}\frac{s}{d}$	$(1.59 \pm 0.835)x10^{-3}\frac{1}{d}$	-3.52 ± 1.49	$4.88 \pm 2.38s$

Tabla 4.4: Parámetros de ajustes de los eclipses Primarios de CM Draconis con respecto a las Fases

Tipo de Ajuste	a	b	c	d	m
Lineal $Y = a + bn$	$-2.45 \pm 1.57s$	$(1.27 \pm 0.112)x10^{-3}\frac{s}{d}$	-	-	-
Polinómico $Y = a + bn + cn^2$	$-1.64 \pm 1.49s$	$(3.83 \pm 3.96)x10^{-3}\frac{s}{d}$	$(3.54 \pm 1.53)x10^{-06}s$	-	-
Seno $Y = a + msen(cn + d)$	$14.22 \pm 2.15s$	-	$(1.26 \pm 0.301)x10^{-4}$	-1.92 ± 0.31	$15.49 \pm 1.78s$
Seno+Lineal $Y = a + bn + msen(cn + d)$	$-3.09 \pm 5.88s$	$(1.19 \pm 0.322)x10^{-2}s$	$(2.02 \pm 1.06)x10^{-3}$	-3.52 ± 1.49	$4.88 \pm 2.38s$

Tabla 4.5: Parámetros de ajustes eclipses Secundarios de CM Draconis con respecto a los tiempos de las Épocas

Tipo de Ajuste	A	B	C	D	M
Lineal $Y = A + Bx$	$-0.81 \pm 1.49s$	$(79 \pm 0.81)x10^{-4} \frac{s}{d}$	-	-	-
Polinómico $Y = A + Bx + Cx^2$	$1.14 \pm 1.51s$	$(0.731 \pm 2.594)x10^{-3} \frac{s}{d}$	$(21 \pm 0.728)x10^{-07} \frac{s}{d^2}$	-	-
Seno $Y = A + Msen(Cx + D)$	$16.89 \pm 5.93s$	-	$(7.45 \pm 3.07)x10^{-4} \frac{1}{d}$	-1.75 ± 0.29	$15.97 \pm 5.47s$
Seno+Lineal $Y = A + Bx + Msen(Cx + D)$	$6.26 \pm 30.31s$	$(0.448 \pm 1.25)x10^{-2} \frac{s}{d}$	$(1.04 \pm 1.45)x10^{-3} \frac{1}{d}$	-2.43 ± 3.15	$7.56 \pm 19.95s$

Tabla 4.6: Parámetros de ajustes de los eclipses Secundarios de CM Draconis con respecto a las Fases

Tipo de Ajuste	a	b	c	d	m
Lineal $Y = a + bn$	$-0.81 \pm 1.49s$	$0.01 \pm 0.001s$	-	-	-
Polinómico $Y = a + bn + cn^2$	$1.14 \pm 1.51s$	$(0.0927 \pm 3.29)x10^{-2} s$	$(3.38 \pm 1.17)x10^{-06} s$	-	-
Seno $Y = a + msen(cn + d)$	$16.89 \pm 5.93s$	-	$(9.45 \pm 3.9)x10^{-4}$	-1.75 ± 0.29	$15.97 \pm 5.47s$
Seno+Lineal $Y = a + bn + msen(cn + d)$	$6.26 \pm 30.31s$	$(5.68 \pm 16)x10^{-3} s$	$(1.32 \pm 1.84)x10^{-3}$	-2.43 ± 3.15	$7.56 \pm 19.95s$

En este caso tenemos que esa diferencia es igual a $1.12x10^{-2} \pm 0.076x10^{-2}$ segundos. Según esto, el cambio es muy pequeño, nuestro período calculado varía muy poco con relación al período basado en nuestras observaciones de tiempos de los mínimos del sistema.

4.3.2 Polinómico

Cuando el baricentro del sistema tiene una aceleración con respecto al observador, podemos ver que la ecuación del polinomio, 2.29, se ajusta a los datos de los O-C. En ese caso podemos sacar los valores de la aceleración del sistema por el término cuadrático que existe en la ecuación antes mencionada.

Recordemos también la ecuación 2.32, donde vemos que $c = P'^2(\frac{a_c}{2c_{luz}})$ siendo éste el término que representa la aceleración. Para saber entonces la aceleración despejemos para a_c , como vimos en la ecuación 2.33

$$a_c = 2 \frac{c_{luz} \cdot c}{P'^2}$$

Basado en el ajuste de todos los eclipses (tabla 4.2) sabemos que:

$$c_{luz} = 2.99791x10^8 \frac{m}{s}$$

$$c = 18x10^{-07} \pm 10x10^{-07} s$$

$$P' = 1.268389861 \pm 0.000000005d$$

$$P' = 3.9x10^8 \pm 2.1x10^8 s$$

Por lo tanto;

$$a_c = 9x10^{-8} \pm 4.8x10^{-8} \frac{m}{s^2}$$

Como podemos ver en este resultado, el sistema binario CM Draconis tiene una aceleración muy débil, lo cual puede implicar la presencia de un un tercer cuerpo con un período muy largo. Otro motivo para este desplazamiento podría ser la presencia relativamente cercana de algún otro cuerpo celeste que esté atrayendo lentamente a CM Draconis hacia su centro, o que estén moviéndose conjuntamente de manera muy lenta.

4.3.3 Lineal+sinusoidal

Con este ajuste podemos calcular tanto el período del tercer cuerpo como la masa del mismo, según los parámetros obtenidos al ajustar esta curva a nuestros datos. Partimos de las ecuaciones deducidas en el capítulo 2, recordemos que:

$$A = \frac{M_P}{M_B^{\frac{2}{3}}} \sqrt[3]{\frac{P_3^2 G}{4\pi^2}}$$

y que el parámetro c (que según la tabla 4.2 $c = 1.77x10^{-3} \pm 0.95x10^{-3}$), nos da el período del tercer cuerpo, $c = \frac{2\pi P'}{P_3}$

al despejarlo para P_3 , tenemos que:

$$P_3 = \frac{2\pi P'}{c} \tag{4.10}$$

Y por lo tanto;

$$P_3 = 3.89x10^8 \pm 2.1x10^8 s$$

o lo que es lo mismo

$$P_3 = 12.546 \pm 6.6 \text{ años}$$

P_3 es el tiempo que tarda el tercer cuerpo en darle una vuelta completa al sistema binario. Sabiendo esto, y conociendo el parámetro de ajuste m , o amplitud, podemos conocer la masa de este cuerpo. Recordemos antes los parámetros necesarios para poder calcular la masa del planeta;

$$M_B = 4.6x10^{29} \pm 2x10^{27} \text{ Kg}$$

$$P_3 = 3.89x10^8 \pm 2.1x10^8 \text{ s}$$

Para poder conocer el valor de A , utilizamos la ecuación 2.47, finalmente este valor lo podemos utilizar en la ecuación 2.44 para obtener la masa del planeta;

$$A = 1.5x10^9 \pm 1.1x10^9 \text{ m}$$

$$M_p = \frac{AM_B^{\frac{2}{3}}}{\sqrt[3]{\frac{P_3^2 G}{4\pi^2}}} \quad (4.11)$$

$M_p = 1.40519358683x10^{27} \pm 1.01390365524x10^{27} \text{ Kg}$. O dicho de otra manera, la masa del planeta es de $0.74M_{jupiter} \pm 0.5M_{jupiter}$

Recordando ahora la relación entre las masas y sus radios, como dice la tercera ley de Kepler en la ecuación 2.42, podemos obtener la distancia que hay entre el baricentro de las binarias y el planeta:

$$r = \frac{M_B + M_p}{M_p} A = 3.27 \text{ U.A.}$$

Como podemos recordar, $r = r_1 + r_2$, donde $r_1 = A$ tenemos que la distancia del planeta al baricentro del sistema es de 3.26 U.A.

4.4 Espectros de potencia

Con los residuos de los ajustes hemos sacado unos espectros de potencias a los datos que tenemos para ver si encontrábamos alguna señal relevante que nos diera información sobre la presencia de variaciones O-C que sean de períodos cortos y/o con amplitudes bajas y que sean poco obvias en una interpretación visual de los residuos O-C. Este espectro de potencia fue hecho por separado para los eclipses primarios y secundarios, y también para ambos eclipses a la vez. Esto se ha aplicado a los residuos para todas las ecuaciones de ajustes que hemos estudiado, tanto la ecuación lineal, como la ecuación polinómica y la

ecuación de la suma del lineal más el sinusoidal, aunque el sinusoidal por separado no se ha estudiado en detalle, porque como vimos en el capítulo 2.4 el ajuste al seno nos da un término lineal, por lo tanto no vale la pena estudiarlo por separado. Para esto hemos utilizado primero un programa al que llamamos “residuos.py”, en “python” (para verlo en detalle ir al apéndice B.4). Este programa obtiene los residuos de nuestros datos con respecto a la curva del ajuste deseado; lo que sale de este programa es un fichero de texto de dos columnas, la primera columna se refiere a la época y la segunda columna se refiere a los residuos. Luego, estos datos los usamos en otro programa llamado “mspec3.f” con el que creamos otro fichero de texto que nos da los valores de las amplitudes en segundos, de los períodos en días y también de la fase en radianes. Estos datos luego los usamos en un programa distinto, en “python”, llamado “Espectro2.py” (apéndice B.5) para hacer las gráficas. Este análisis es similar al que se hizo en Deeg et al. 2000 y en el que se indicaba la presencia de un posible planeta de 1.5-3 masas de júpiter con una distancia orbital de 1.1-1.45 U.A. al baricentro de las estrellas binarias.

Para el análisis del espectro de potencia hemos utilizados los residuos de cada uno de los ajustes. En el caso del ajuste lineal las amplitudes son como vemos en la figura 4.4, donde podemos ver también que no existe ningún pico por encima del ruido donde podamos identificar ninguna amplitud relevante. Hicimos otros dos espectros, pero más detallados, uno que va sólo de 0 a 1000 días (figura C.1.1) y otro, aún más preciso, que va de 0 a 100 días (figura C.1.2) y en ninguno de los casos los residuos de los ajustes lineales nos muestran picos relevantes que nos indiquen que habría un tercer cuerpo en nuestro sistema binario. Podemos ver esos gráficos en el apéndice C. Lo que hemos hecho para los ajustes lineales, también lo hicimos tanto para los ajustes polinómicos (figura 4.5) como para los ajustes de la suma de los lineales más sinusoidales (figura 4.6); para ver los gráficos más detallados ir al apéndice C. Ninguno de estos espectros de potencia indican picos sobresalientes y que sean similares en amplitud y fase ni en todos los eclipses, ni en los primarios y secundarios por separados.

Como resultado de este análisis, podemos descartar el candidato de planeta representado en Deeg et al. 2000.

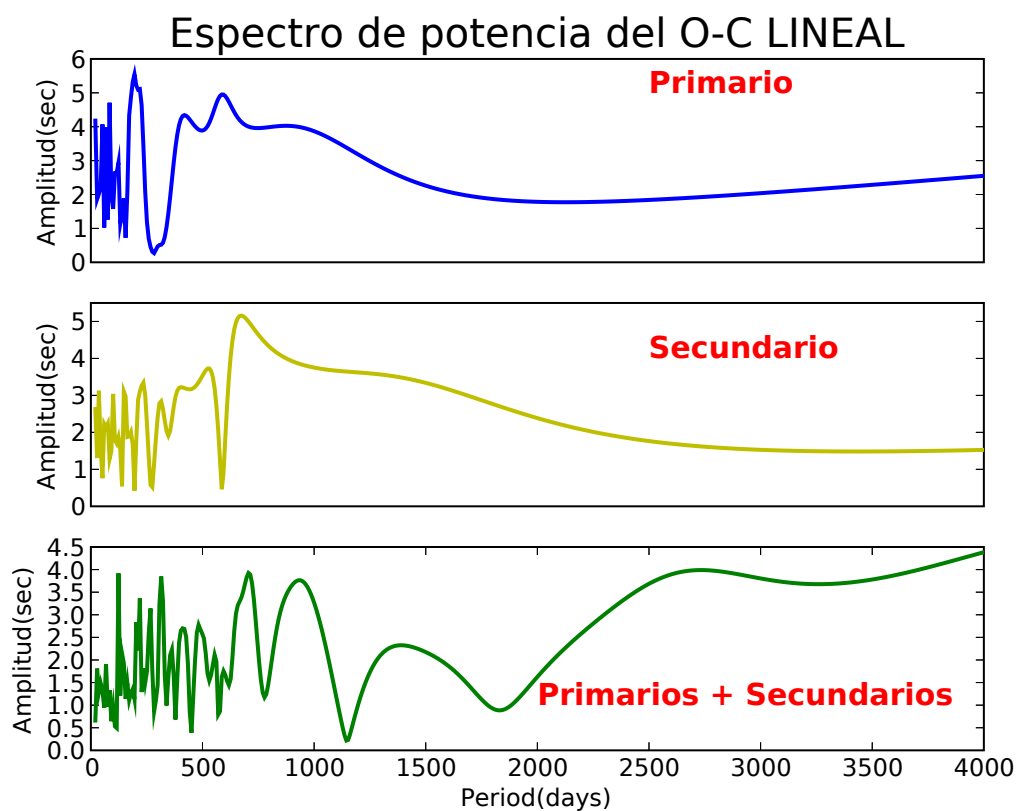


Figura 4.4: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Lineal del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último, de la suma de todos los eclipses

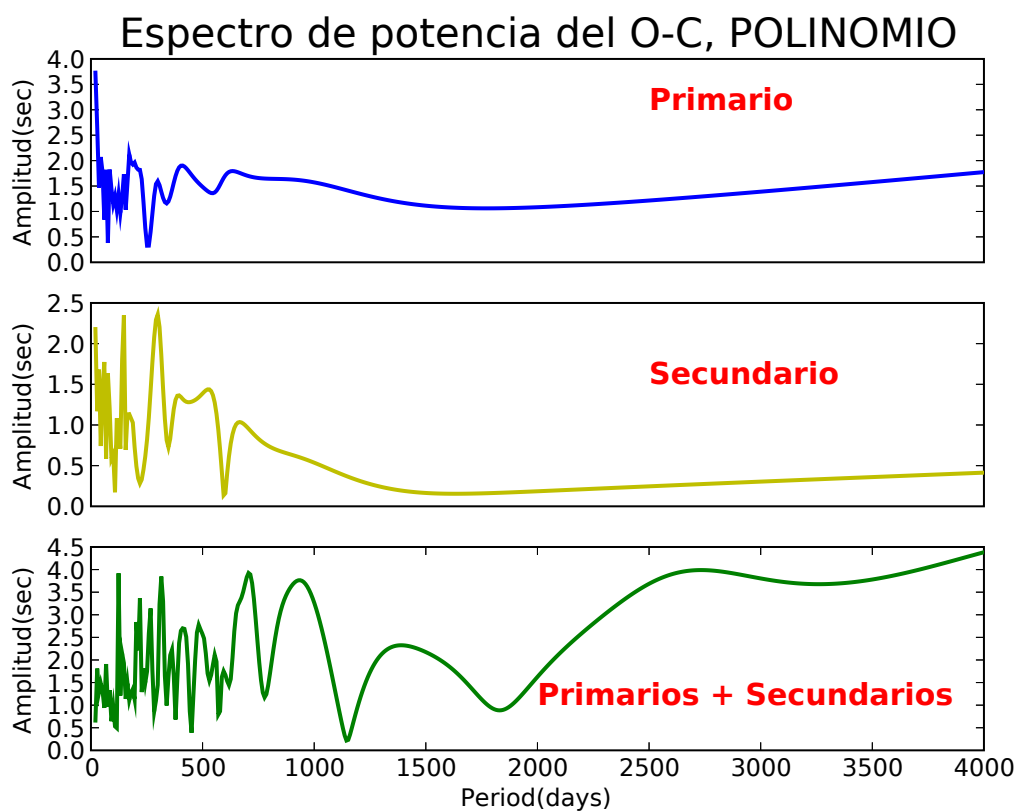


Figura 4.5: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Lineal del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último, de la suma de todos los eclipses

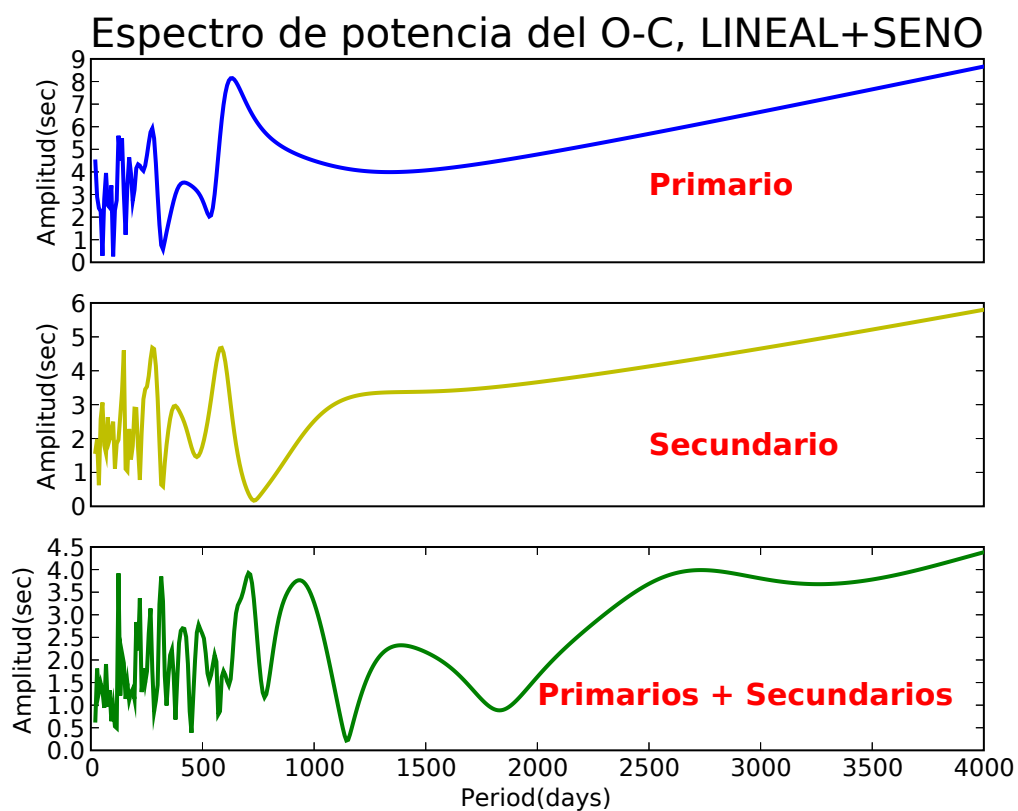


Figura 4.6: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Lineal del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último, de la suma de todos los eclipses

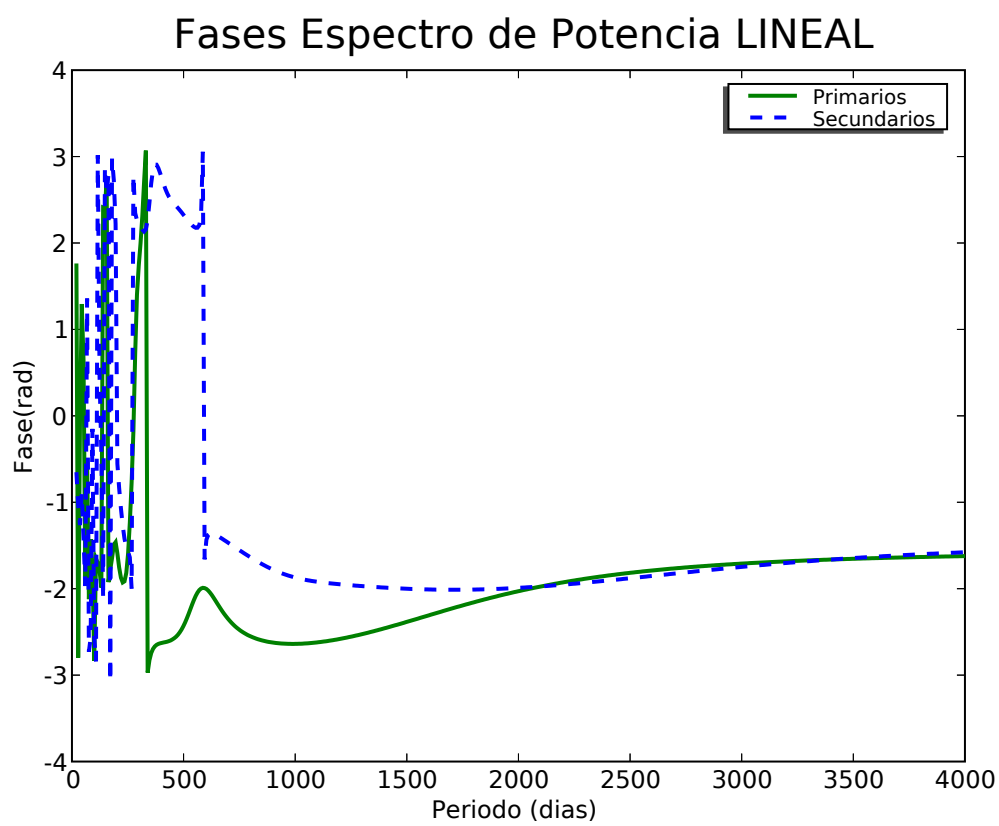


Figura 4.7: Espectro de potencia de la fase O-C.

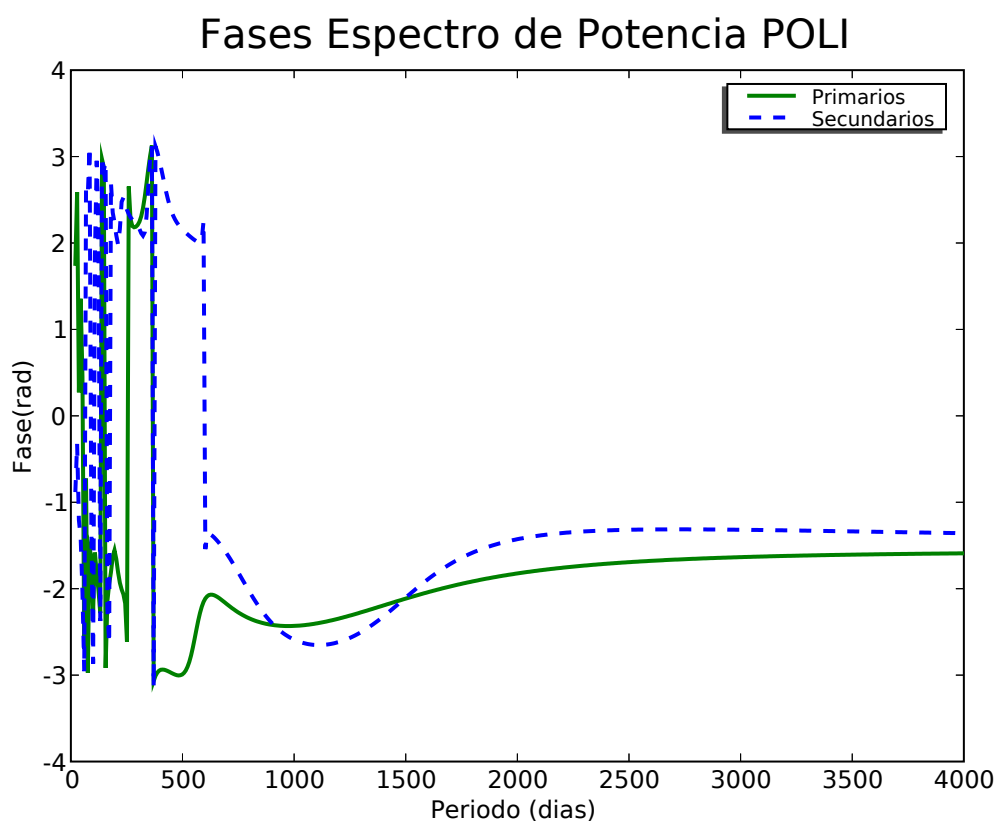


Figura 4.8: Espectro de potencia de la fase O-C.

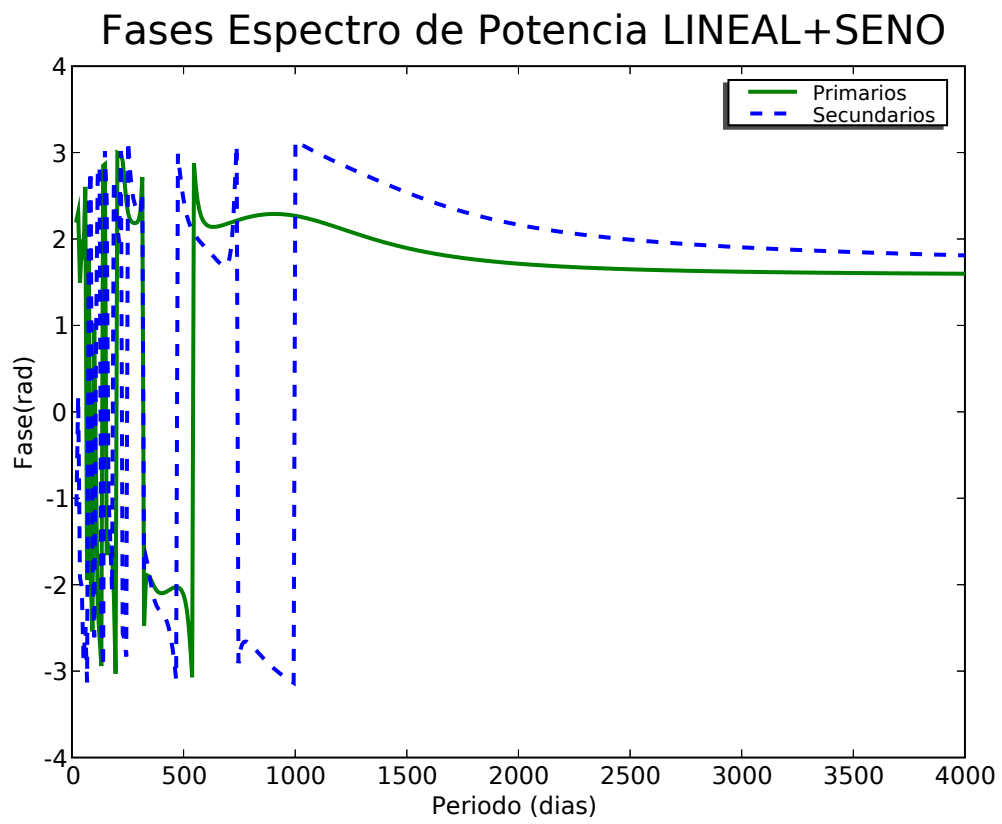


Figura 4.9: Espectro de potencia de la fase O-C.

5

Conclusiones

Al analizar los ajustes que hemos hecho de los todos los eclipses no se ven diferencias relevantes entre éstos; tampoco vemos diferencias relevantes entre los ajustes de los eclipses primarios y los ajustes de los eclipses secundarios; es decir que no se han observado cambios de la excentricidad o una rotación del periastro, o sea, una rotación del eje mayor de la órbita del binario durante los 11 años (1994-2005) que se han cubierto en este estudio.

- Vemos en todos los ajustes (lineal, polinómico y seno+lineal) un parámetro b , que indica una pequeña diferencia dentro de los períodos observados y el período de la efeméride, del orden aproximado de 10^{-2} segundos. Tampoco hay indicaciones de que exista algún error relevante en la época de las efemérides ($T_{c,0}$). Esto lo podemos ver con el parámetro a de todos los ajustes, indicando unas diferencias menores de 2 segundos.
- En el caso del ajuste lineal, que indica sólo una diferencia entre el período observado y el calculado, esta diferencia no parece ser relevante y por lo tanto hay una clara evidencia de que los datos O-C tienen un componente no-lineal, al cual se ajustan con mayor precisión.
- Los dos ajustes no-lineales, el polinómico y el sinusoidal, son claramente mucho mejores y en ambos casos hay una aceleración del sistema. En el caso del ajuste polinómico, esta aceleración se considera constante, y en el caso del sinusoidal la aceleración varía con el período de un tercer cuerpo orbitando el binario.
- Un dato a tener en cuenta es el hecho de que la aceleración, en el caso del ajuste polinómico, podría variar también pero sobre escalas de tiempo muy grandes en relación a los 10 años que hemos abarcado en estos datos. Una posibilidad para explicar una aceleración casi constante podría ser un tercer cuerpo con un período muy largo.

- En este sentido, existe una estrella de tipo enana blanca, GJ630.1, que se encuentra a una distancia de $23''$ arcosegundos de CM Draconis, con el mismo movimiento propio del sistema binario eclipsante. La distancia mínima entre la enana blanca y CM Draconis (suponiendo que ambas estén a la misma distancia del observador) es de unas 380 AU. Este sistema podría causar una aceleración relevante y casi constante en el sistema binario (en el caso de que ambas se orbiten sería con un período de miles de años). El verificar si esta enana blanca sería responsable de una aceleración casi constante en este sistema, pudiera ser un tema de investigación aparte.
- Los datos O-C son también compatibles con la presencia de un planeta relativamente ligero, con una masa de 0.7 masas de Júpiter y un período de 12 años. La continuación de la observación de este sistema aclararía si este candidato es sostenible; es decir, si la tendencia de la curva O-C se explica mejor como un polinomio o como un senoide.
- En el análisis de espectro de potencia de los residuos de los distintos ajustes se indicarían variaciones periódicas de el O-C con períodos más cortos. Sin embargo, ninguno de nuestros espectros podemos ver candidatos convincentes. En particular, el candidato propuesto por Deeg et al. (2000), basado en un espectro similar, con un período entre 800 y 1000 días se debe descartar.

6

Cursos de Doctorado

Los cursos de doctorado se elijen con el objetivo de estudiar con mayor profundidad aquellos temas que más se relacionen con el proyecto de tesis. En mi caso éste no era el motivo principal a la hora de la elección porque yo entré al Instituto Astrofísico de Canarias por cuenta propia, en lo que conseguía alguna beca que me permitiría continuar con el doctorado. Bajo los consejos de Artemio Herrero Davó elegí estos cursos intentando hacer una elección variada para ampliar mis conocimientos de astronomía en todas las direcciones y así poder adaptarme luego a cualquier proyecto de investigación; sin embargo tenía claro que quería que este proyecto tuviese que ver con planetas extrasolares y por esta razón asistí a la escuela de invierno del 2004 que era de planetas extrasolares.

6.1 Atmósfera Estelar

6.1.1 Fecha de impartición

Del 8 al 19 de noviembre y del 13 al 17 de diciembre de 2004

6.1.2 Profesores

Dr. D.Ramón J. García López
Prof. D. Artemio Herrero Davó

6.1.3 Contenido

Priemra Parte del Curso

1. Introducción
2. El transporte de energía en las Atmósferas Estelares
3. Poblaciones Atómicas y Equilibrio Estadístico
4. Atmósferas en expansión

5. Determinación de Temperatura, gravedad y rotación
6. Determinación de pérdida de masa y velocidad terminal

Segunda Parte del Curso

1. Análisis Químico, ¿Para qué?
2. Espectroscopía de alta resolución
3. Análisis espectral
 - (a) Parámetros asociados a las atmósferas
 - (b) Parámetros asociados a las líneas espectrales
 - (c) Mecanismos de ensanchamiento
4. Estimación de temperaturas efectivas.
 - (a) Métodos directos
 - (b) Métodos indirectos
5. Estimación de gravedades superficiales
 - (a) Métodos directos
 - (b) Métodos indirectos
6. Análisis químico
 - (a) Curva de crecimiento
 - (b) Síntesis espectral
 - (c) LTE y NLTE
 - (d) Análisis diferencial
7. Determinaciones fotométricas
8. Errores de la determinación de abundancias químicas
 - (a) Precisión de las abundancias para estrellas con diferentes tipos espectrales
9. Algunas implicaciones relevantes
 - (a) Estructura y evolución estelar
 - (b) Evolución química galáctica
 - (c) Nucleosíntesis primordial

6.1.4 Motivación

Este curso se basaba principalmente en la determinación de abundancias de elementos químicos, temperaturas efectivas y gravedades en las atmósferas de estrellas de distintos niveles espectrales. Me pareció, por lo tanto, de gran interés el poder entender como se analizan las estrellas; la astronomía estelar siempre me llamó mucho la atención. Este curso satisfacía la curiosidad por entender éstos temas y también me enseñaba como utilizar programas para la determinación de éstos parámetros.

6.1.5 Trabajo realizado

Hice una práctica de ordenador donde utilicé un código de síntesis espectral y una red de modelos de atmósfera para derivar las abundancias de varios elementos presentes en el espectro de una estrella problema (HD27808).

6.2 Interacció Estrellas-Medio Interestelar

6.2.1 Fecha de impartición

Del 2 al 20 de mayo de 2005.

6.2.2 Profesores

Dr. D. Antonio Mampaso Recio

Dr. D. Romano Corradi

Dr. D. Arturo Manchado Torres.

6.2.3 Contenido

- Bloque 1: Interacción estrellas masivas - medio interestelar.

Propiedades generales de las regiones HII.

Contenido estelar de las regiones HII.

Estructura de regiones HII.

Interacción dinámica estrellas-gas.

Composición química de regiones HII.

Formación estelar masiva en regiones HII.

- Bloque 2: Interacción nebulosa planetaria - medio interestelar.

Introducción histórica.

Evolución estelar (AGB-NP).

Distribución galáctica.

Estrellas centrales.

Abundancias químicas del gas fotoionizado.

Composición del polvo.
Gas molecular (CO y HII).

- Bloque 3: Las nebulosas planetarias como población estelar galáctica.

NPs en la Galaxia:

- Distribución y cinemática y sus implicaciones sobre la determinación de la masa de los progenitores.
- El problema de las distancias.

NPs en galaxias externas:

- Métodos observacionales.
- La función de luminosidad de las nebulosas planetarias como indicador de distancias extragaláctico.
- NPs extragalácticas para el estudio de la dinámica de las galaxias.
- NPs intergalácticas.

¿Cuántas NPs?

- Algunos elementos básicos de síntesis de población estelar.
- Predicciones sobre el número de objetos en una fase cualquiera post-secuencia principal.

Motivación

Algunos de mis intereses particulares en la astronomía también era el estudio de nebulosas planetarias, no sólo por la belleza que tienen si por la cantidad de información que podemos obtener de ellas. Es importante conocer la vida de las estrellas, desde su formación o nacimiento, como se relacionan a lo largo de sus vidas con el medio interestelar y las nebulosas planetarias. El conocimiento de éstos factores nos ayuda a comprender mejor el ciclo de vida estelar en general, y por lo tanto de nuestra propia estrella, el Sol.

Trabajo realizado.

Para la calificación de este curso hice un desarrollo y una cuantificación del efecto termostato en una región HII. También se explicaron los efectos en fluctuaciones de temperatura al calcular abundancias usando líneas de colisiones y de recombinación.

6.3 Estructura Estelar con métodos sismológicos

6.3.1 Fecha de impartición

Del 31 de enero al 18 de febrero de 2004

6.3.2 Profesores

Prof. D. Teodoro Roca Cortés

Dr. D. Fernando J. Pérez Hernández

6.3.3 Contenido

1. Fundamentos de la teoría lineal de las oscilaciones estelares.
2. Modos propios de vibración en diversas etapas evolutivas.
3. Influencia de la cotación estelar, el magnetismo y flujos en oscilaciones estelares.
4. Métodos sísmicos de interpretación. El problema directo. Resultados para el Sol.
5. Métodos sísmicos de interpretación. Problema inverso. Resultados para el Sol.
6. Técnicas instrumentales en Astrosismología. Proyectos en curso desde Tierra y desde el espacio.
7. Técnicas de análisis, de diagnóstico y de interpretación de resultados en Astrosismología.
8. Técnicas instrumentales y de análisis en Heliosismología global y local. Proyectos en curso desde Tierra y espacio.
9. Oscilaciones en estrellas de secuencia principal. Resultados.
10. Oscilaciones en estrellas gigantes, enanas y de otros tipos (δ Scuti, roAp, etc...). Resultados

6.3.4 Motivación

La heliosismología era un tema del que yo no tenía mayores conocimientos y me pareció de gran interés cuando vi que era una opción de los cursos de doctorado. Además existen proyectos en común entre la astrosismología y la búsqueda de planetas extrasolares por el método de tránsitos, como por ejemplo el satélite de COROT, que hará observaciones tanto para la astrosismología como para la búsqueda de variación de intensidades provocadas por los tránsitos planetarios.

6.3.5 Trabajo Realizado

A partir de unos datos dados, el objetivo era dibujar el espectro de frecuencia, encontrar la frecuencia y hacer un diagrama de nodos.

6.4 Técnicas de alta resolución para imágenes astronómicas

6.4.1 Fecha de impartición

Del 14 al 18 de marzo y del 28 de marzo al 8 de abril 2005

6.4.2 Profesores

Dr. D. José Antonio Bonet Navarro

6.4.3 Contenido

1. Introducción.
2. Formación de imágenes astronómicas.
 - (a) Fundamentos ópticos.
 - (b) Aberraciones ópticas: desarrollo en serie de polinomios de Zernike.
 - (c) Descripción estadística de la turbulencia atmosférica.
 - (d) Imágenes de corta y larga exposición.
 - (e) Planificación de un telescopio para alta resolución espacial y espectral.
 - (f) Telescopios solares versus estelares.
3. Reconstrucción de imágenes astronómicas mediante técnicas computacionales “post-facto”.
 - (a) Adquisición de imágenes
 - (b) Pretratamiento de imágenes para suprimir efectos sistemáticos.
 - (c) Problema de ruido en la deconvolución de una imagen: filtros Óptimos y de Wiener.
 - (d) Corrección del movimiento de imagen y de la distorsión. Técnicas de correlación local.
 - (e) Interferometría Speckle. Reconstrucción de amplitudes y fases.
 - (f) Técnicas de “Diversidad de fase” para reconstrucción de imágenes de corta exposición.
 - (g) Segmentación de imágenes.
 - (h) Resalte de estructuras: “Unsharp masking”.

En la parte práctica se estudiarán diversos resolvedores de Riemann, métodos TDV de reconstrucción de alto orden y estrategias de avance temporal (métodos de líneas, métodos predictor-corrector). En el caso multidimensional se presentará atención a las técnicas de splitting direccional de operadores.

6.4.4 Motivación

La reconstrucción de imágenes es un proceso que todo astrónomo debe conocer, aunque en este caso el curso era de imágenes solares, es importante conocer los procesos que nos permiten ver éstas imágenes obtenida a partir de las observaciones del telescopio.

6.4.5 Trabajo Realizado

6.5 Radioastronomía

Fecha de impartición.

Del 14 al 18 de marzo y del 28 de marzo al 8 de abril de 2005.

Profesores.

Dr. D. Rafael Bachiller García y Dr. D. Pere Planesas Bigas.

Temario.

1. La Radioastronomía en el contexto de la Astrofísica y la Tecnología.
2. Radiotelescopios.
3. Métodos observacionales.
4. Casos prácticos de observación con antena simple.
5. Procesos radiativos en radiofrecuencias. Emisión en el radiocontinuo.
6. Líneas espectrales atómicas en radiofrecuencias.
7. Líneas espectrales moleculares I: CO e isótopos.
8. Líneas espectrales moleculares II: moléculas diferentes de CO.
9. Radioemisión de envolturas circumstelares y de nebulosas planetarias.
10. Astroquímica.

6.5.1 Motivación

El objetivo de tomar este curso de doctorado era conocer el área de la Radio Astronomía ya que nunca había tomado cursos sobre el tema. Es uno de los campos de la astronomía más recientes y donde hay mucho futuro; me pareció importante conocer sobre las técnicas y los instrumentos.

6.5.2 Trabajo Realizado

Se realizó un trabajo para el curso sobre protoestrellas y sistemas protoplanetarios donde se explica también sobre los instrumentos utilizados en cada caso.

6.6 Análisis de Señales Tiempo-frecuencia

6.6.1 Fecha de impartición

Del 8 al 10 de Noviembre y del 13 al 17 de diciembre de 2004

6.6.2 Profesores

Dr. D. Rafael F. Sala Mayato

Dr. D. Rodrigo Trujillo González

6.6.3 Contenido

1. Descripción de señales en tiempo y frecuencia.
2. Frecuencia instantánea y señales complejas.
3. Funciones densidad y característica.
4. Distribuciones $t\omega$: ideas fundamentales.
5. Transformada corta de Fourier.
6. La función de Winger.
7. Métodos generales de distribución de funciones.
8. La transformada Wavelet y sus aplicaciones.

6.6.4 Motivación

El objetivo del análisis de señales en tiempo-frecuencia es describir la variación temporal del contenido espectral de éstas señales y ver cómo se relacionan sus propiedades espectrales que varían con el tiempo, con la fuente física que origina la señal y con el medio de propagación. Este tipo de análisis se aplica prácticamante en todo el campo de la ciencia y por lo tanto me pareció interesante estudiar al respecto.

6.6.5 Trabajo Realizado

Distribuciones de interferencias reducidas: Aplicaciones biológicas e interpretaciones.

6.7 Escuela de Invierno de Astrofísica XVI, “Planetas Estrasolares”

Participé en la Escuela de Invierno organizada por el IAC donde me convalidaron los creditos correspondientes y por lo tanto se tomó como un curso de doctorado.

6.7.1 Fecha de impartición

Del 22 de Noviembre al 3 de Diciembre, 2004

6.7.2 Charlistas

- Tim Brown, High Altitud Observatory, USA
- Laurance Doyle, SETI Institute, USA
- Jim F. Kasting, Penn State University, USA
- Rafael Rebolo, Instituto Astrofísico de Canarias, Spain
- Agustín Sánchez-Lavega, Universidad del País Vasco, Spain

- Franck Selsis, Centro de Astrobiología (INTA/CSIC), Spain
- Stephane Udry, Observatoire de Genève, Switzerland
- Günther Wuchterl, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Germany

6.7.3 Temario

Caracterizando planetas extrasolares

Curso dictado por Tim Brown

1. Ideas básicas de tránsitos planetarios
 - Parámetros importantes
 - Curvas de luz
 - Otros parámetros observables
2. Técnicas de mediciones
 - Requerimientos para observar el sistema
 - Obtención de datos y procedimientos
 - Muestras de estrellas vs. apertura del telescopio
3. Falsas Alarmas
 - Sistemas que pueden provocar falsas alarmas
 - Frecuencias Relativas
 - Métodos de diagnóstico
4. Espectroscopía de tránsito
 - Teoría
 - HD 209458
 - Venus
5. Misiones Espaciales
 - MOST, COROT, Kepler, Eddington
 - Prospectos de descubrimiento
 - Retos técnicos

Métodos y proyectos de detecciones de planetas

Curso dictado por Laurance Doyle.

Señalar los acercamientos básicos y las limitaciones de las detecciones de distintos métodos de detección de planetas extrasolares. Esto incluirá detecciones por variaciones de velocidades radiales periódicas, eventos fotométricos causados por una lente gravitacional, medidas del tiempo de pulsar, astrometría, imagen directa, y directa detección de flujo de radio; así como algunos casos especiales (por ejemplo SETI). Enfatizaremos en más detalles la periodicidad fotométrica de técnicas de detecciones de planetas extrasolares que incluye el método de tránsito, detección por las variaciones de luces reflejadas, y detecciones de planetas circumbinarios por el tiempo de los mínimos de las binarias eclipsantes. Se le dará atención especial a las pruebas de hipótesis estadísticas de detecciones en el caso de tránsitos fotométricos, y un estudio detallado del espectro de potencia esperado en el caso de las variaciones de luz reflejadas y el análisis de los tiempos de los mínimos de las binarias eclipsantes. Finalmente se discutirá como alguna de estas técnicas será aplicada en proyectos tanto en la Tierra como en el espacio que nos llevarán, con suerte, a detecciones remotas de exobiología en las siguientes décadas.

El potencial para la vida (habitabilidad)

Curso dictado por Jim F. Kasting.

1. Evolución climática a largo plazo de la Tierra.
2. Evolución climática en Marte y Venus.
3. La llegada de O_2 en la atmósfera.
4. Zona de habitabilidad alrededor de estrellas de la secuencia principal.
5. Buscando vida en planetas extrasolares con TPF y Darwin.

De planetas a enanas marrones a estrellas

Curso dictado por Rafael Rebolo

El sistema solar en perspectiva

Curso dictado por Agustín Sánchez-Lavega.

1. Panorama de los cuerpos del sistema solar.
Descripción a modo comparativo de las características y propiedades de los diferentes elementos del sistema solar: planetas, satélites, asteroides, cometas, meteoritos y polvos. Misiones pasadas y futuras al sistema solar.

2. **Atmósfera de los planetas terrestres y los satélites más importantes.**
Presentación de la composición actual de la atmósfera, estructuras térmicas y dinámicas (circulación general y fenómeno meteorológico) de Venus, Tierra, Marte y Titán. Breve descripción de la naturaleza y de las atmósferas tenues (Mercurios, satélites Galilianos, Tritón y Plutón). La perspectiva del desarrollo de la vida en éstos cuerpos.
3. **Planetas gigantes.**
Presentación de las propiedades atmosféricas y la estructura interna de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Se enfatizará el espectro, dinámica y meteorología de sus atmósferas.
4. **El ambiente magnético de los planetas.**
Origen de los campos magnéticos en los los cuerpos planetarios. Estructura de campos magnéticos y magnetosferas. Fenómenos relacionados: auroras, emisiones de rayos X y radio.
5. **Propiedades físicas de los planetas gigantes extrasolares.**
Estructura general (atmósfera e interiores). Formación de nubes y circulación general. Campos magnéticos.

¿Puedemos detectar vida?

Curso dictado por Frack Selsis.

1. Lecciones sobre el sistema solar (SS)
 - Composición y fotoquímica de atmósferas planetarias.
 - Búsqueda de características biológicas en Marte (y en el SS).
 - Oxígeno y ozono en el SS.
 - Características biológicas en la Tierra actual y anterior.
2. Simulaciones de atmósferas planetarias
 - Producción abiótica de O_2O_3 y "falsos positivos" de detecciones de vida.
 - Casos de "falsos negativos".
 - Parámetros del problema (tipo estelar, parámetros orbitales, tamaño del planeta y masa, ...)
3. Estrategia planeada para la búsqueda de vida:
 - Espectro reflejado (TPFC).
 - Emisión termal (Darwin/TPF-I).
 - Aportaciones de misiones anteriores.
4. Más astrobiología con Darwin/TPF:

- Midiendo los radios planetarios y sus temperaturas.
- Señales de habitabilidad.
- Otras características biológicas.

5. “Buscadores de vida”: ¿Qué instrumentos se usarán después de Darwin/TPF?

Propiedades de planetas extrasolares

Curso dictado por Stephane Udry.

De nubes a sistemas planetarios (formación y evolución)

Curso dictado por Günther Wuchterl.

6.7.4 Motivación

Decidí participar en esta escuela porque el tema de los planetas extrasolares era el área en la que yo tenía interés de trabajar y en esta escuela podría aprender de muchos de los campos de búsqueda planetaria además de conocer personas importantes en el área.

A

Comparación de Ajustes O-C en U.T. y en T.A.I.

Como podemos apreciar en las figuras A.1 y A.2, nuestros valores estadísticos en los ajustes cambian notablemente dependiendo el sistema de referencia que usemos, por lo tanto nos ha parecido apropiado mantener el sistema de referencia más exacto.

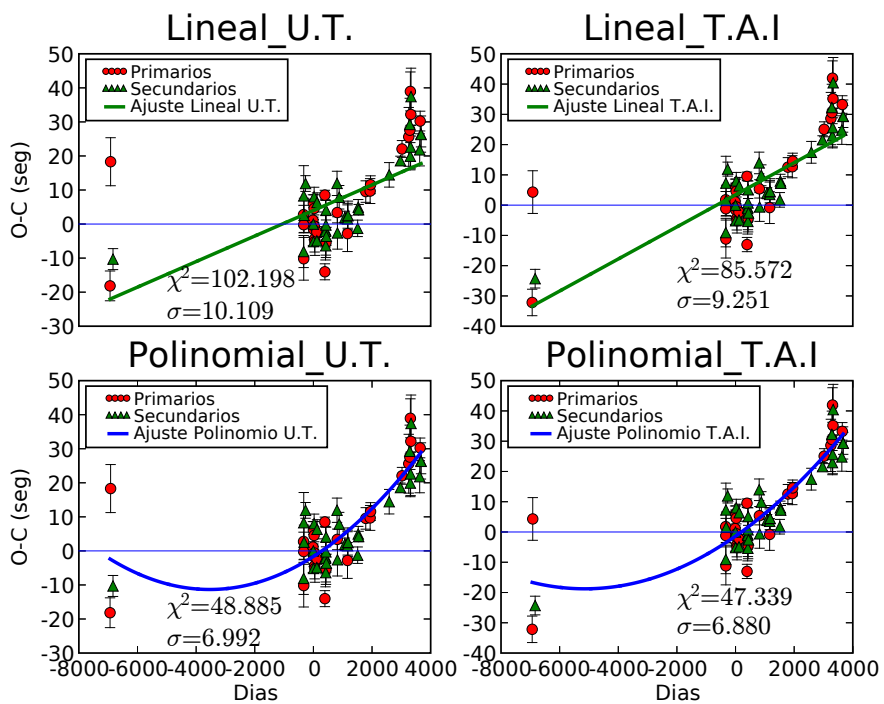


Figura A.1: Comparación de los ajustes lineales y polinómicos del U.T. con el T.A.I.

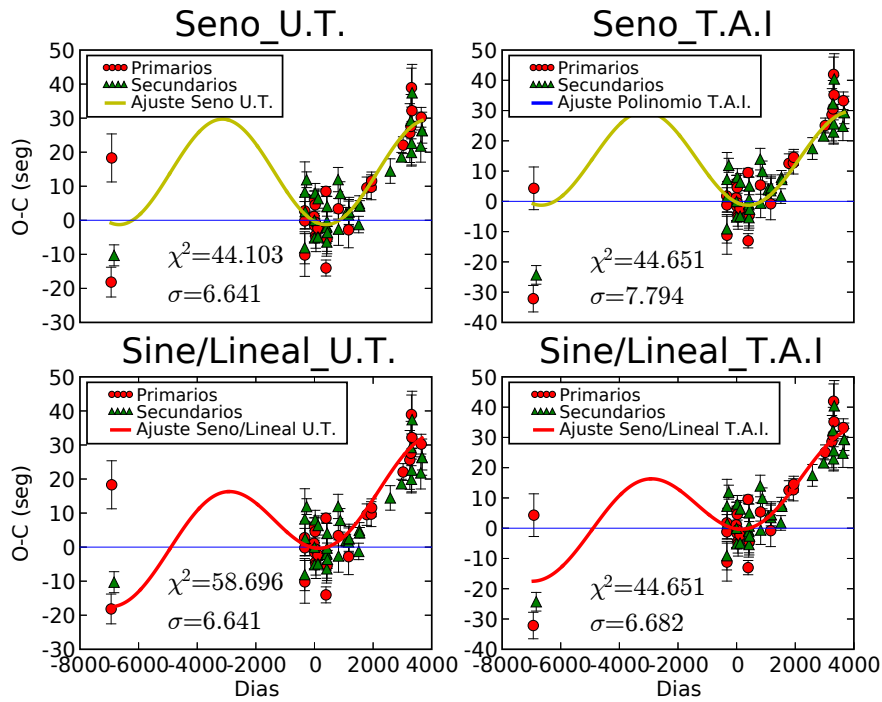


Figura A.2: Comparación del ajuste al seno y a la suma del seno más el lineal.

En el caso del ajuste sinusoidal tenemos un χ^2 menor para los tiempos en el sistema de referencia UT que para los tiempos en el sistema de referencia TAI, sin embargo, para los casos lineales, polinómicos y seno + lineales podemos ver que el χ^2 es menor en los tiempos TAI que en los tiempos UT. Como podemos apreciar, las diferencias son bastante notorias y, por lo tanto, de ahora en adelante nos referiremos siempre a los sistemas de referencia TAI para poder tratar los datos con más precisión. Como ya hemos dicho antes, a los tiempos UT se ha añadido 1 segundo en varias ocasiones desde el 1972, mientras que el TAI marca el tiempo literal que ha transcurrido, sin importar la fecha en la que nos encontramos, porque se rige por los tiempos del reloj atómico.

Tabla A.1: Comparación de los parámetros de ajustes de UT vs TAI

Tipo de Ajuste	A	B	C	D	M
Lineal UT	$3.989 \pm 1.369s$	$(3.75 \pm 0.6)x10^{-3}\frac{s}{d}$	-	-	-
Lineal TAI	$3.412 \pm 1.253s$	$(5.3 \pm 0.5)x10^{-3}\frac{s}{d}$	-	-	-
$Y = A + BX$					
PolinómicoUT	$-1.65 \pm 1.171s$	$(5.5 \pm 0.46)x10^{-3}\frac{s}{d}$	$(7.76 \pm 0.951)x10^{-07}\frac{s}{d^2}$	-	-
Polinómico TAI	$-1.36 \pm 1.153s$	$(6.8 \pm 0.45)x10^{-3}\frac{s}{d}$	$(6.58 \pm 0.936)x10^{-08}\frac{s}{d^2}$	-	-
$Y = A + Bx + Cx^2$					
Seno UT	$14.20 \pm 3.1s$	-	$(8.6 \pm 2)x10^{-4}\frac{1}{d}$	-1.92 ± 0.21	$15.49 \pm 2.6s$
Seno TAI	$14.21 \pm 2.4s$	-	$(8.9 \pm 1.6)x10^{-4}\frac{1}{d}$	-1.91 ± 0.20	$15.49 \pm 1.96s$
$Y = A + Msen(Cx + D)$					
Seno+Lineal UT	$13.94 \pm 2.8s$	$(3.6 \pm 7)x10^{-4}\frac{s}{d}$	$(8.4 \pm 2)x10^{-4}\frac{1}{d}$	-1.92 ± 0.19	$15.076 \pm 2.6s$
Seno+Lineal TAI	$11.298 \pm 3.947s$	$(2.4 \pm 0.8)x10^{-3}\frac{s}{d}$	$(8.81 \pm 2.8)x10^{-4}\frac{1}{d}$	-1.93 ± 0.32	$12.3171 \pm 3.3s$
$Y = A + Bx + Msen(Cx + D)$					

B

Programas

Durante la fase de investigación del sistema binario CM Draconis hemos ido desarrollando algunos programas en “python” para hacer algunas gráficas y cálculos que han sido de utilidad durante este proceso. Algunos de los programas escritos son los siguientes:

B.1 LacyUTtai.py

Este programa se escribió con el fin de poder dibujar nuestro diagrama O-C y para hacer el cálculo de los ajustes lineales, polinómicos, sinusoidales y finalmente lineal + sinusoidal. Este programa también fue de gran utilidad para graficar dichos ajustes.

```
#!/usr/local/bin/pybld
#!/usr/local/bin/python
# -*- encoding:latin1 -*-

import pylab
import numarray as num
import math
import LinearAlgebra
from pylab import *

#Este programa te muestra los ajustes lineales de Lacy tanto en el UT como en el TAI
# LAST UPDATE: 20 Marzo 2006

f0=open("OC9405_3extract-1.csv") #Estos son de los datos UT
f=open("OC9405_4extract.csv") #Estos son de los datos TAI

lines0=f0.readlines()
lines=f.readlines()
```

```

todo0=[v0.split("\t")for v0 in lines0]
todo=[v.split("\t") for v in lines]

Epoch0=[float( e10[7].replace(",",".")) for e10 in todo0[4:-1]] #UT
Epoch = [ float(el[9].replace(",",".")) for el in todo[5:-4] ] #TAI

print '\ntenemos una cantidad de',len(Epoch0),'de eclipses primarios y secundarios'

eclipseprim0=[]
eclipseprim=[]

OC0=[float( e10[9].replace(",",".")) for e10 in todo0[4:-1]]
OC = [float( el[11].replace(",",".")) for el in todo[5:-4]]

for e10 in todo0[4:-1] :
if e10[11] == "#N/A" :
eclipseprim0.append(False)
else :
eclipseprim0.append(True)

for el in todo[5:-4] :
if el[13] == "'#N/A'" :
eclipseprim.append(False)
else :
eclipseprim.append(True)

primx0=num.compress(eclipseprim0,Epoch0)
prim0=num.compress(eclipseprim0,OC0)
primx = num.compress(eclipseprim,Epoch)
prim = num.compress(eclipseprim,OC)

secx0 = num.compress(num.logical_not(eclipseprim0),Epoch0)
sec0 = num.compress(num.logical_not(eclipseprim0),OC0)
secx = num.compress(num.logical_not(eclipseprim),Epoch)
sec = num.compress(num.logical_not(eclipseprim),OC)

print 'Tenemos un total de', len(primx0),'eclipses primarios'
print 'Tenemos un total de', len(secx0), 'eclipses secundarios'

ocerror0=[float(e10[10].replace(",",".")) for e10 in todo0[4:-1] ]
ocerror = [ float( el[12].replace(",",".")) for el in todo[5:-4] ]
perr0=num.compress(eclipseprim0,ocerror0)

```

```

perr = num.compress(eclipseprim, ocerror)
serr0 = num.compress(num.logical_not(eclipseprim0), ocerror0)
serr = num.compress(num.logical_not(eclipseprim), ocerror)

y0=num.array ([ float( e10[9].replace(",",".")) for e10 in todo0[4:-1] ]) #UT
x0 = num.array(Epoch0) #UT
y = num.array ([ float( e1[11].replace(",",".")) for e1 in todo[5:-4] ]) #TAI
x = num.array(Epoch) #TAI

jd0=num.arange(min(x0),max(x0))
jd=num.arange(min(x),max(x))
jdp=num.arange(min(primx),max(primx))
jds=num.arange(min(secx),max(secx))

##### LINEAL#####

m0,b0=pylab.polyfit(x0,y0,1)
lin0=m0*x0+b0
m,b=pylab.polyfit(x,y,1)
lin= m*x+b
dlin0=y0-lin0
dlin=y-lin
wssrl0=sum(dlin0**2)
chi2l0=wssrl0/(float(len(lin0))-2)
sigma0=math.sqrt(chi2l0)
wssrl=sum(dlin**2)
chi2l=wssrl/(float(len(lin))-2)
sigma=math.sqrt(chi2l)

mp,bp=pylab.polyfit(primx,prim,1)
linp=mp*primx+bp
ms,bs=pylab.polyfit(secx,sec,1)
lins= ms*secx+bs
dlinp=prim-linp
dlins=sec-lins
wssrlp=sum(dlinp**2)
chi2lp=wssrlp/(float(len(linp))-2)
sigmaalp=math.sqrt(chi2lp)
wssrls=sum(dlins**2)
chi2ls=wssrls/(float(len(lins))-2)
sigmals=math.sqrt(chi2ls)

#####POLINOMIAL#####

ap0,bp0,cp0=pylab.polyfit(x0, y0,2)

```

```

pol0=ap0*x0**2+bp0*x0+cp0
p40=pylab.plot(jd0,ap0*jd0**2+bp0*jd0+cp0,"-c", linewidth=2)
dpol0=y0-pol0
wssrp0=sum(dpol0**2)
chi2p0=wssrp0/(float(len(pol0))-3)
sigmap0=math.sqrt(chi2p0)

```

```

ap, bp, cp=pylab.polyfit(x, y, 2)
pol=ap*x**2+bp*x+cp
p4=pylab.plot(jd, ap*jd**2+bp*jd+cp, "-c", linewidth=2)
dpol=y-pol
wssrp=sum(dpol**2)
chi2p=wssrp/(float(len(pol))-3)
sigmap=math.sqrt(chi2p)

```

```

app, bpp, cpp=pylab.polyfit(primx, prim, 2)
polp=app*primx**2+bpp*primx+cpp
p4p=pylab.plot(jdp, app*jdp**2+bpp*jdp+cpp, "-c", linewidth=2)
dpolp=prim-polp
wssrpp=sum(dpolp**2)
chi2pp=wssrpp/(float(len(polp))-3)
sigmapp=math.sqrt(chi2pp)

```

```

aps, bps, cps=pylab.polyfit(secx, sec, 2)
pols=aps*secx**2+bps*secx+cps
p4s=pylab.plot(jds, aps*jds**2+bps*jds+cps, "-c", linewidth=2)
dpols=sec-pols
wssrps=sum(dpols**2)
chi2ps=wssrps/(float(len(pols))-3)
sigmaps=math.sqrt(chi2ps)

```

```

#*****SINOSOIDAL*****

```

```

A0,B0,C0,D0=14.2187,15.4908,0.000890474,-1.91805
sin0=A0+B0*num.sin(C0*x0+D0)
dsin0=y0-sin0
wssrs0=sum(dsin0**2)
chi2s0=wssrs0/(float(len(sin0))-4)
sigmas0=math.sqrt(chi2s0)

```

```

A,B,C,D=14.2187,15.4908,0.000890474,-1.91805
sin=A+B*num.sin(C*x+D)
dsin=y-sin
wssrs=sum(dsin**2)
chi2s=wssrs/(float(len(sin))-4)

```

```
sigmas=math.sqrt(chi2s)
```

```
Ap,Bp,Cp,Dp=14.2187,15.4908,0.000991742,-1.91805
sinp=Ap+Bp*num.sin(Cp*primx+Dp)
dsinp=prim-sinp
wssrsp=sum(dsinp**2)
chi2sp=wssrsp/(float(len(sinp))-4)
sigmasp=math.sqrt(chi2sp)
```

```
As,Bs,Cs,Ds=16.8874,15.9733,0.000745307,-1.75243
sins=As+Bs*num.sin(Cs*secx+Ds)
dsins=sec-sins
wssrss=sum(dsins**2)
chi2ss=wssrss/(float(len(sins))-4)
sigmass=math.sqrt(chi2ss)
```

```
#####SENO/LINEAL#####
```

```
Ad0=11.2985
Bd0=12.3171
Cd0=0.000881054
Dd0=-1.93156
md0=0.0024097
```

```
lis0=Ad0+Bd0*num.sin(Cd0*x0+Dd0)+(md0*x0)
dyls0=(y0-lis0)
wssrls0=sum(dyls0**2)
chi2ls0=wssrls0/float(len(lis0)-5)
sigmals0=math.sqrt(chi2s0)
```

```
Ad=11.2985
Bd=12.3171
Cd=0.000881054
Dd= -1.93156
md=0.0024097
```

```
lis=Ad+Bd*num.sin(Cd*x+Dd)+(md*x)
dyls=(y-lis)
wssrls=sum(dyls**2)
chi2ls=wssrls/float(len(lis)-5)
sigmals=math.sqrt(chi2ls)
```

```
Adp=-3.09354
Bdp=4.87893
Cdp=0.00158826
```

```

Ddp=-3.52342
mdp=0.00940785

lisp=Adp+Bdp*num.sin(Cdp*primx+Ddp)+(mdp*primx)
dylsp=(prim-lisp)
wssrlsp=sum(dylsp**2)
chi2lsp=wssrlsp/float(len(lisp)-5)
sigmalsp=math.sqrt(chi2lsp)

Ads=6.2606
Bds=7.56052
Cds=0.00103635
Dds=-2.43023
mds=0.00447859

liss=Ads+Bds*num.sin(Cds*secx+Dds)+(mds*secx)
dylss=(sec-liss)
wssrlss=sum(dylss**2)
chi2lss=wssrlss/float(len(liss)-5)
sigmalss=math.sqrt(chi2lss)

##### GRAFICANDO...#####

font = {'fontname'   : 'Courier',
        'color'      : 'r',
        'fontweight' : 'bold',
        'fontsize'   : 15}

pylab.figure(1) #esta grafica es para comparar el lineal y el polinomico
TAI vs UT
pylab.subplot(221)
p1=pylab.bar(primx0, [0]*len(primx0), 0, bottom = prim0, yerr = perr0)
p12=pylab.bar(secx0, [0]*len(secx0), 0, bottom = sec0, yerr = serr0)
p2=pylab.plot(primx0, prim0, "ro")
p22=pylab.plot(secx0,sec0,"g^")
pylab.title('Lineal_U.T.', fontsize=20)
p3=pylab.plot(jd0,m0*jd0+b0,"m-", linewidth=2, color='g')
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.axhline(y=0)
pylab.text(-5000, -29, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmal0)+'$',font, color='k')
pylab.text(-5000, -21, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2l0)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p2[0],p22[0],p3[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Lineal
U.T. '), loc=2)
pylab.xticks([])

```

```

pylab.subplot(222)
p4=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p42=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p5=pylab.plot(primx,prim,"ro")
p52=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.title('Lineal_T.A.I', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
p6=pylab.plot(jd,m*jd+b,"m-", linewidth=2, color='g')
pylab.text(-2000, -35, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigma)+'$',font, color='k')
pylab.text(-2000, -27, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2l)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p5[0],p52[0],p6[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Lineal
T.A.I.'), loc=2)
pylab.xticks([])

pylab.subplot(223)
p7=pylab.bar(primx0, [0]*len(primx0), 0, bottom = prim0, yerr = perr0)
p72=pylab.bar(secx0, [0]*len(secx0), 0, bottom = sec0, yerr = serr0)
p8=pylab.plot(primx0,prim0,"ro")
p82=pylab.plot(secx0,sec0,"g^")
pylab.title('Polinomial_U.T.', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.xlabel("Dias")
p9=pylab.plot(jd0,ap0*jd0**2+bp0*jd0+cp0,"-c", linewidth=2, color='b')
pylab.text(-5000, -29, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmap0)+'$',font, color='k')
pylab.text(-5000, -21, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2p0)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p8[0],p82[0],p9[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Polinomio
U.T.'), loc=2)

pylab.subplot(224)
p10=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p102=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p11=pylab.plot(primx,prim,"ro")
p112=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.title('Polinomial_T.A.I', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
pylab.xlabel("Dias")
p13=pylab.plot(jd,ap*jd**2+bp*jd+cp,"-c", linewidth=2, color='b')
pylab.legend((p11[0],p112[0],p13[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Polinomio
T.A.I.'), loc=2)
pylab.text(-2000, -35, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmap)+'$',font, color='k')
pylab.text(-2000, -27, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2p)+'$',font, color='k')

pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra4/imagenes/Lin_Poli_Lacy.ps', dpi=50)

```

```

pylab.figure(2) #Compara el seno y el seno+lineal del TAI vs UT
pylab.subplot(221)
p14=pylab.bar(primx0, [0]*len(primx0), 0, bottom = prim0, yerr = perr0)
p142=pylab.bar(secx0, [0]*len(secx0), 0, bottom = sec0, yerr = serr0)
p15=pylab.plot(primx0, prim0, "ro")
p152=pylab.plot(secx0,sec0,"g^")
pylab.title('Seno_U.T.', fontsize=20)
p16=pylab.plot(jd0,A0+B0*num.sin(C0*jd0+D0),"m-", linewidth=2, color='y')
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.axhline(y=0)
pylab.text(-5000, -25, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmas0)+'$',font, color='k')
pylab.text(-5000, -15, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2s0)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p15[0],p152[0],p16[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Seno
U.T. '), loc=2)
pylab.xticks([])

pylab.subplot(222)
p17=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p172=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p18=pylab.plot(primx,prim,"ro")
p182=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.title('Seno_T.A.I', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
p19=pylab.plot(jd,A+B*num.sin(C*jd+D),"m-", linewidth=2, color='y')
pylab.text(-5000, -35, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmas)+'$',font, color='k')
pylab.text(-5000, -25, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2ls)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p11[0],p112[0],p13[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Polinomio
T.A.I. '), loc=2)
pylab.xticks([])

pylab.subplot(223)
p20=pylab.bar(primx0, [0]*len(primx0), 0, bottom = prim0, yerr = perr0)
p202=pylab.bar(secx0, [0]*len(secx0), 0, bottom = sec0, yerr = serr0)
p21=pylab.plot(primx0,prim0,"ro")
p212=pylab.plot(secx0,sec0,"g^")
pylab.title('Sine/Lineal_U.T.', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.xlabel("Dias")
p22=pylab.plot(jd0,Ad0+Bd0*num.sin(Cd0*jd0+Dd0)+(md0*jd0),"-c", linewidth=2, color='r')
pylab.text(-5000, -25, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmas0)+'$',font, color='k')
pylab.text(-5000, -15, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2ls0)+'$',font, color='k')

pylab.legend((p21[0],p212[0],p22[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Seno/Lineal
U.T. '), loc=2)

```

```
pylab.subplot(224)
p23=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p232=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p24=pylab.plot(primx,prim,"ro")
p242=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.title('Sine/Lineal_T.A.I', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
pylab.xlabel("Dias")
p25=pylab.plot(jd,Ad+Bd*num.sin(Cd*jd+Dd)+(md*jd),"-c", linewidth=2, color='r')
pylab.legend((p24[0],p242[0],p25[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Seno/Lineal
T.A.I.'), loc=2)
pylab.text(-5000, -35, r'\sigma = '+'%5.3f "%(sigmas)+'$',font, color='k')
pylab.text(-5000, -25, r'\chi^2 = '+'%5.3f "%(chi2ls)+'$',font, color='k')

pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra4/imagenes/Sine_SineLin_Lacy.ps', dpi=50)

pylab.show()
```

B.2 Epochs.py

Este programa se escribió solo para poder dividir el fichero de las épocas que contiene tanto a los primarios como a los secundarios en dos ficheros distintos, uno solo de los datos primarios y otro de los datos secundarios.

```
#!/usr/local/bin/pybld
#!/usr/local/bin/python
#-*-encoding:latin1-*-

import pylab
import numarray as num
import scipy
import math
import time
import datetime

#Este programa divide en dos los ficheros de las epocas de los primarios y los
#secundarios para poder calcular la fase.
#Last UPDATE: 06/April/2006

f=open('/home/breezy/DEA/CMDra3/OC9405_4extrPrim.csv')
lines=f.readlines()

todo=[v.split("\t") for v in lines]

epoch=[ float(el[8].replace(",",".")) for el in todo[8:-4]]

ec_prim=[]
for el in todo[8:-4] :
    if el[13] == 'N/A':
        ec_prim.append(False)
    else:
        ec_prim.append(True)

epoPrim=num.compress(ec_prim,epoch)
epoSec=num.compress(num.logical_not(ec_prim), epoch)

OC=[float (el[11].replace(",",".")) for el in todo [8:-4]]

ocPrim=num.compress(ec_prim,OC)
ocSec=num.compress(num.logical_not(ec_prim),OC)

f=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EpochPrimario.txt","w")

cadena=""
```

```
for tepoPrim, tocPrim in zip(epoPrim,ocPrim):
    cadena=cadena+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoPrim-int(tepoPrim),tocPrim)

f.write(cadena)
f.close

f2=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EpochSecundario.txt","w")

cadena2=""
for tepoSec, tocSec in zip(epoSec,ocSec):
    cadena2=cadena2+"%11.6f \t %.6f \n"%(tepoSec-int(tepoSec),tocSec)

f2.write(cadena2)
f2.close

#Dvidiendo en muestra 1, 0<t<500, y muestra 2 3,100<t<4,000

p=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EpochPrimario1.txt")
linesp=p.readlines()

xp=[float(p.split("\t")[0]) for p in linesp]
yp=[float(p.split("\t")[1]) for p in linesp]

pp=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EpochPrimario2.txt")
linespp=pp.readlines()

xpp=[float(pp.split("\t")[0]) for pp in linespp]
ypp=[float(pp.split("\t")[1]) for pp in linespp]

s=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EpochSecundario1.txt")
liness=s.readlines()

xs=[float(s.split("\t")[0]) for s in liness]
ys=[float(s.split("\t")[1]) for s in liness]

ss=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EpochSecundario2.txt")
linesss=ss.readlines()

xss=[float(ss.split("\t")[0]) for ss in linesss]
yss=[float(ss.split("\t")[1]) for ss in linesss]

promPrim1=1-sum(xp)/float(len(xp))
rmsxp=scipy.stats.stats.stdev(1-num.array(xp))
promPrim2=sum(xpp)/float(len(xpp))
```

```
rmsxpp=scipy.stats.stats.stdevr(num.array(xpp))

promSec1=1-sum(xs)/float(len(xs))
rmsxs=scipy.stats.stats.stdevr(1-num.array(xs))
promSec2=sum(xss)/float(len(xss))
rmsxss=scipy.stats.stats.stdevr(num.array(xss))

print '\nEl valor promedio de las epocas de los eclipses Primarios de la muestra 1
es:\n',promPrim1,'+/-',rmsxpp
print '\nEl valor promedio de las epocas de los eclipses Primarios de la muestra 2
es:\n',promPrim2,'+/-',rmsxpp
print '\nEl valor promedio de las epocas de los eclipses Secundarios de la muestra 1
es:\n',promSec1,'+/-',rmsxs
print '\nEl valor promedio de las epocas de los eclipses Secundarios de la muestra 2
es:\n',promSec2,'+/-',rmsxss

muestra1=abs(promPrim1-promSec1)
muestra2=abs(promPrim2-promSec2)
error1=math.sqrt(rmsxp**2+rmsxs**2)
error2=math.sqrt(rmsxpp**2+rmsxss**2)

print 'Muestra 1', muestra1,'+/-',error1
print 'Muestra 2', muestra2,'+/-',error2
```

B.3 TAI.py

Este programa es prácticamente el mismo que el que se muestra en B.1, pero con la diferencia de que acá solo se toman en cuenta los tiempos de referencia T.A.I. y no se toman en cuenta los 3 primeros eclipses para hacer los ajustes.

```
#!/usr/local/bin/pybld
#!/usr/local/bin/python
# -*- encoding:latin1 -*-

import pylab
import numpy as num
import math
import LinearAlgebra
from pylab import *

#Este programa te muestra los ajustes en TAI de los eclipses primarios y secundarios,
#juntos y por separado.
# LAST UPDATE: 20 Marzo 2006

f=open("OC9405_4extract.csv") #Estos son de los datos TAI
lines=f.readlines()

todo=[v.split("\t") for v in lines]
Epoch = [ float(el[9].replace(",",".")) for el in todo[8:-4] ] #TAI
eclipseprim=[]
OC = [float( el[11].replace(",",".")) for el in todo[8:-4]]

for el in todo[8:-4] :
    if el[13] == "'#N/A'" :
        eclipseprim.append(False)
    else :
        eclipseprim.append(True)

primx = num.compress(eclipseprim,Epoch)
prim = num.compress(eclipseprim,OC)
secx = num.compress(num.logical_not(eclipseprim),Epoch)
sec = num.compress(num.logical_not(eclipseprim),OC)
y = num.array ([ float( el[11].replace(",",".")) for el in todo[8:-4] ]) #TAI
x = num.array(Epoch) #TAI
jd=num.arange(min(x),max(x))
jdp=num.arange(min(primx),max(primx))
```

```

jds=num.arange(min(secx),max(secx))

ocerror = [ float( el[12].replace(",",".")) for el in todo[8:-4] ]
perr = num.compress(eclipseprim, ocerror)
serr = num.compress(num.logical_not(eclipseprim),ocerror)

print 'Hay', len(primx),'Eclipses Primarios'
print 'Hay',len(secx),'Eclipses Secundarios'
#***** LINEAL*****

m,b=pylab.polyfit(x,y,1)
lin= m*x+b
dlin=y-lin
wssrl=sum(dlin**2)
chi2l=wssrl/(float(len(lin))-2)
sigmal=math.sqrt(chi2l)

mp,bp=pylab.polyfit(primx,prim,1)
linp=mp*primx+bp
ms,bs=pylab.polyfit(secx,sec,1)
lins= ms*secx+bs
dlinp=prim-linp
dlins=sec-lins
wssrlp=sum(dlinp**2)
chi2lp=wssrlp/(float(len(linp))-2)
sigmalp=math.sqrt(chi2lp)
wssrls=sum(dlins**2)
chi2ls=wssrls/(float(len(lins))-2)
sigmals=math.sqrt(chi2ls)

#*****POLINOMIAL*****

ap,bp,cp=pylab.polyfit(x,y,2)
pol=ap*x**2+bp*x+cp
p4=pylab.plot(jd,ap*jd**2+bp*jd+cp,"-c", linewidth=2)
dpol=y-pol
wssrp=sum(dpol**2)
chi2p=wssrp/(float(len(pol))-3)
sigmap=math.sqrt(chi2p)

app,bpp,cpp=pylab.polyfit(primx, prim,2)
polp=app*primx**2+bpp*primx+cpp
p4p=pylab.plot(jdp,app*jdp**2+bpp*jdp+cpp,"-c", linewidth=2)
dpolp=prim-polp
wssrpp=sum(dpolp**2)

```

```

chi2pp=wssrpp/(float(len(polp))-3)
sigmapp=math.sqrt(chi2pp)

aps,bps,cps=pylab.polyfit(secx,sec,2)
pols=aps*secx**2+bps*secx+cps
p4s=pylab.plot(jds,aps*jds**2+bps*jds+cps,"-c", linewidth=2)
dpols=sec-pols
wssrps=sum(dpols**2)
chi2ps=wssrps/(float(len(pols))-3)
sigmaps=math.sqrt(chi2ps)

#####SINOSOIDAL#####

A,B,C,D=14.2187,15.4908,0.000890474,-1.91805
sin=A+B*num.sin(C*x+D)
dsin=y-sin
wssrs=sum(dsin**2)
chi2s=wssrs/(float(len(sin))-4)
sigmas=math.sqrt(chi2s)

Ap,Bp,Cp,Dp=14.2187,15.4908,0.000991742,-1.91805
sinp=Ap+Bp*num.sin(Cp*primx+Dp)
dsinp=prim-sinp
wssrsp=sum(dsinp**2)
chi2sp=wssrsp/(float(len(sinp))-4)
sigmasp=math.sqrt(chi2sp)

As,Bs,Cs,Ds=16.8874,15.9733,0.000745307,-1.75243
sins=As+Bs*num.sin(Cs*secx+Ds)
dsins=sec-sins
wssrss=sum(dsins**2)
chi2ss=wssrss/(float(len(sins))-4)
sigmass=math.sqrt(chi2ss)

#####SENO/LINEAL#####

Ad=11.2985
Bd=12.3171
Cd=0.000881054
Dd= -1.93156
md=0.0024097

lis=Ad+Bd*num.sin(Cd*x+Dd)+(md*x)
dyls=(y-lis)
wssrls=sum(dyls**2)

```

```

chi2ls=wssrls/float(len(lis)-5)
sigmals=math.sqrt(chi2ls)

Adp=-3.09354
Bdp=4.87893
Cdp=0.00158826
Ddp=-3.52342
mdp=0.00940785

lisp=Adp+Bdp*num.sin(Cdp*primx+Ddp)+(mdp*primx)
dylsp=(prim-lisp)
wssrlsp=sum(dylsp**2)
chi2lsp=wssrlsp/float(len(lisp)-5)
sigmalsp=math.sqrt(chi2lsp)

Ads=6.2606
Bds=7.56052
Cds=0.00103635
Dds=-2.43023
mds=0.00447859

liss=Ads+Bds*num.sin(Cds*secx+Dds)+(mds*secx)
dylss=(sec-liss)
wssrlss=sum(dylss**2)
chi2lss=wssrlss/float(len(liss)-5)
sigmalss=math.sqrt(chi2lss)

##### GRAFICANDO...#####

font = {'fontname'   : 'Courier',
        'color'      : 'r',
        'fontweight' : 'bold',
        'fontsize'   : 15}

pylab.figure(1)
pylab.subplot(221)
p4=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p42=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p5=pylab.plot(primx,prim,"ro")
p52=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.title('Lineal', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
p6=pylab.plot(jd,m*jd+b,"m-", linewidth=2, color='g')
pylab.text(2000, -10, r'$\chi^2 = '+'%5.3f "%(chi2l)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'$\sigma = '+'%5.3f "%(signal)+'$',font, color='k')

```

```

pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.legend((p5[0],p52[0],p6[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Lineal'),
  loc=2)
#pylab.ticks=arange(-500.,4000., 1000.)
pylab.xticks([])

pylab.subplot(222)
p10=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p102=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p11=pylab.plot(primx,prim,"ro")
p112=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.title('Polinomial', fontsize=20)
pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))
#pylab.ticks=arange(-500.,4000., 1000.)
pylab.axhline(y=0)
p13=pylab.plot(jd,ap*jd**2+bp*jd+cp,"-c", linewidth=2, color='b')
pylab.text(2000, -10, r'$\chi^2 = '+"%5.3f "%(chi2p)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'$\sigma = '+"%5.3f "%(sigmap)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p11[0],p112[0],p13[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Polinomio'),
  loc=2)
pylab.ticks=arange(-500.,4000., 1000.)
pylab.xticks([])

pylab.subplot(223)
p17=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p172=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p18=pylab.plot(primx,prim,"ro")
p182=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.title('Seno', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
p19=pylab.plot(jd,A+B*num.sin(C*jd+D),"m-", linewidth=2, color='y')
pylab.text(2000, -10, r'$\chi^2 = '+"%5.3f "%(chi2s)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'$\sigma = '+"%5.3f "%(sigmas)+'$',font, color='k')
pylab.xlabel("Dias")
pylab.legend((p18[0],p182[0],p19[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Seno'),
  loc=2)
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))
#pylab.ticks=arange(-500,4000, 1000)
#pylab.xticks([ticks])

pylab.subplot(224)
p23=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)

```

```

p232=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p24=pylab.plot(primx,prim,"ro")
p242=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.title('Sine/Lineal', fontsize=20)
pylab.axhline(y=0)
pylab.xlabel("Dias")
p25=pylab.plot(jd,Ad+Bd*num.sin(Cd*jd+Dd)+(md*jd),"-c", linewidth=2, color='r')
pylab.legend((p24[0],p242[0],p25[0]),('Primarios','Secundarios','Ajuste Seno/Lineal'),
loc=2)
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2ls)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmas)+'$',font, color='k')
pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))
#pylab.ticks=arange(-500.,4000., 1000.)
#pylab.xticks([ticks])
#pylab.yticks(ticks)

pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra4/imagenes/PrimSec.ps', dpi=50)

pylab.figure(3)
pylab.subplot(221)
p1=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p2=pylab.plot(primx, prim, "ro")
pylab.title('Lineal_Primario', fontsize=20)
p3=pylab.plot(jdp,mp*jdp+bp,"m-", linewidth=2, color='g')
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.axhline(y=0)
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2lp)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmalp)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p2[0],p25[0]),('Primarios','Ajuste Lineal'), loc=2)
#pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))
pylab.xticks([])

pylab.subplot(222)
p7=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p9=pylab.plot(primx,prim,"ro")
pylab.axhline(y=0)
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.title('Polinomial_Primario', fontsize=20)
p11=pylab.plot(jdp,app*jdp**2+bpp*jdp+cpp,"b-",linewidth=2, color='b')
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2pp)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmapp)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p9[0],p11[0]),('Primarios','Ajuste Polinomio'), loc=2)
#pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))
pylab.xticks([])

```

```

pylab.subplot(223)
p12=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p14=pylab.plot(primx,prim,"ro")
pylab.axhline(y=0)
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.xlabel("Dias")
pylab.title('Seno_Primary', fontsize=20)
p16=pylab.plot(jdp,Ap+Bp*num.sin(Cp*jdp+Dp), "y-",linewidth=2, color='y')
pylab.legend((p14[0],p16[0]),('Primarios','Ajuste Seno'), loc=2)
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2sp)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmasp)+'$',font, color='k')
pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))

pylab.subplot(224)
p17=pylab.bar(primx, [0]*len(primx), 0, bottom = prim, yerr = perr)
p19=pylab.plot(primx,prim,"ro")
pylab.axhline(y=0)
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.title('Seno/Lineal_Primary', fontsize=20)
pylab.xlabel("Dias")
p21=pylab.plot(jdp,Adp+Bdp*num.sin(Cdp*jdp+Ddp)+(mdp*jdp),"c-",linewidth=2, color='r')
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2lsp)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmalp)+'$',font, color='k')
pylab.legend((p19[0],p21[0]),('Primarios','Ajuste Seno/Lineal'), loc=2)
pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))
pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra4/imagenes/Primarios.ps', dpi=50)

pylab.figure(4)
pylab.subplot(221)
p1=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p2=pylab.plot(secx, sec, "g^")
pylab.title('Lineal_Secundario', fontsize=20)
p3=pylab.plot(jds,ms*jds+bs,"m-", linewidth=2, color='g')
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.axhline(y=0)
pylab.legend((p2[0],p3[0]),('Secundario','Ajuste Lineal'), loc=2)
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2ls)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmalp)+'$',font, color='k')
#pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))
pylab.xticks([])

pylab.subplot(222)
p7=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p9=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.axhline(y=0)

```

```

pylab.title('Polinomo_Secundario', fontsize=20)
p11=pylab.plot(jds,aps*jds**2+bps*jds+cps,"b-",linewidth=2, color='b')
pylab.legend((p9[0],p11[0]),('Secundario','Ajuste Polinomio'), loc=2)
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2ps)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmaps)+'$',font, color='k')
pylab.xticks([])
#pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))

pylab.subplot(223)
p12=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p14=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.axhline(y=0)
pylab.ylabel("O-C (seg)")
pylab.title('Secundario_Seno', fontsize=20)
p16=pylab.plot(jds,As+B*s*num.sin(Cs*jds+Ds), "y-",linewidth=2, color='y')
pylab.legend((p14[0],p16[0]),('Secundario','Ajuste Seno'), loc=2)
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2ss)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmass)+'$',font, color='k')
pylab.xlabel("Dias")
pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))

pylab.subplot(224)
p17=pylab.bar(secx, [0]*len(secx), 0, bottom = sec, yerr = serr)
p19=pylab.plot(secx,sec,"g^")
pylab.axhline(y=0)
pylab.title('Seno/Lineal_Secundario', fontsize=20)
pylab.xlabel("Dias")
p21=pylab.plot(jds,Ads+Bds*num.sin(Cds*jds+Dds)+(mds*jds),"c-",linewidth=2, color='r')
pylab.legend((p19[0],p21[0]),('Secundario','Ajuste Seno/Lineal'), loc=2)
pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+"%5.3f"%(chi2lss)+'$',font, color='k')
pylab.text(2000, -15, r'\sigma = '+"%5.3f"%(sigmalss)+'$',font, color='k')
#pylab.text(2000, -10, r'\chi^2 = '+str(chi2lss)+'$',font, color='k')
pylab.xticks(arange(-500.,4000., 1000.))
pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra4/imagenes/Secundarios.ps', dpi=50)

pylab.show()

```

B.4 Residuos.py

Residuos.py, como su nombre lo indica, nos calcula los residuos de todos los ajustes que queremos analizar.

```
#!/usr/local/bin/pybld
#!/usr/local/bin/python
#-*-encoding:latin1-*-

#Este programa es para poder sacar los residuos de los ajustes para luego llevarlos
#a Fortran y sacar los espectros de potencia

import pylab
import numarray as num
import scipy
import math

f=open('/home/breezy/DEA/CMDra/OC9405_4extract.csv')
lines=f.readlines()

todo=[v.split("\t") for v in lines]

epoch=[ float(el[8].replace(",",".")) for el in todo[8:-4]]

ec_prim=[]
for el in todo[8:-4] :
    if el[13] == "'#N/A'":
        ec_prim.append(False)
    else:
        ec_prim.append(True)

epoPrim=num.compress(ec_prim,epoch)
epoSec=num.compress(num.logical_not(ec_prim), epoch)

OC = [float( el[11].replace(",",".")) for el in todo[8:-4]]
ocerror = [ float( el[12].replace(",",".")) for el in todo[8:-4] ]

ocPrim = num.compress(ec_prim,OC)
ocSec = sec = num.compress(num.logical_not(ec_prim),OC)
perr = num.compress(ec_prim, oerror)
serr = num.compress(num.logical_not(ec_prim),oerror)

y = num.array ([ float( el[11].replace(",",".")) for el in todo[8:-4] ]) #TAI
x = num.array(epoch)
```

```

jd=num.arange(min(x),max(x))
jdp=num.arange(min(epoPrim),max(epoPrim))
jds=num.arange(min(epoSec),max(epoSec))

#Escribo las listas de los OC versus Epochs

p=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primarios/PrimOCvEp.txt","w")
cadena=""
for tepoPrim, tocPrim in zip(epoPrim,ocPrim):
    cadena=cadena+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoPrim,tocPrim)
p.write(cadena)
p.close

s=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/secundarios/SecOCvEp.txt","w")
cadena2=""
for tepoPrim, tocPrim in zip(epoPrim,ocPrim):
    cadena2=cadena2+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoPrim,tocPrim)
s.write(cadena2)
s.close

ps=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primsec/OCvEp.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tOC in zip(epoch,OC):
    cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tOC)
ps.write(cadena3)
ps.close

#LINEALES, con ellos vamos a sacar los res'iduos y los vamos a poner en ficheros,
#esto es lo que vamos a usar para fortran!

m,b=pylab.polyfit(x,y,1)
lin= m*x+b
dlin=y-lin
mp,bp=pylab.polyfit(epoPrim,ocPrim,1)
linp=mp*epoPrim+bp
ms,bs=pylab.polyfit(epoSec,ocSec,1)
lins= ms*epoSec+bs
dlinp=ocPrim-linp
dlin=ocSec-lins

rl=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primsec/resLPS.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdlin in zip(epoch,dlin):
    cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdlin)
rl.write(cadena3)

```

```
r1.close
rpl=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primarios/resLP.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdlinp in zip(epoch,dlinp):
cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdlinp)
rpl.write(cadena3)
rpl.close
rsl=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/secundarios/resLS.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdlins in zip(epoch,dlins):
cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdlins)
rsl.write(cadena3)
rsl.close

# POLINOMIO

ap,bp,cp=pylab.polyfit(x,y,2)
pol=ap*x**2+bp*x+cp
dpol=y-pol
app,bpp,cpp=pylab.polyfit(epoPrim, ocPrim,2)
polp=app*epoPrim**2+bpp*epoPrim+cpp
dpolp=ocPrim-polp
aps,bps,cps=pylab.polyfit(epoSec,ocSec,2)
pols=aps*epoSec**2+bps*epoSec+cps
dpols=ocSec-pols

rp=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primsec/resPPS.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdpol in zip(epoch,dpol):
cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdpol)
rp.write(cadena3)
rp.close
rpp=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primarios/resPP.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdpolp in zip(epoch,dpolp):
cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdpolp)
rpp.write(cadena3)
rpp.close
rsp=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/secundarios/resPS.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdpols in zip(epoch,dpols):
cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdpols)
rsp.write(cadena3)
rsp.close
```

```
# LINEAL + SENO

primx=epoPrim
prim=ocPrim
secx=epoSec
sec=ocSec

Ad=11.2985
Bd=12.3171
Cd=0.000881054
Dd= -1.93156
md=0.0024097

lis=Ad+Bd*num.sin(Cd*x+Dd)+(md*x)
dyls=(y-lis)
wssrls=sum(dyls**2)
chi2ls=wssrls/float(len(lis)-5)

Adp=-3.09354
Bdp=4.87893
Cdp=0.00158826
Ddp=-3.52342
mdp=0.00940785

lisp=Adp+Bdp*num.sin(Cdp*primx+Ddp)+(mdp*primx)
dylsp=(prim-lisp)
wssrlsp=sum(dylsp**2)
chi2lsp=wssrlsp/float(len(lisp)-5)

Ads=6.2606
Bds=7.56052
Cds=0.00103635
Dds=-2.43023
mds=0.00447859

liss=Ads+Bds*num.sin(Cds*secx+Dds)+(mds*secx)
dylss=(sec-liss)
wssrlss=sum(dylss**2)
chi2lss=wssrlss/float(len(liss)-5)

rls=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primsec/resLSPS.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdyls in zip(epoch,dyls):
cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdyls)
```

```
rls.write(cadena3)
rls.close
rlsp=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primarios/resLSP.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdylsp in zip(epoch,dylsp):
cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdylsp)
rlsp.write(cadena3)
rlsp.close
rlss=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/secundarios/resLSS.txt","w")
cadena3=""
for tepoch, tdylss in zip(epoch,dylss):
cadena3=cadena3+"%11.6f \t %3.6f \n"%(tepoch,tdylss)
rlss.write(cadena3)
rlss.close
```

B.5 Espectros2.py

Cuando usamos `residuos.py` tenemos unos datos a los que le aplicamos el programa de `fortran` que se llama `mspec3.f` y esto nos devuelve una lista donde encontramos valores para los períodos, las amplitudes y las fases del sistema, datos que queremos dibujar para poder ver con más claridad. Este programa se encarga de hacer estas gráficas.

```
#!/usr/local/bin/pybld
#!/usr/local/bin/python
# -*- encoding:latin1 -*-

import pylab
import numpy as np
import math
import LinearAlgebra
import scipy
from scipy import stats

#Ultima version del programa: 28 Abril 2006

#Abriendo el archivo!!

f=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/OC9405_4extract.csv")
lines=f.readlines()

todo=[v.split("\t") for v in lines]

Epoch = [ float( el[9].replace(",",".")) for el in todo[8:-4] ]
EpochLacy = [ float( el[9].replace(",",".")) for el in todo[5:-4] ]
eclipseprim=[]
eclipseprimLacy=[]

OC = [float( el[11].replace(",",".")) for el in todo[8:-4]]
OCLacy = [float( el[11].replace(",",".")) for el in todo[5:-4]]

for el in todo[8:-4] :
    if el[13] == "'#N/A'" :
        eclipseprim.append(False)
    else :
        eclipseprim.append(True)

for el in todo[5:-4] :
    if el[13] == "'#N/A'" :
        eclipseprimLacy.append(False)
    else :
```

```

eclipseprimLacy.append(True)

primx = num.compress(eclipseprim,Epoch)
prim = num.compress(eclipseprim,0C)
primxLacy = num.compress(eclipseprimLacy,EpochLacy)
primLacy = num.compress(eclipseprimLacy,0CLacy)

secx = num.compress(num.logical_not(eclipseprim),Epoch)
sec = num.compress(num.logical_not(eclipseprim),0C)
secxLacy = num.compress(num.logical_not(eclipseprimLacy),EpochLacy)
secLacy = num.compress(num.logical_not(eclipseprimLacy),0CLacy)

ocerror = [ float( el[12].replace(",",".") ) for el in todo[8:-4] ]
ocerrorLacy = [ float( el[12].replace(",",".") ) for el in todo[5:-4] ]
perr = num.compress(eclipseprimLacy, ocerrorLacy)
serr = num.compress(num.logical_not(eclipseprimLacy),ocerrorLacy)

y = num.array ([ float( el[11].replace(",",".") ) for el in todo[8:-4] ])
x = num.array(Epoch)

#Dibujando lo basico!!
pylab.figure(1)
p1=pylab.bar(primxLacy, [0]*len(primxLacy), 0, bottom = primLacy, yerr = perr)
p2=pylab.bar(secxLacy, [0]*len(secxLacy), 0, bottom = secLacy, yerr = serr)
p3=pylab.plot(primxLacy, primLacy, "ro")
p4=pylab.plot(secxLacy, secLacy, "g^")
pylab.axhline(y=0)
pylab.title('Diagrama 0-C',fontsize=20)

pylab.ylabel('0-C(sec)')
pylab.xlabel('Days from Epoch JD 2449830.756967')
#pylab.ticks=range(-400, 1600, 200)
#pylab.xticks(pylab.ticks)
pylab.grid(True)
pylab.legend( (p3[0], p4[0]), ('Primarios', 'Secundarios'), shadow=True, loc=2)
pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra3/imagenes/eclipsesLacy.ps', dpi=50)

ps=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primsec/ampl3Lin.spec")
linesps=ps.readlines()

todops=[vps.split("\t") for vps in linesps]
perps =num.array( [ float(elps[2]) for elps in todops[:-4]])
ampps= num.array([ float(elps[3] )for elps in todops[:-4]])

```

```
phaps=num.array( [ float(elps[5]) for elps in todops[:-4]])

font = {'fontname'   : 'Courier',
        'color'      : 'r',
        'fontweight' : 'bold',
        'fontsize'   : 15}

pylab.figure(2) #pinto el lineal
#pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
pylab.subplot(313)
p5=pylab.plot(perps,ampps,linewidth=2,color='g')
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
pylab.text(2000,1,'Primarios + Secundarios',font)
pylab.xlabel('Period(days)')
#pylab.yticks=range(0.,5., 1.)

p=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primarios/ampl3Lin.spec")
linesp=p.readlines()

todop=[vp.split("\t") for vp in linesp]
perp =num.array( [ float(elp[2]) for elp in todop[:-4]])
ampp = num.array([ float(elp[3] )for elp in todop[:-4]])
phap=num.array( [ float(elp[5]) for elp in todop[:-4]])
#xoff = pylab.array([0.0] )

pylab.subplot(311)
pylab.title('Espectro de potencia del 0-C LINEAL', fontsize=20)
p6=pylab.plot(perp,ampp,linewidth=2)
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
pylab.xticks([])
pylab.text(2500,5,'Primario',font)
#pylab.yticks=pylab.arange(0,6, 1)

s=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/secundarios/ampl3Lin.spec")
liness=s.readlines()

todos=[vs.split("\t") for vs in liness]
pers =num.array( [ float(els[2]) for els in todos[:-4] ])
amps = num.array([ float(els[3] )for els in todos[:-4] ])
phas=num.array( [ float(els[5]) for els in todos[:-4] ])
```

```

pylab.subplot(312)
p6=pylab.plot(pers,amps,linewidth=2,color='y')
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
#pylab.yticks=range(0.,5., 1.)
pylab.text(2500,4,'Secundario',font)
pylab.xticks([])

pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/EspectrosPotenciaLINEAL.ps',
dpi=50)

pylab.figure(3)
pylab.title('Fases Espectro de Potencia LINEAL',fontsize=20)
p7=pylab.plot(perp,phap,'g',linewidth=2)
p8=pylab.plot(pers,phas,'b--',linewidth=2)
pylab.ylabel('Fase(rad)')
pylab.xlabel('Periodo (dias)')
pylab.legend((p7[0],p8[0]),('Primarios','Secundarios'),shadow=True)
pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/PhaseEspectroPotenciaLINEAL.ps',
dpi=50)
#p8=pylab.plot(perhs,phahps)

pylab.figure(4) #pinto el polinomio
ps=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primsec/ampl3Poli.spec")
linesps=ps.readlines()

pylab.subplot(313)
p5=pylab.plot(perps,ampps,linewidth=2,color='g')
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
pylab.text(2000,1,'Primarios + Secundarios',font)
pylab.xlabel('Period(days)')
#pylab.yticks=range(0.,5., 1.)

p=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primarios/ampl3Poli.spec")
linesp=p.readlines()

todop=[vp.split("\t") for vp in linesp]
perp =num.array( [ float(elp[2]) for elp in todop[:-4]])
ampp = num.array([ float(elp[3] )for elp in todop[:-4]])
phap=num.array( [ float(elp[5]) for elp in todop[:-4]])
#xoff = pylab.array([0.0] )

pylab.subplot(311)

```

```
pylab.title('Espectro de potencia del 0-C, POLINOMIO', fontsize=20)
p6=pylab.plot(perp, ampp, linewidth=2)
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
pylab.xticks([])
pylab.text(2500, 3, 'Primario', font)
#pylab.yticks=pylab.arange(0, 6, 1)

s=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/secundarios/ampl3Poli.spec")
liness=s.readlines()

todos=[vs.split("\t") for vs in liness]
pers = num.array( [ float(els[2]) for els in todos[:-4] ])
amps = num.array([ float(els[3] )for els in todos[:-4] ])
phas=num.array( [ float(els[5]) for els in todos[:-4] ])

pylab.subplot(312)
p6=pylab.plot(pers, amps, linewidth=2, color='y')
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
#pylab.yticks=range(0., 5., 1.)
pylab.text(2500, 1.5, 'Secundario', font)
pylab.xticks([])

pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/EspectrosPotenciaPOLI.ps',
dpi=50)

pylab.figure(5)
pylab.title('Fases Espectro de Potencia POLI', fontsize=20)
p7=pylab.plot(perp, phap, 'g', linewidth=2)
p8=pylab.plot(pers, phas, 'b--', linewidth=2)
pylab.ylabel('Fase(rad)')
pylab.xlabel('Periodo (dias)')
pylab.legend((p7[0], p8[0]), ('Primarios', 'Secundarios'), shadow=True)
pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/PhaseEspectroPotenciaPOLI.ps',
dpi=50)
#p8=pylab.plot(perhs, phahps)

pylab.figure(6) #pinto el Lin+Seno
ps=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primsec/ampl3LinSeno.spec")
linesps=ps.readlines()

pylab.subplot(313)
```

```
p5=pylab.plot(perps,ampps,linewidth=2,color='g')
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
pylab.text(2000,1,'Primarios + Secundarios',font)
pylab.xlabel('Period(days)')
#pylab.yticks=range(0.,5., 1.)

p=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/primarios/ampl3LinSine.spec")
linesp=p.readlines()

todop=[vp.split("\t") for vp in linesp]
perp =num.array( [ float(elp[2]) for elp in todop])
ampp = num.array([ float(elp[3] )for elp in todop])
phap=num.array( [ float(elp[5]) for elp in todop])
#xoff = pylab.array([0.0] )

pylab.subplot(311)
pylab.title('Espectro de potencia del 0-C, LINEAL+SENO', fontsize=20)
p6=pylab.plot(perp,ampp,linewidth=2)
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
pylab.xticks([])
pylab.text(2500,3,'Primario',font)
#pylab.yticks=pylab.arange(0,6, 1)

s=open("/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/secundarios/ampl3LinSine.spec")
liness=s.readlines()

todos=[vs.split("\t") for vs in liness]
pers =num.array( [ float(els[2]) for els in todos[:-4] ])
amps = num.array([ float(els[3] )for els in todos[:-4] ])
phas=num.array( [ float(els[5]) for els in todos[:-4] ])

pylab.subplot(312)
p6=pylab.plot(pers,amps,linewidth=2,color='y')
#pylab.grid(True)
pylab.ylabel('Amplitud(sec)')
#pylab.yticks=range(0.,5., 1.)
pylab.text(2500,1.5,'Secundario',font)
pylab.xticks([])

pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/EspectrosPotenciaLINSENO.ps',
dpi=50)
```

```
pylab.figure(7)
pylab.title('Fases Espectro de Potencia LINEAL+SENO',fontsize=20)
p7=pylab.plot(perp,phap,'g',linewidth=2)
p8=pylab.plot(pers,phas,'b--',linewidth=2)
pylab.ylabel('Fase(rad)')
pylab.xlabel('Periodo (dias)')
pylab.legend((p7[0],p8[0]),('Primarios','Secundarios'),shadow=True)
pylab.savefig('/home/breezy/DEA/CMDra3/EspecPotencia/PhaseEspectroPotenciaLINSENO.ps',
dpi=50)

pylab.show()
```

C

Gráficas Espectros de Potencia

En el capítulo 4.4 hicimos un análisis de los espectros de potencia y mostramos las gráficas de los resultados del lineal, del polinomio y de la combinación del seno más el lineal. Sin embargo en este apéndice vamos a mostrar las gráficas pero con mayor resolución para cada uno de los ajustes.

C.1 Lineal

C.1.1 Períodos de 0 a 1000 días

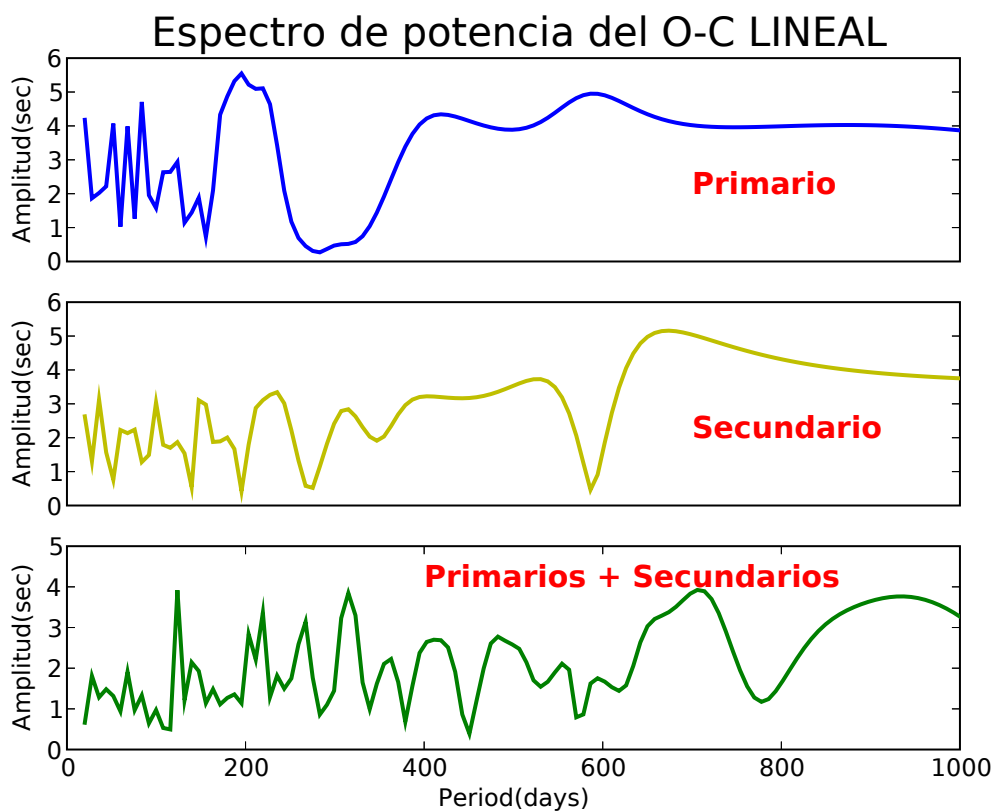


Figura C.1: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Lineal del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último de la suma de todos los eclipses. Esta figura es la misma que la figura 4.4 con la diferencia de que únicamente estamos viendo lo que sucede desde los períodos 0 a 1000.

C.1.2 Períodos de 0 a 100 días

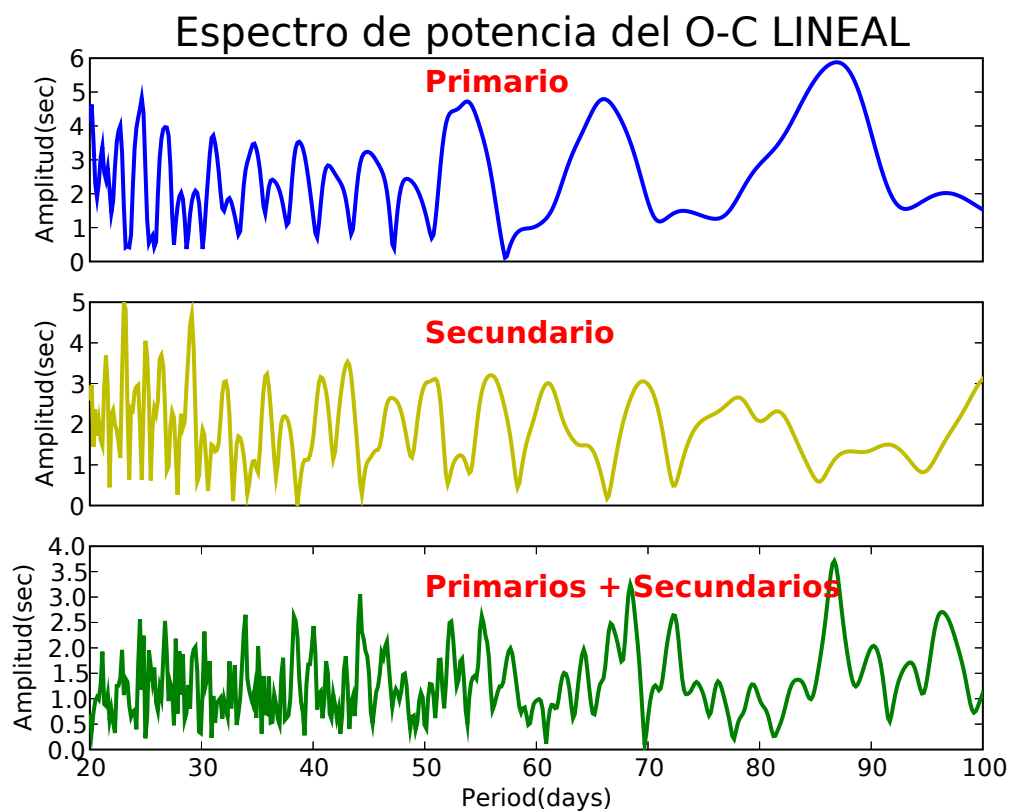


Figura C.2: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Lineal del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último de la suma de todos los eclipses. Esta figura es la misma que las figuras 4.4 y C.1.1, pero todavía más enfocada en los períodos de 0 a 100

C.2 Polinomio

C.2.1 período de 0 a 1000 días

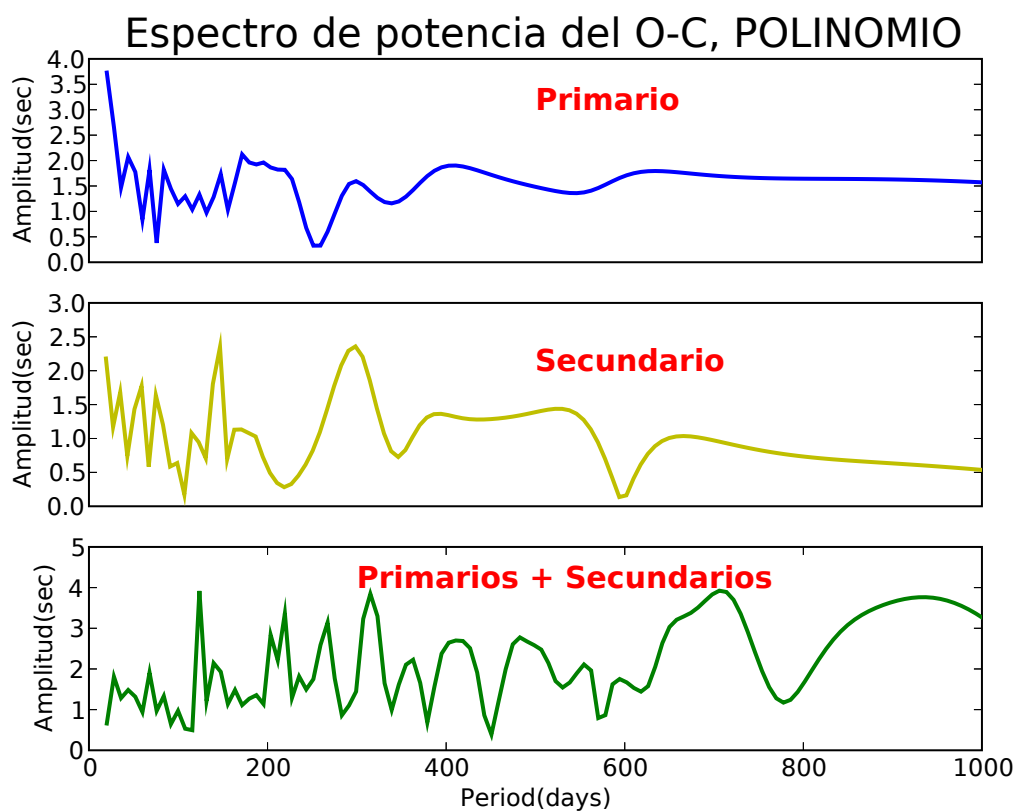


Figura C.3: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Polinómico del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último de la suma de todos los eclipses. En este caso tenemos una visión más detallada que en el caso de la figura 4.5 porque nos enfocamos en las fases de 0 a 1000

C.2.2 Período de 0 a 100 días

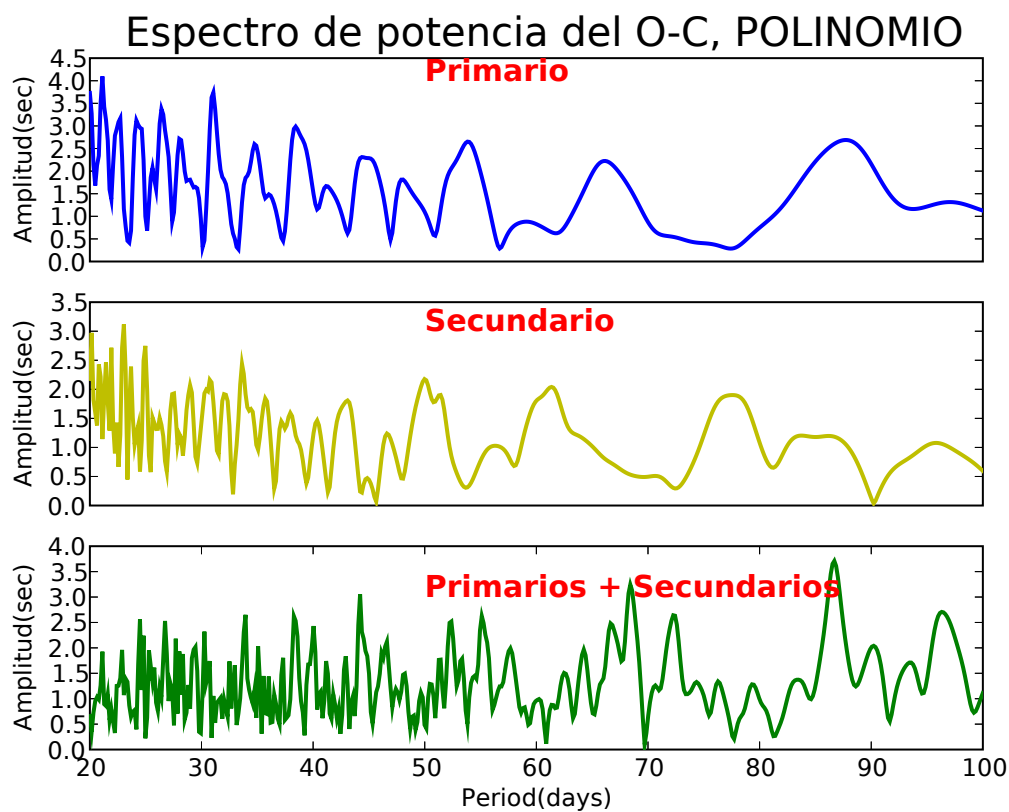


Figura C.4: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Polinómico del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último de la suma de todos los eclipses. En esta figura vemos en más detalle lo que ocurre en las fases de 0 a 100 que lo que podemos apreciar en las figuras 4.5 y C.2.1

C.3 Seno+Lineal

C.4 Período de 0 a 1000 días

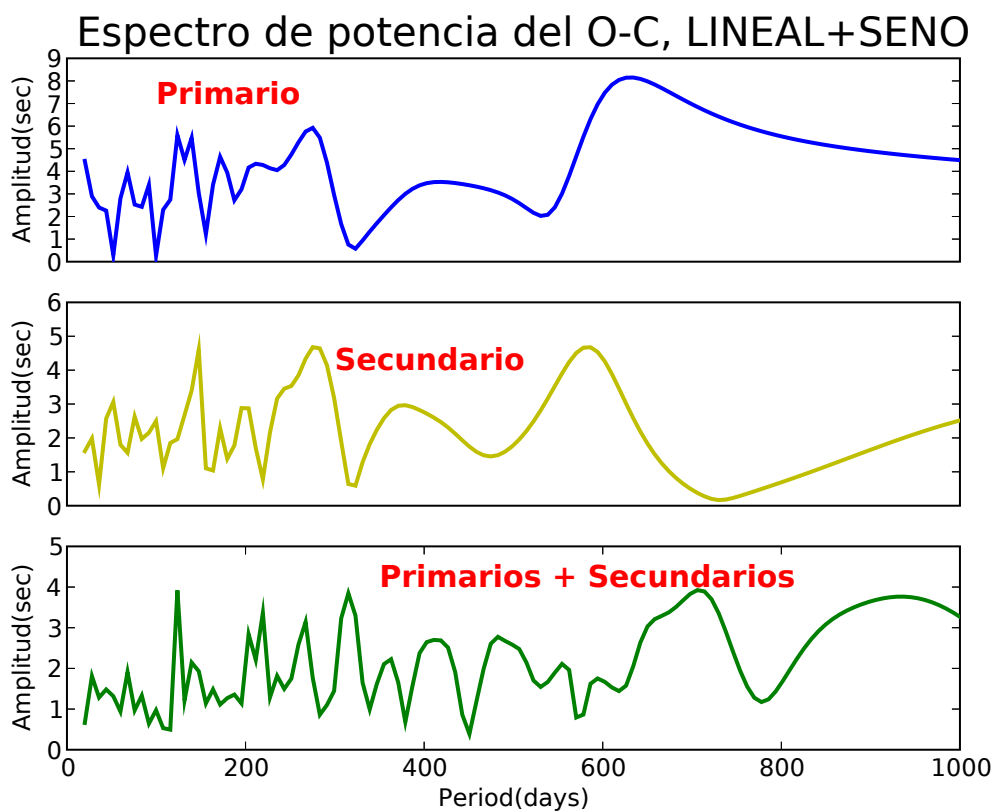


Figura C.5: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Lineal más el sinusoidal del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último de la suma de todos los eclipses. En este caso podemos ver más detalladamente, de 0 a 1000, lo que vemos en la figura 4.6

C.4.1 Período de 0 a 100 días

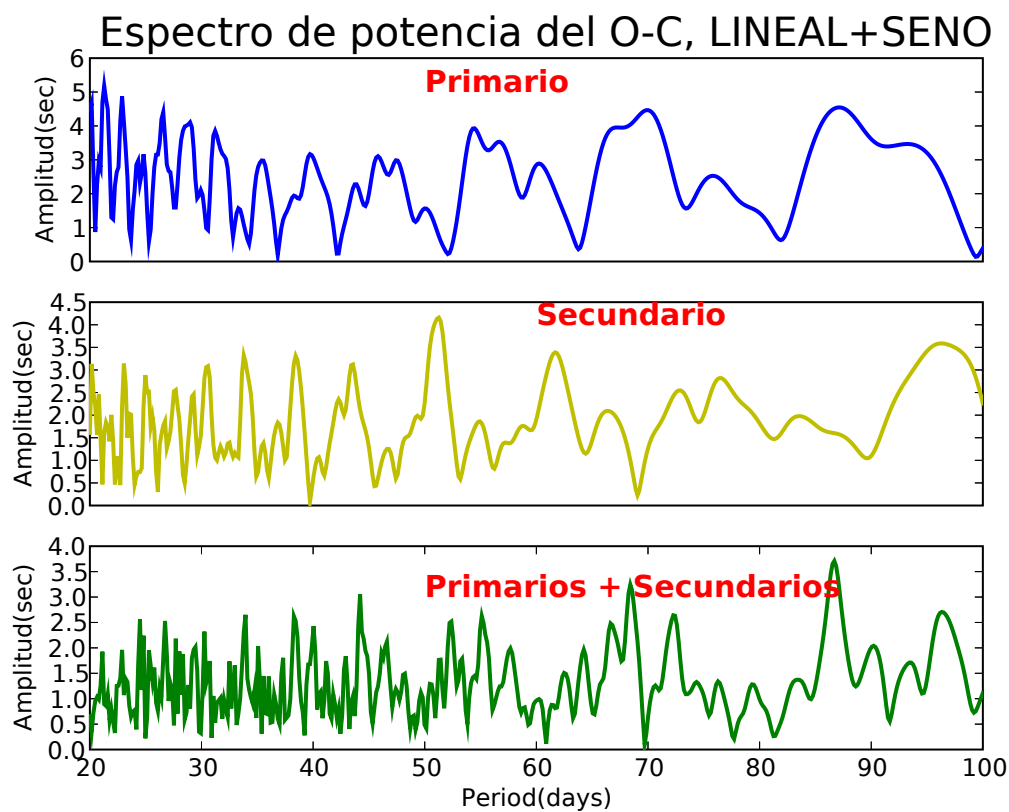


Figura C.6: Espectro de potencia de los residuos del Ajuste Lineal más el sinusoidal del O-C, donde el primer cuadro es de los eclipses primarios, el del medio es de los eclipses secundarios y el último de la suma de todos los eclipses. Finalmente el más detallado de los análisis de los espectros de potencia con una visión de los 0 a 100 en la fase. Vemos acá más detalles que en la figura 4.6 y C.4

Bibliography

- Chabrier G., Baraffe I., 1995, *ApJ*, 451, L29, CM Draconis and YY Geminorum: Agreement Between Theory and Observation.
- Deeg H. J., Doyle L. R., Kozhevnikov V. P., et al., 2000, *A&A*, 358, L5, A search for Jovian-mass planets around CM Draconis using eclipse minima timing.
- Doyle L. R., Deeg H. J., Kozhevnikov V. P., et al., 2000, *ApJ*, 535, 338, Observational Limits on Terrestrial-sized Inner Planets around the CM Draconis System Using the Photometric Transit Method with a Matched-Filter Algorithm.
- Dvorak S. W., 2005, *International Bulletin on Variable Stars*, 5603, 1, Times of Minima for Neglected Eclipsing Binaries in 2004.
- Kwee K. K., van Woerden H., 1956, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 12, 327, A method for computing accurately the epoch of minimum of an eclipsing variable.
- Lacy C. H., 1977, *ApJ*, 218, 444, Absolute dimensions and masses of the remarkable spotted dM4e eclipsing binary flare star CM Draconis.
- Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature*, 378, 355, A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star.
- Metcalf T. S., Mathieu R. D., Latham D. W., Torres G., 1996, *ApJ*, 456, 356, The Low-Mass Double-lined Eclipsing Binary CM Draconis: A Test of the Primordial Helium Abundance and the Mass-Radius Relation near the Bottom of the Main Sequence.
- Thébaud P., Marzari F., Scholl H., Turrini D., Barbieri M., 2004, *A&A*, 427, 1097, Planetary formation in the γ Cephei system.
- Zhou A., 1999, *Publications of the Beijing Astronomical Observatory.*, 33, 17, A review of the O-C method and period change.