

EL CELÓSTATO DE LA UCM

– 2003-2004 –



Luis Alberto Martínez Vaquero

Tutor: Jaime Zamorano Calvo

CONTENIDO

PRÓLOGO

DESCRIPCIÓN GENERAL

- Introducción
- Antecedentes
- Estructura y manejo

PUESTA A PUNTO

- Distribución espacial
- Protección de los espejos
- Movimiento en declinación
- Paso de luz a la sala de análisis
- Detección de luz solar
- Mecanismo de seguimiento

TIEMPOS DE OBSERVACIÓN

- Movimiento del Sol
- Sombra de la cúpula
- Sol y sombra

PRUEBAS FINALES

- Visualización
- Tránsito de Venus

CONCLUSIONES

- Comentarios
- Agradecimientos

BIBLIOGRAFÍA

PRÓLOGO

La presente memoria es el reflejo del Trabajo Académicamente Dirigido *El celóstato de la UCM*, desarrollado durante el curso 2003-2004 también en el marco de beca de colaboración y tutelado por el profesor Jaime Zamorano.

Esta memoria esta estructurada de forma que su lectura resulte lo más clara posible. Comenzaremos con una *Descripción general*, donde se ofrecerán los fundamentos clave de este proyecto. Después se describirán los trabajos realizados este año para lograr la *Puesta a punto* del celóstato. Más adelante se desarrollarán los análisis teóricos relacionados con los *Tiempos de observación*, con ayuda de programación en *Matlab*. En las *Pruebas finales* veremos cómo se comporta el celóstato ante observaciones reales. Por último, en *Conclusiones*, se hablará de las posibles mejoras que se pueden practicar, habiendo espacio para los agradecimientos.

DESCRIPCIÓN

GENERAL



INTRODUCCIÓN

A grandes rasgos, un celóstato consiste en dos espejos, primario y secundario, que logran enviar la luz solar a otro lugar (sala de análisis), donde es recibida por un telescopio fijo. El seguimiento del Sol se logra gracias a un sistema de relojería que mueve el espejo primario con un período de dos días.

Los celóstatos, conocidos como helióstatos cuando no tienen espejo secundario, llevan utilizándose desde hace siglos. En algunos museos podemos encontrar modelos arcaicos.



Helióstato de Max Kohl (izquierda) y de Silbermann (derecha)



Un ejemplo de investigaciones realizadas utilizando esta instrumentación, fueron las observaciones realizadas por Hale en el Observatorio de Yerkes:

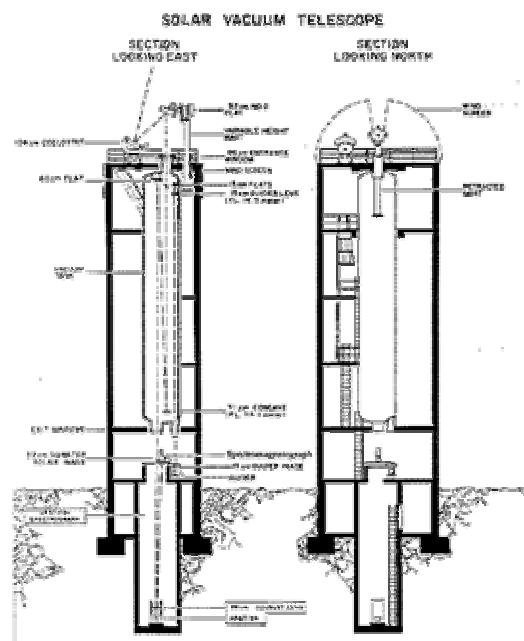


Exterior e interior de la sala del heliostato en el Observatorio de Yerkes

Actualmente, en prácticamente todos los observatorios dedicados a investigaciones solares existen celóstatos como parte integrante de su instrumentación más avanzada. El Observatorio Solar Nacional de Estados Unidos es un buen ejemplo de ello:



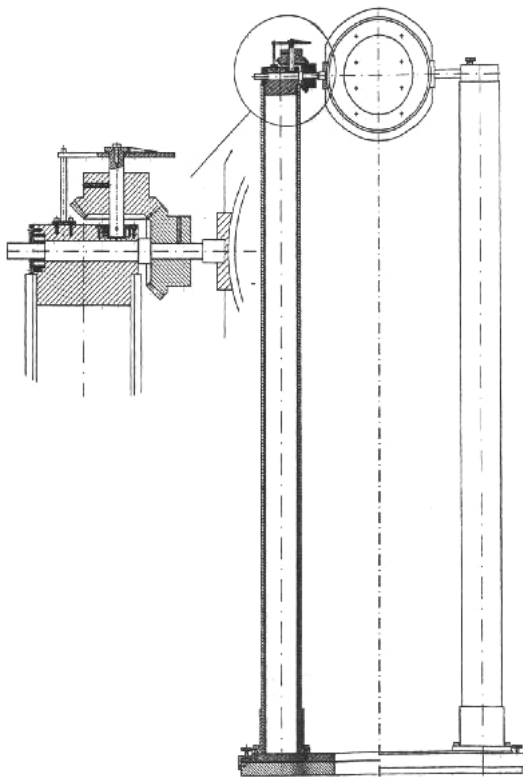
Telescopio Vacuum del NSO





ANTECEDENTES

Este proyecto comenzó en 2001, cuando se tomó la decisión de restaurar el viejo celóstato. Desde entonces hasta ahora ha tenido lugar la revisión de la mecánica, el realuminizado de los espejos, el diseño y fabricación de nuevos elementos y los cálculos de posición para lograr que el celóstato pueda ser utilizable de forma permanente.



Diseño de la estructura del espejo secundario (izquierda); espejo (arriba) y sistema de reductores (abajo) antes de la restauración.



Celóstato antes y después de ser restaurado

Aunque podían haber sido elegidas otras ubicaciones, como una terraza, por ejemplo, se optó por situarlo en la cúpula oeste, ya que así estaría mucho más protegido que en el exterior.

Todos los cálculos se realizan con el objetivo de conseguir el mayor rendimiento durante la tarde, ya que suele ser el momento en el que se desarrollan las prácticas de los alumnos.



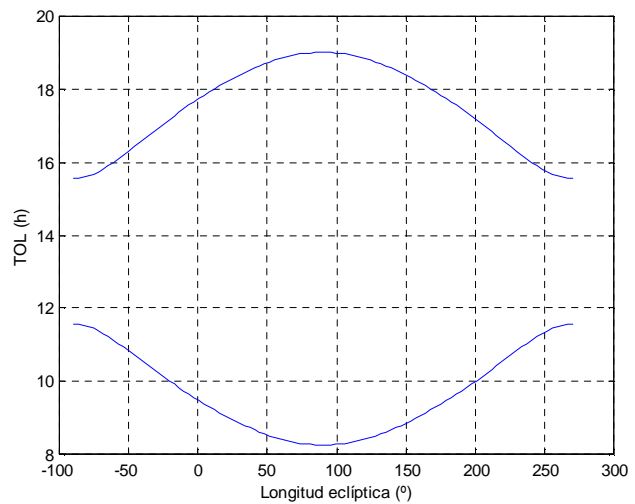
ESTRUCTURA Y MANEJO

A continuación, se reproduce a manera de resumen el manual del celóstato del que se dispondrá en el observatorio. En los próximos apartados se darán muchos más detalles de lo que aquí se ofrece.

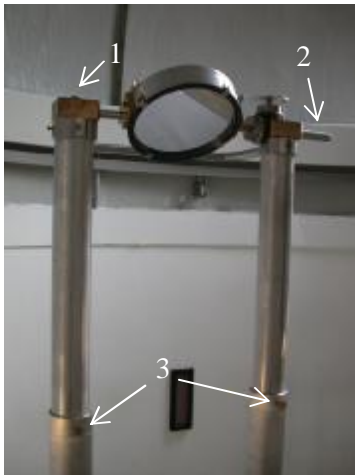
El celóstato consiste básicamente en un sistema de espejos que logran llevar el flujo solar a una sala de análisis, situada debajo de la cúpula, de forma que la luz llega al espejo primario, que lo envía al secundario y éste a la sala.

Se debe tener en cuenta la hora a la que queremos hacer la observación. En el gráfico adjunto se muestra el intervalo en el que el Sol puede iluminar el espejo primario.

Se ha de sumar una hora en horario de verano.



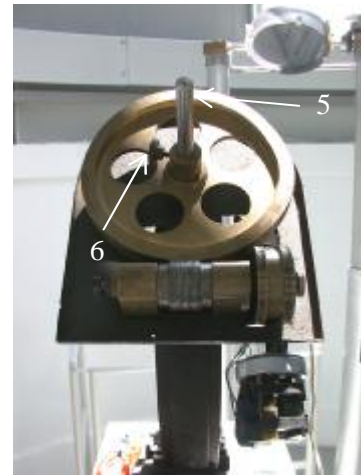
Veamos los elementos principales del celóstato:



Espejo secundario



Espejo primario



Sistema de relojería

Aunque no es necesario seguir una rutina específica para manejar el celóstato, se recomienda utilizar la que sigue.

En primer lugar, tras quitar suavemente las cubiertas de los espejos y del sistema de relojería, se deben aflojar los tornillos 1, 4 y 6 (si queremos variar la altura del espejo secundario también el 3). Después se coloca el secundario en una posición similar a la de la imagen girando el propio espejo o bien utilizando 2. Situando la mano en la cara opuesta del espejo primario, se mueve hasta lograr que la mayor cantidad de luz cubra el secundario; cuando esto se ha conseguido se aprietan los 4. Girando alternativamente el espejo primario en el movimiento del que todavía se dispone (seguimiento en ascensión recta) mediante 5 y el secundario, se ha de conseguir que el disco de luz atraviese el agujero de la base del secundario; después se aprieta 1. Finalmente, giramos 5 hasta conseguir la posición óptima, apretamos 6 y activamos ambos motores con el interruptor. Ya podemos volver a colocar la cubierta al sistema de relojería.



Generalmente no es necesario girar toda la estructura del espejo secundario, pero si lo fuera, antes se aflojarían los tornillos de la base.

Al acabar la observación se deben volver a situar todas las cubiertas en su lugar, así como apagar los motores.

A continuación se detallan ciertas precauciones que siempre se han de tomar:

- **No tocar** la superficie de **los espejos**, aunque se hayan ensuciado.
- Recordar que los **reflejos** de los espejos son tan **dañinos** para los ojos como el mirar directamente al Sol.
- Si se envía la luz a un telescopio, colocar antes un filtro adecuado, para observaciones a ojo desnudo o con instrumentación sensible, o un diafragma para las proyecciones. **Nunca se ha de mirar directamente al Sol con un telescopio.**
- Comprobar siempre que los tornillos están aflojados antes de realizar cualquier movimiento. **Nunca se debe forzar ningún elemento.**
- **Tratar todo el celóstato** con la mayor **suavidad** posible.

PUESTA A

PUNTO



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

- ESPEJO PRIMARIO -

La estructura del espejo primario se encuentra fija en su posición, por lo que será el origen a tomar a la hora de distribuir el resto de elementos del celóstato.

Esta estructura se colocó originariamente de forma que su eje principal estuviera orientado hacia el norte. Para evitar vibraciones, provenientes del suelo de la cúpula principalmente, que impidieran la estabilidad del sistema, se colocaron unas guías entre el suelo y la estructura, así como un contrapeso en su zona inferior. A través de un nivel fijo, podemos asegurarnos que la estabilidad buscada se consigue.





Para realizar un correcto seguimiento del Sol, el eje principal debe estar formando un ángulo con la horizontal igual a la latitud del lugar. Como se dispone de un indicador, sólo basta con aflojar todos los tornillos que restringen el movimiento en declinación y colocarlo de forma que marque unos 40.5° (aproximadamente la latitud de Madrid). Este proceso no será necesario repetirlo en ninguna otra ocasión, ya que para pequeñas correcciones en declinación, el espejo primario dispone de un movimiento extra del que hablaremos más adelante.



Por tanto, el eje principal del espejo primario se encuentra orientado hacia el norte formando 40.5° con la horizontal, es decir, fijo en declinación, permitiendo el movimiento de seguimiento en ascensión recta. Esta posición la podemos ratificar observando que dicho eje y el del telescopio que se encuentra al lado son paralelos.



Espejo primario con el telescopio al fondo. En rojo se muestran las direcciones de sus ejes principales, ambas paralelas y en dirección norte.

- ESPEJO SECUNDARIO -

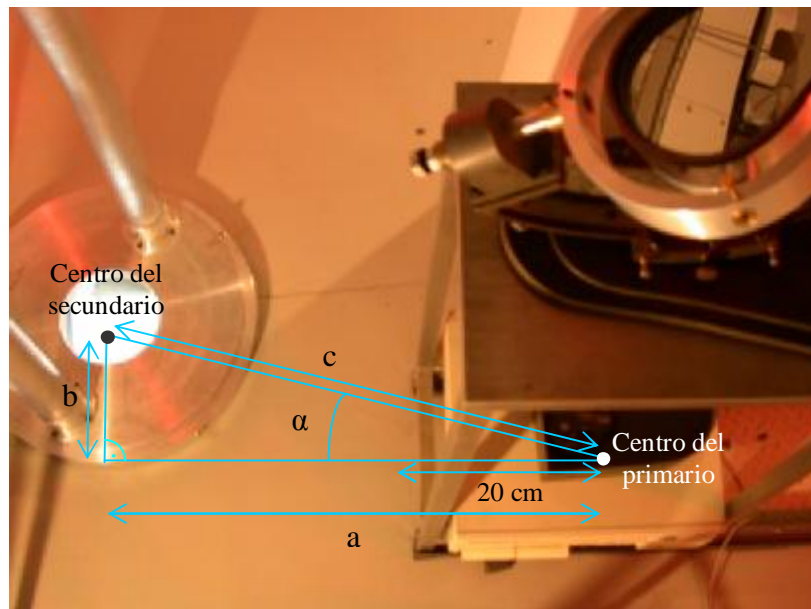
Sabemos, de estudios realizados en años anteriores, que la base de la estructura del espejo secundario debe estar centrada en un punto lo más alejado posible del primario y de tal forma que la proyección del eje de este último sobre la horizontal forme un ángulo de aproximadamente 20° con la dirección que uniría el punto buscado con el centro del primario.



Esta elección se tomó teniendo en cuenta los horarios de observación (tardes del final del invierno y de la primavera) para que los espejos recojan la mayor cantidad de flujo posible.

Teniendo en cuenta todo ello y observando la imagen que ofrecemos a continuación, obtenemos:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{b}{a} \quad \text{,,} \quad \alpha = 20^\circ \Rightarrow \begin{cases} a = 79.5 \text{ cm} \\ b = 28.9 \text{ cm} \end{cases} \\ c &= \sqrt{a^2 + b^2} = 84.6 \text{ cm} \end{aligned}$$

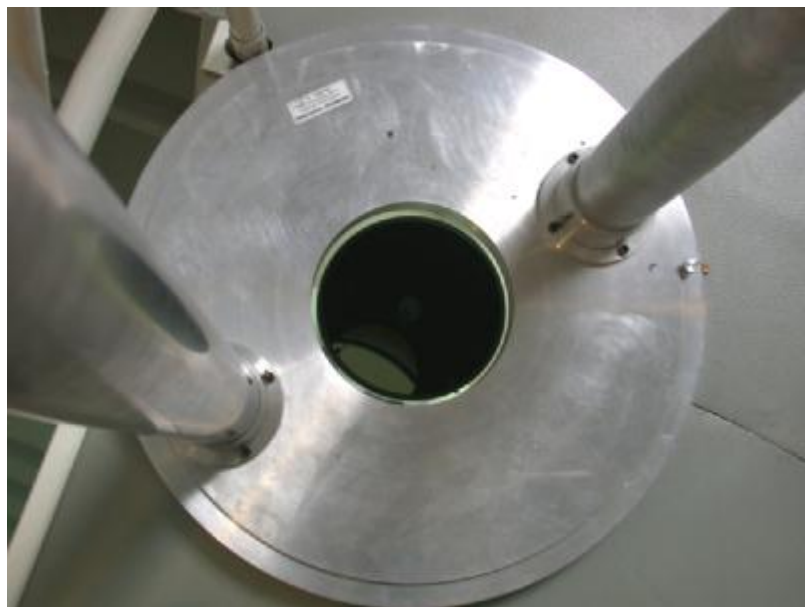


La posición elegida presenta un pequeño inconveniente: la zona de la base más cercana a las escaleras se encuentra sobre la madera que recubre el borde del suelo de la cúpula, ocasionando que no se conserve la horizontalidad deseable.



Para solucionarlo, simplemente hubo que cortar la madera quitando el trozo que quedaba debajo de la estructura con una cuchilla. Con un nivel nos asegurarnos de que la solución surtía efecto.

Una vez colocada la estructura en conjunto, podemos fijar otros movimientos en ella. Su base, por ejemplo, rota en torno a su centro. Para restringir este giro, haremos que llegue la luz al espejo secundario, colocando adecuadamente el primario; moviendo alternativamente el espejo secundario y girando la base, lograremos mandar la luz al agujero practicado en ella, pudiendo ya fijar totalmente la base (con los tornillos adecuados).



Base del espejo secundario, fijada ya su posición definitiva. En su perímetro se pueden ver alguno de los tornillos que restringen su giro.



La posición del espejo secundario variará dependiendo de la altura a la que le coloquemos, como veremos en posteriores análisis.

En conclusión, nos encontramos ante cuatro movimientos permitidos:

- ④ Movimiento del espejo secundario en torno a su eje.
- ④ Desplazamiento en altura del espejo secundario.
- ④ Giro del espejo primario en torno a su eje principal (ascensión recta).
- ④ Rotación del primario en declinación.



PROTECCIÓN DE LOS ESPEJOS

Tanto el espejo primario como el secundario son espejos muy precisos y, por tanto, muy delicados. Así, se debe evitar cualquier contacto directo con ellos, ya que se podría dañar sus estructuras.

En un primer reconocimiento, observamos la existencia de numerosas partículas de polvo adheridas a sendas superficies. Tras escrutarlos con más detenimiento, descubrimos por dónde podía entrar la suciedad: los orificios practicados en los laterales de las cubiertas de los espejos no encajaban exactamente con la estructura, revelando pequeños huecos.



Tapadera de uno de los espejos. Obsérvense los huecos laterales.



La solución pasaba claramente por colocar entre el borde de los espejos y las tapaderas algún material de tipo esponjoso lo suficientemente moldeable para cubrir los huecos.

Probamos diversos tipos de material, decantándonos finalmente por el que consideramos más adecuado a nuestros propósitos.



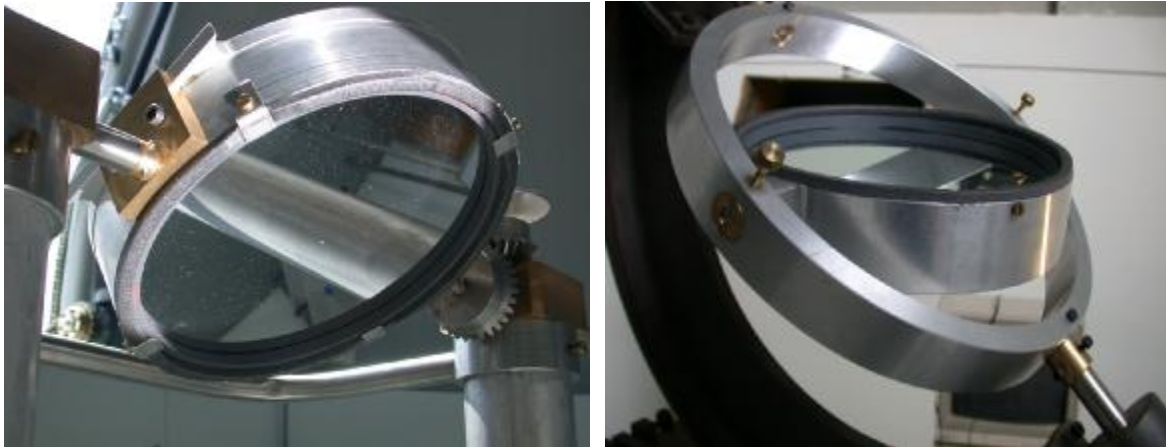
Materiales que se probaron para rellenar los huecos de las tapaderas. El primero de ellos fue el elegido, ya que presentaba una buena adherencia y tenía unas dimensiones óptimas.

Elegimos una primera localización para este nuevo elemento en la cara interior de la tapadera, pero nos encontramos con un nuevo problema en el espejo secundario. En el borde de su constitución fueron colocadas unas piezas para impedir que el espejo propiamente dicho se separara de la base cuando se encontrara boca abajo (posición que debe mantener durante su utilización); estas piezas no permitirían que el material colocado



en la cubierta llegara hasta el borde del espejo como cabría esperar. La alternativa era situar el material de tal forma que pasara por debajo de dichas piezas, colocándolo en la estructura del espejo y no en la tapadera.

En el caso del primario, no ha sido necesario un desarrollo tan cuidadoso, ya que no presentaba las estructuras que hemos mencionado.



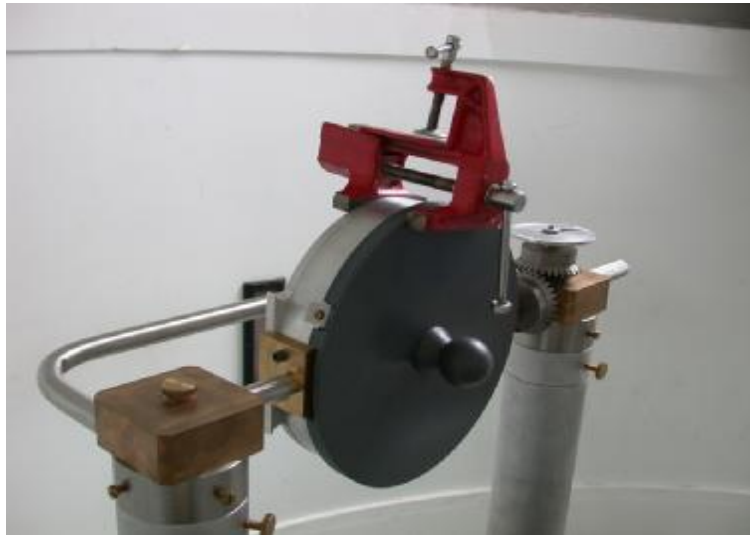
Espejo secundario (izquierda) y primario (derecha) con el material protector colocado. Se pueden observar en el secundario las piezas en forma de L que impiden que se desprenda de su celda.

Con este procedimiento, logramos cubrir el 100% de los huecos de la tapadera del primario y el 80% de los de la del secundario. Para cubrirlos totalmente, se colocó el mismo material, pero rebajando su espesor con una cuchilla, en las zonas todavía descubiertas de la cara interior de la tapadera. De esta forma, logramos impedir totalmente el paso de suciedad.

También fue necesario hacer uso de un tornillo de banco, colocado para lograr que la tapadera del espejo secundario estuviera lo más próxima posible a él, cubriendo todo



orificio. Se colocó en cuatro posiciones distintas, para recorrer todo el perímetro, durante un día cada una.



Tornillo de banco presionando tapadera y celda del espejo secundario.

Otro problema que nos hemos visto obligados a solucionar ha sido la dificultad con la que las tapaderas encajaban en las celdas de los espejos.

Para ello, debíamos rebajar los diámetros interiores de las cubiertas. Tras un primer intento fallido de hacerlo de forma manual con una lija (el PVC era demasiado resistente), optamos por utilizar el torno del taller mecánico. Así, reducimos los diámetros entre una y tres décimas de milímetro.

Cuando volvimos a colocar las tapaderas sobre los espejos, observamos que quedaban excesivamente sueltas, aunque al transcurrir un período no muy largo de tiempo se aferraban más. Este comportamiento se debía al calentamiento del PVC por rozamiento



en el torno, lo que ocasionaba que las cubiertas se dilataran momentáneamente, mientras que las celdas, que no habían sido expuestas, permanecían intactas.

Podemos pensar que la variación de la temperatura ambiental no ocasionará cambios de este tipo, ya que afectaría a toda la estructura, aunque realmente dependerá de los diferentes materiales de los que está compuesta; además hemos de tener presente que, al estar trabajando en diferencias de espesor muy pequeñas, la temperatura puede hacerse importante.

No obstante, el diámetro final de las cubiertas se ha tomado de tal forma que, a cualquier temperatura ambiente razonable, no se desprendan de su lugar. Para ello, se han forrado ciertas zonas del lateral interior de la tapadera del espejo secundario, que era ya la única que estaba ligeramente suelta, con cinta adhesiva, logrando el grosor justo para que la tapadera no cayera:





MOVIMIENTO EN DECLINACIÓN

Como hemos comentado anteriormente, el espejo primario dispone de un movimiento extra en declinación, cuyo eje de giro es perpendicular al eje principal. Su objetivo es el de hacer pequeñas correcciones y sobre todo lograr que la luz forme el ángulo adecuado para que llegue al secundario.

Para conseguir que este movimiento fuera útil, hubo que realizar dos perforaciones en la estructura circular que rodea el espejo llegando al eje de este giro, con el fin de colocar sendos tornillos accesibles que apretados impidieran dicho movimiento.





Por tanto, antes de cada observación, se ha de colocar manualmente el espejo primario, gracias a las dos rotaciones permitidas, para que envíe la luz del sol al secundario. Sin moverlo se ha de apretar los tornillos que restringen su movimiento en declinación, logrando así que el único movimiento permitido sea el de búsqueda o seguimiento en ascensión recta.



PASO DE LUZ A LA SALA DE ANÁLISIS

El fin del celóstato es conseguir pasar la luz solar a una sala de análisis. En nuestro caso ésta se encuentra debajo de la cúpula que contiene a los espejos. Por tanto, hemos de practicar un agujero en el suelo de dicha cúpula, que debe coincidir con el que presenta en su base el espejo secundario.



En esta fotografía se puede observar, desde arriba hacia abajo, la base de la estructura del espejo secundario, una doble capa de material amortiguador, una viga que sujeta el suelo de la cúpula, y la sala de control.

El suelo de metal de la cúpula se encuentra cubierto por una doble capa de material que amortigua las vibraciones ocasionadas por el movimiento que tiene lugar sobre él.



En primer lugar, se ha de quitar manualmente esta capa en la región deseada con una cuchilla. Este proceso no fue totalmente sencillo, debido a que las dos capas eran bastante resistentes y había que lograr una circunferencia lo más exacta posible. Su diámetro fue de 23 cm, tres más que el agujero de la base del secundario, pensando en alguna pequeña recolocación futura.

Por último, se practicó el agujero en el metal, gracias a los responsables en cerrajería.

Se tomó como decisión final que el agujero tuviera 25 cm de diámetro. Este tamaño no provoca ningún tipo de irregularidad en la estabilidad de la estructura del espejo secundario y permite posibles movimientos de reajuste.



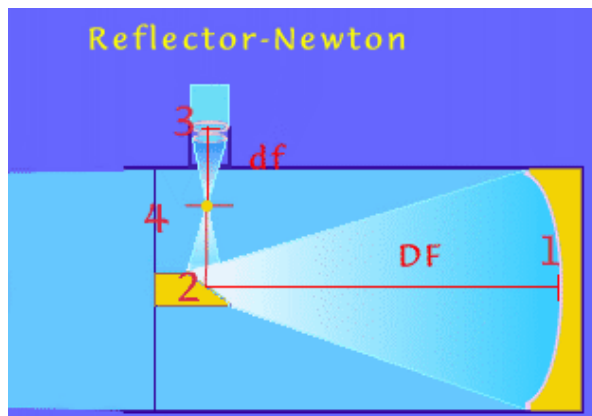
Agujero visto desde la sala de análisis. Observamos que es más grande que el de la base del espejo secundario, el cual también es visible.



DETECCIÓN DE LUZ SOLAR

Una vez que hemos conseguido pasar la luz solar a la sala de análisis, debemos plantearnos qué detectores utilizar para analizarla. Realmente esta cuestión se podría enmarcar en un nuevo proyecto, como sería el caso de un espectroheliógrafo; sin embargo, nosotros nos conformaremos, principalmente por razón de tiempo, en utilizar un telescopio.

El telescopio que emplearemos será un dobsoniano (reflector Newton) de 30 cm de diámetro:

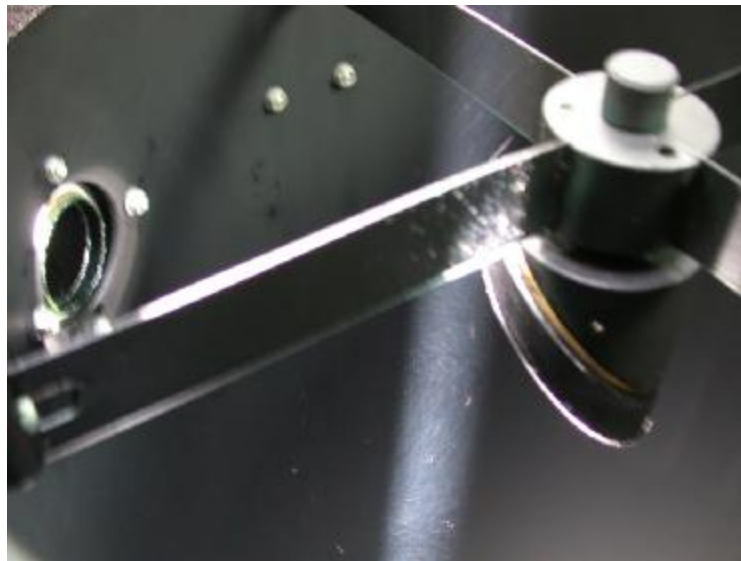


Esquema de telescopio Newton (arriba), donde se muestra el espejo primario (1), secundario (2), ocular (3) y araña (4). A la derecha podemos observar el telescopio real utilizado.





En este tipo de telescopios la luz entra a través del tubo, parte queda bloqueada por el secundario y la araña que lo sustenta, pero el resto sigue su trayectoria dentro del tubo. En el fondo de éste se refleja sobre un espejo primario cóncavo. Como no se puede situar un ocular delante del tubo y observar a través de él, se desvía 90° esa luz mediante el espejo secundario. La luz desviada atraviesa el tubo a través de un orificio y se dirige hacia el ocular.



Vista del interior del telescopio. Se puede observar la luz que incide, el espejo secundario y el orificio que va a parar al ocular.

Los rayos solares deben llegar al telescopio lo más paralelo posible a su eje principal. Para ello, moveremos el telescopio hasta que entre en él el suficiente flujo y colocaremos adecuadamente el espejo secundario del celóstato.



Generalmente es necesario girar el telescopio alrededor de su eje principal hasta lograr que la rotación que éste permite (alrededor de un eje perpendicular al principal) pueda contrarrestar las desviaciones del paralelismo que buscamos.

Todo este proceso se desarrolla muy cómodamente si observamos a través de la entrada del telescopio, asegurándonos que la luz que sale de su espejo secundario va a parar al orificio de salida donde se encuentra el ocular.

Hay un factor muy importante que jamás hemos de olvidar cuando trabajemos con la luz solar: el efecto lupa. Cuando situamos un telescopio para recoger la luz solar debemos tener presente que la intensidad luminosa que produce es muy fuerte, por lo que se han de utilizar filtros o diafragmas.

Si a la salida del telescopio colocamos el ojo desnudo o un instrumento sensible, hemos de colocar un filtro que deje pasar sólo una pequeña cantidad de luz. Si no hacemos esto, las consecuencias podrían llegar a ser trágicas.

En cambio, hemos observado que si pretendemos que la imagen del Sol sea proyectada, no podemos utilizar un filtro como el anterior, ya que no habría suficiente intensidad luminosa. Por otro lado, si no usamos ningún medio limitador, la imagen que obtenemos proyectada es muy nítida, pero el ocular del telescopio se calienta muchísimo, pudiendo llegar a dañarse con un tiempo de exposición relativamente corto.

Una alternativa a los filtros, puede ser el uso de un diafragma, que, al reducir el área luminosa, disminuye la cantidad de luz que entra en el telescopio.



Filtro doble Mylar (izquierda) y diafragma (derecha) utilizados con el telescopio.

Comprobamos que, utilizando el diafragma que fabricamos, el ocular seguía calentándose, por lo que consideramos que la mejor opción era hacer que pudiera ser variable. La ventaja de un diafragma así es que, en base a la intensidad de la luz que nos llegue, podemos abrirle o cerrarle a voluntad, por ejemplo, al paso de nubes difusas.



Vemos como el diafragma limita el paso de luz



MECANISMO DE SEGUIMIENTO

El celóstato va equipado con un doble motor con el fin de realizar un seguimiento óptimo del Sol, es decir, para compensar el movimiento de rotación de la Tierra.

A través de un sistema de ruedas dentadas podemos conseguir que los motores hagan girar el eje principal del espejo primario. El mecanismo sería el siguiente: cada motor mueve una rueda (integrada en la estructura general del doble motor), que a su vez ataca a la correspondiente del bisinfín del celóstato; el bisinfín se encuentra unido a otra rueda que mueve una más grande; esta última se encuentra en posición perpendicular al eje principal y, ajustando el tornillo correspondiente, logrará mover dicho eje:





Para conseguir que el doble motor atacara adecuadamente al bisinfín, nos vimos obligados a aflojar uno de los pequeños tornillos que formaban parte de la estructura del celóstato, ya que impedía que las ruedas encajaran. La consecuencia de manipular este tornillo ha sido imperceptible, ya que son numerosos los que unen las distintas piezas del celóstato.

Con lo que respecta al sistema de doble motor propiamente dicho, se realizaron ciertas modificaciones con respecto al original: se volvió a bobinar (en años anteriores), se añadió un cable para conectarlo directamente a la red de 220 V y un interruptor que permitía activar uno o dos de los motores:



Las primeras pruebas con los motores nos dieron una desagradable sorpresa: hacían girar el espejo primario en sentido contrario del que debería. Tras revisar todo el sistema de relojería, deducimos que el problema se centraba en el doble motor en sí mismo. Se hicieron distintas variaciones en su estructura, hasta que se decidió cambiar un



motor por el otro sin modificar la estructura que los soporta (el resto de combinaciones provocaba la parada de motores al pasar cierto tiempo). La razón del incorrecto funcionamiento inicial pudo ser debido a un erróneo bobinado o montaje.

Como hemos comentado, se puede activar uno o los dos motores simultáneamente. Comprobamos que el seguimiento se realizaba satisfactoriamente al activar ambos, por lo que, en primer lugar, hemos de mover manualmente el espejo primario hasta colocarlo en la posición deseada, después apretar el tornillo que liga su eje principal con el sistema de relojería y poner en marcha los dos motores. El modo de un solo motor se puede utilizar para un ajuste más fino, pero, como gira en el mismo sentido que el seguimiento, es poco práctico.

A lo hora de manipular los motores, tuvimos que extremar la precaución para no tocar las conexiones, ya que la corriente podría pasar a nuestro cuerpo. Una vez que comprobamos que funcionaba adecuadamente, decidimos forrar los empalmes con cinta aislante. Además se diseñó una cubierta que envolviera el doble motor y permitiera el uso del interruptor. Todo el sistema de ruedas va cubierto por un armazón, que sólo se abrirá para realizar los movimientos manuales del espejo. De esta forma, todo el sistema de relojería se encuentra protegido del exterior.



Carcasas una vez colocadas en el celóstato

TIEMPOS DE OBSERVACIÓN



MOVIMIENTO DEL SOL

En primer lugar, vamos a reconstruir el movimiento del Sol en el cielo representado por las coordenadas horizontales altura a y azimut A para distintas épocas del año, que vendrán fijadas por la longitud eclíptica λ .

Para ello, utilizaremos las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin \varepsilon \sin \lambda \\ \sin \delta &= \sin f \sin a - \cos f \cos a \cos A \end{aligned} \quad [1]$$

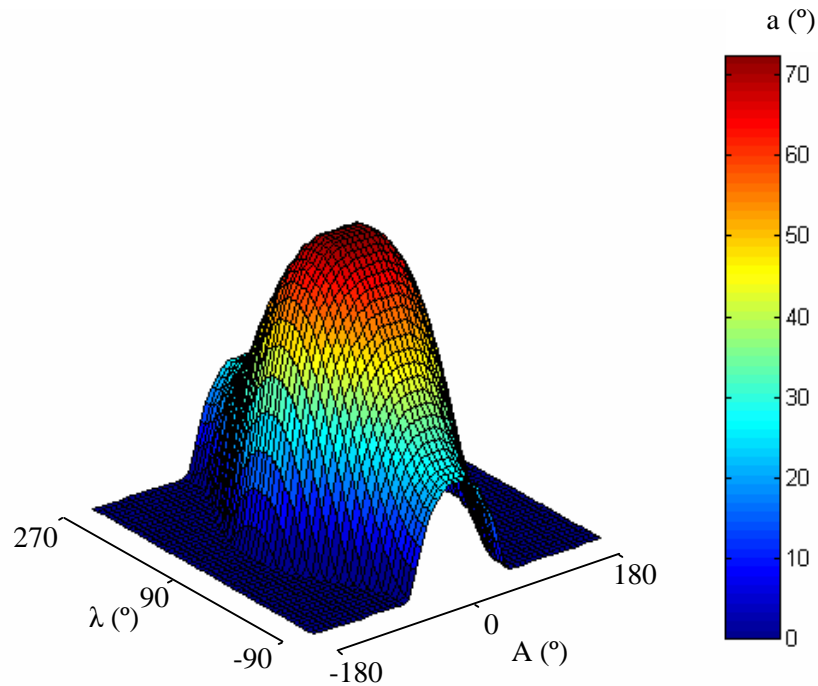
Con la primera ecuación determinaremos la declinación δ . Y a través de la segunda hallaremos la altura en función del azimut usando un programa de cálculo numérico¹.

Por otro lado, recordemos que la posición del observador viene determinado por su longitud L y latitud f . Para Madrid, éstas son aproximadamente:

$$\begin{aligned} L_w &= 3^\circ 43' \\ f &= 40^\circ 25' \end{aligned}$$

Representemos de forma tridimensional el recorrido del Sol, utilizando el programa *alt3d*:

¹ Todos los programas han sido desarrollados en *Matlab* y se muestran al final de cada apartado.



Nótese que sólo se representa la altura del Sol cuando ha sobrepasado el horizonte, es decir, que se ha tomado las alturas negativas como nulas.

Como era de esperar, en invierno el Sol tiene menos altura y es visible durante menos tiempo que en verano, y las culminaciones en cada día se producen al mediodía.

Este análisis también nos puede ayudar a tener una idea aproximada de la altura a la que debemos colocar el espejo secundario, que será aproximadamente la del Sol cuando tenga azimut 20° , es decir, que el secundario debe estar a la altura angular del Sol, sin llegar a eclipsarlo.



```
function [a]=alt(fi,l,A,error)
%Calcula la altura en función de
la latitud, longitud eclíptica y
azimut.
%Cuando la altura sea negativa
(Sol por debajo de horizonte)
devuelve 0.
%Se han de introducir los ángulos
en radianes.

e=(23+27/60)*pi/180;
d=asin(sin(e)*sin(l));

arriba=pi/2-abs(d-fi);
abajo=0;
a=arriba/2;
ant=0;
while abs(ant-a)>error*a
    t1=sin(fi)*sin(a)-sin(d);
    t2=cos(fi)*cos(a)*cos(A);
    ant=a;
    if t1>t2
        arriba=a;
        a=(a-abajo)/2+abajo;
    end
    if t1<t2
        abajo=a;
        a=(arriba-a)/2+a;
    end
end

if pi<l & l<2*pi & pi/2<A &
A<3*pi/2
    a=-a;
end
```

```
function
[a]=alt3d(fi,error,puntos)
%Representa la altura del Sol en
función de la longitud eclíptica
y el azimut
%Se han de introducir los ángulos
en radianes.

p=sqrt(puntos);
i=0;
for l=-pi/2:4*pi/p:pi/2
    i=i+1;
    j=0;
    for A=-pi:4*pi/p:0
        j=j+1;
        a(i,j)=alt(fi,l,A,error);
    end
end

k=j;
for m=1:j
    b(:,m)=a(:,k);
    k=k-1;
end
a=[a b];

k=i;
for n=1:j
    c(n,:)=a(k,:);
    k=k-1;
end
a=[a;c];

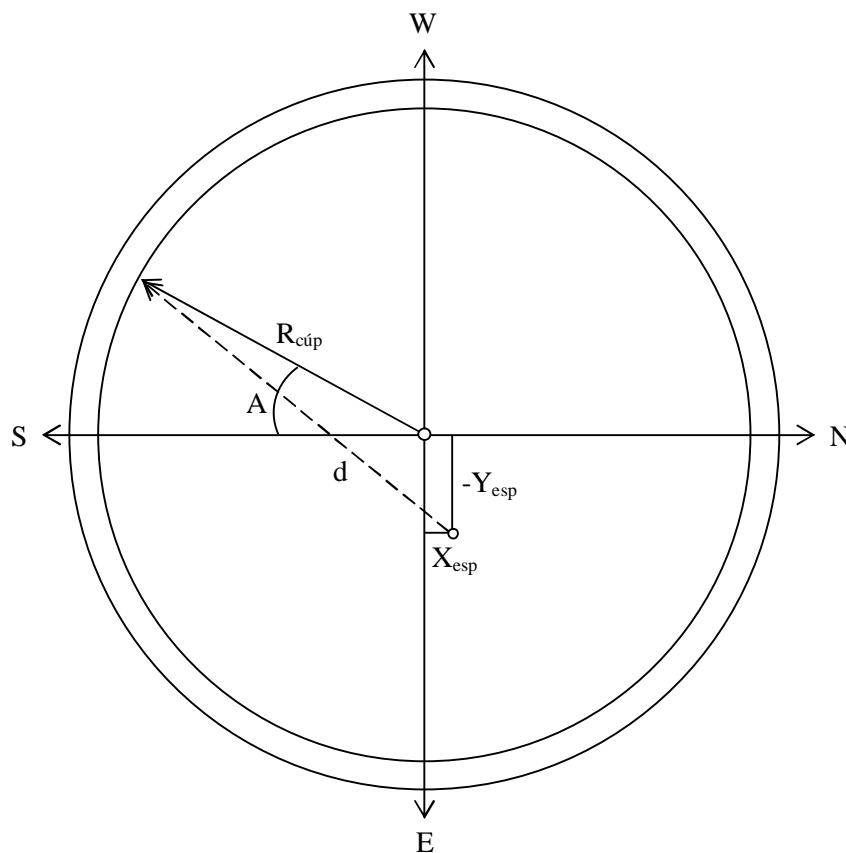
a=a.*180/pi;
surf(a);
colorbar;
axis off;
```



SOMBRA DE LA CÚPULA

La pared de la cúpula presenta cierta altura, por lo que limitará la llegada de luz al espejo primario, que es el primero en recogerla.

La altura angular de esta pared a_{par} va a depender de la posición del espejo primario respecto al centro de la cúpula (X_{esp} , Y_{esp} , Z_{esp}), del radio de dicha cúpula $R_{cúp}$ y de la altura de la pared h . Veamos un esquema:



Tomando el eje X positivo hacia el norte y el Y hacia el oeste, tenemos que:

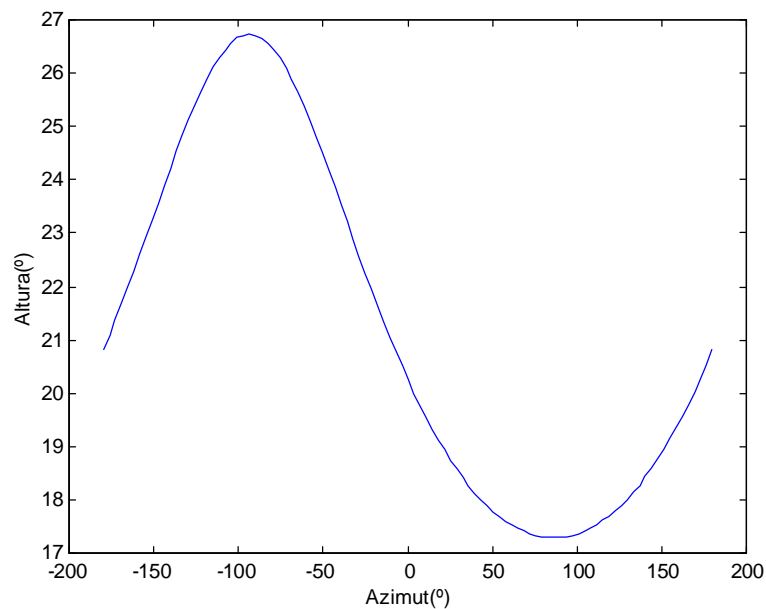


$$a_{par} = \arctan\left(\frac{h - Z_{esp}}{d}\right)$$

$$x = -R_{cúp} \cos A - X_{esp} \quad y = R_{cúp} \sin A - Y_{esp}$$
$$d = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$R_{cúp} = 195\text{cm} \quad h = 221\text{cm}$$
$$X_{esp} = 3\text{cm} \quad Y_{esp} = -46\text{cm} \quad Z_{esp} = 146\text{cm}$$

Así, obtenemos la altura de la sombra únicamente en función del azimut (no depende de la época del año), lo cual podemos ver usando el programa *altpar3d*:





```
function [a]=altpar(xesp,yesp,zesp,Rcup,h,A)
%Devuelve el ángulo visto desde el espejo primario de la pared de la
cúpula.
% xesp,yesp,zesp son las coordenadas del centro del espejo primario
tomando como origen el centro de la cúpula.
% Rcup es el radio de la cúpula, h la altura de la pared, y A el azimut.

x=-cos(A)*Rcup-xesp;
y=sin(A)*Rcup-yesp;
d=sqrt(y^2+x^2);

a=atan((h-zesp)/d);
```

```
function [a]=altpar3d(xesp,yesp,zesp,Rcup,h,puntos)
%Muestra la altura angular que forma la pared vista desde el centro del
espejo primario en función del azimut.
% xesp,yesp,zesp son las coordenadas del centro del espejo primario
tomando como origen el centro de la cúpula.
% Rcup es el radio de la cúpula, h la altura de la pared.

A=[-pi:2*pi/puntos:pi];
i=0;
for A2=A
    i=i+1;
    a(i)=altpar(xesp,yesp,zesp,Rcup,h,A2);
end

close all;
plot(A*180/pi,a*180/pi);
xlabel('Azimut(°)');
ylabel('Altura(°)');
```



SOL Y SOMBRA

En los dos apartados anteriores hemos calculado la altura angular del Sol y de la pared de la cúpula. Los puntos en las que ambas coincidan (dos veces al día) será el momento en el que la luz solar comenzará a incidir sobre el espejo primario o cuando dejará de hacerlo, y por tanto, nos darán el intervalo temporal en el que podremos utilizar el celóstato.

Hasta ahora hemos hallado las alturas en función del azimut, pero lo que realmente nos interesa es utilizar como variable el tiempo. Para transformar azimut en tiempo², debemos tener en cuenta las siguientes relaciones:

$$\Delta TM = t \cdot \Delta TS$$
$$TS = h + a \quad t \approx \frac{365.25}{366.25}$$

$$\cos \delta \cos h = \cos f \sin a + \sin f \cos a \cos A \quad [2]$$

Con [2] deduciremos el ángulo horario h , hallando la declinación y la altura con las ecuaciones [1] ya vistas.

Como necesitamos tomar intervalos de tiempos, supondremos que, en la culminación, el ángulo horario y el tiempo medio son nulos. Por tanto, la ascensión recta α no intervendrá, obteniendo:

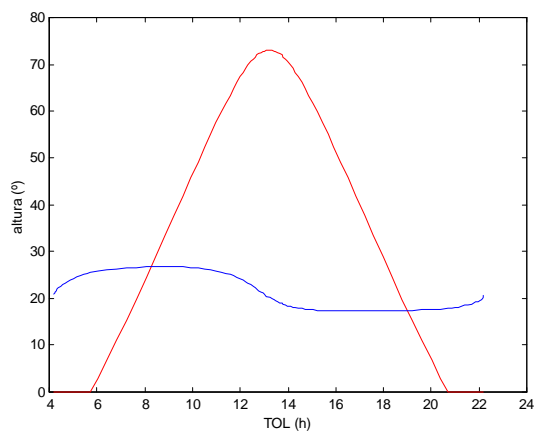
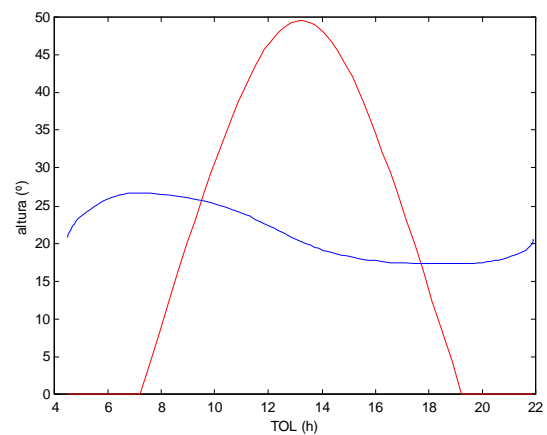
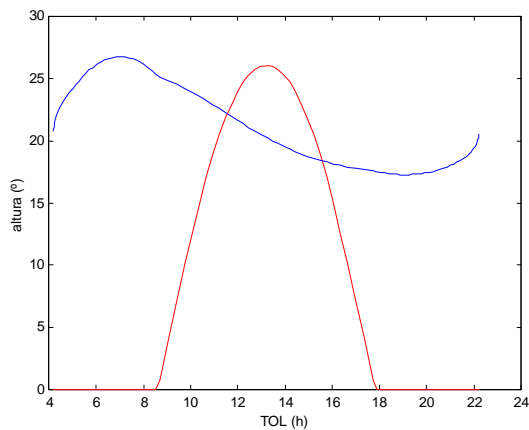
² Estos cálculos se realizan a través del programa *hora*.



$$TCG = t \cdot h + 12^h$$
$$TOL = t \cdot h + 12^h + L_w + 1^h (+1^h)$$

Hemos pasado de tiempo medio a tiempo civil en Greenwich añadiendo 12^h . Para transformarlo en oficial local se le ha añadido otra hora (dos en horario de verano) debido al sistema horario español; también se le ha sumado la longitud oeste de Madrid, ya que todos los sucesos ocurrirán con ese retraso respecto al meridiano de Greenwich.

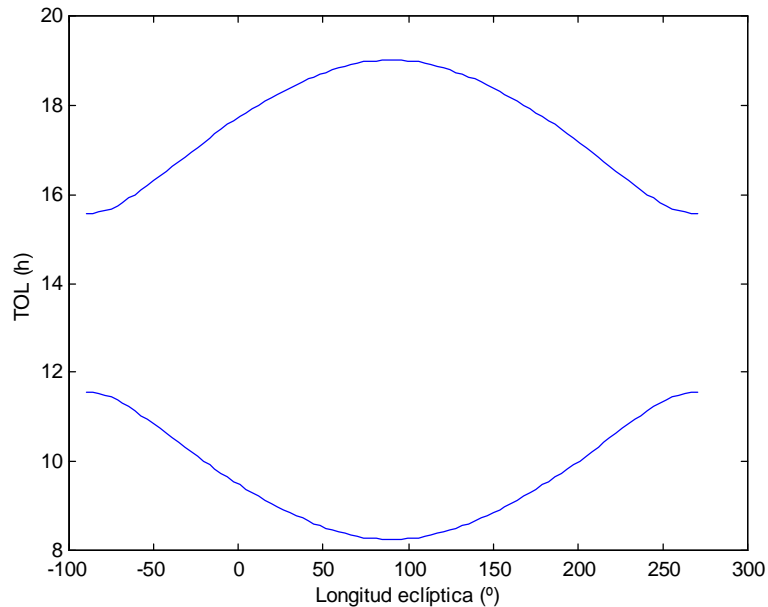
Veamos, ya en función del tiempo, el recorrido del Sol y de la sombra de la cúpula en invierno, primavera (equivalente a otoño) y verano, utilizando el programa *alturas*:



Se muestra en rojo el recorrido del Sol y en azul el de la sombra de la cúpula. Las representaciones corresponden a longitudes eclípticas de -90° , 0° ó 180° , y 90° , de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. La luz llegará al espejo cuando la altura del Sol sea mayor que la de la sombra de la pared.



Ya, por fin, podemos hallar el período temporal durante el cual podremos utilizar el celóstato. Utilizando el programa *inters2d*, obtenemos el siguiente gráfico:



Nótese que en todas las gráficas que representan tiempos se ha de añadir una hora más en horario de verano.

Como podemos observar, el celóstato está diseñado para ser utilizado durante la tarde, evitando, si es posible, la época invernal. Esto lo pudimos comprobar realizando un par de pruebas en diciembre, donde advertimos que el tiempo de observación era muy reducido. En esta época el espejo secundario se puede colocar a una mayor altura angular que el Sol, siempre teniendo en cuenta que éste puede quedar ligeramente ocultado tras las dos barras que sostienen dicho espejo.



```
function [TCL]=hora(fi,Lw,l,A,error)
%Calcula el Tiempo Civil en función de la posición del observador,
longitud eclíptica y azimut.
%En el horario de verano habría que añadir una hora más al Tiempo Civil
resultante.
%Se han de introducir los ángulos en radianes.

L=-Lw-1*pi/12;
a=alt(fi,l,A,error);
e=(23+27/60)*pi/180;
d=asin(sin(e)*sin(l));

h=acos((cos(fi)*sin(a)+sin(fi)*cos(a)*cos(A))/cos(d));
h=real(h); %El cosh puede ser muy ligeramente >1 ó <-1 debido al uso del
cálculo numérico
if A>pi | A<0 h=2*pi-h; end

TCLcul=pi-L;
tau=365.25/366.25;
TCL=tau*h+TCLcul;
TCL=TCL*12/pi; if TCL>24 TCL=TCL-24; end
```

```
function alturas(fi,Lw,l,xesp,yesp,zesp,Rcup,h,error,puntos)
%Representa gráficamente las alturas angulares de la pared de la cúpula
y el Sol a lo largo del día para una longitud eclíptica determinada.
%Se han de introducir los ángulos en radianes.

i=0;
for A=-pi:2*pi/puntos:pi-1e-10
    i=i+1;
    t1(i)=alt(fi,l,A,error)*180/pi;
    t2(i)=altpar(xesp,yesp,zesp,Rcup,h,A)*180/pi;
    x(i)=hora(fi,Lw,l,A,error);
end

plot(x,t1,'r'); hold on;
plot(x,t2,'b'); hold off;
xlabel('TOL (h)'); ylabel('altura (°)');
grid on;
```



```
function [Asal]=inters(fi,l,xesp,yesp,zesp,Rcup,h,error)
%Calcula el azimut para el que comienza y para el que deja de llegar la
luz solar al celóstato.
%Se han de introducir los ángulos en radianes.

for i=1:2
    s=i-1; v=s;
    r=2-i; w=r;

    e=(23+27/60)*pi/180;
    d=asin(sin(e)*sin(l));
    A(i)=(-1)^s*abs(acos(sin(d)/cos(fi)));

    t1=1e10; t2=-1e10;
    arriba=t1; abajo=t2;
    while abs(t1-t2)>error*(t1+t2)/2
        Asal=A;
        t1=alt(fi,l,A(i),error);
        t2=altpar(xesp,yesp,zesp,Rcup,h,A(i));
        if (t1>t2 & i==1) | (t2>t1 & i==2)
            s=1; abajo=A(i);
            if r==1
                if arriba==1e10 arriba=abs(acos((sin(d)-
sin(fi)*sin(t1))/(cos(fi)*cos(t1)))); end
                A(i)=(arriba-A(i))/2+A(i);
            else A(i)=A(i)+pi/18; end
        end
        if (t2>t1 & i==1) | (t2<t1 & i==2)
            r=1; arriba=A(i);
            if s==1
                if abajo==-1e10 abajo=-abs(acos((sin(d)-
sin(fi)*sin(t1))/(cos(fi)*cos(t1)))); end
                A(i)=(A(i)-abajo)/2+abajo;
            else A(i)=A(i)-pi/18; end
        end
    end
end
end
```



```
function inters2d(fi,Lw,xesp,yesp,zesp,Rcup,h,error,puntos)
%Representa gráficamente el intervalo temporal en el que la luz solar
llega al celóstato para cada longitud eclíptica.
%Se han de introducir los ángulos en radianes.

l0=linspace(-pi/2,pi/2,puntos/2);
j=0;
for l=l0
    j=j+1;
    A(j,:)=inters(fi,l,xesp,yesp,zesp,Rcup,h,error);
    for m=1:2
        A(j,m)=hora(fi,Lw,l,A(j,m),error);
    end
end

k=j;
for i=1:j
    B(i,:)=A(k,:);
    k=k-1;
end
A=[A;B];
l=linspace(-pi/2,3*pi/2,puntos)*180/pi;

plot(l,A(:,1)); hold on;
plot(l,A(:,2)); hold off;
xlabel('Longitud eclíptica (°)'); ylabel('TOL (h)');
grid on;
```


PRUEBAS

FINALES



VISUALIZACIÓN

Utilizando el telescopio, del que ya hemos hablado anteriormente, vamos a observar el Sol de tres formas distintas: a ojo desnudo, con cámara y proyectándolo. Para los dos primeros, como ya comentamos, usaremos un filtro doble Mylar y para el tercero un diafragma.

- CÁMARA -

En primer lugar, se sitúa un adaptador (ocular de 30 mm, especial para colocar la cámara). Para enfocar la imagen no se manipula el tubo del ocular del telescopio, sino que se emplea el enfoque manual de la cámara; este proceso es bastante delicado ya que un pequeño movimiento en algún elemento del celóstato impide el correcto enfoque.



Adaptador utilizado para la captura con cámara



En las imágenes tomadas siguiendo este proceso, se puede observar claramente el oscurecimiento hacia el borde y grupos de manchas:



- PROYECCIÓN -

Éste es el sistema más espectacular que permite el celóstato. El proceso es bastante sencillo: se coloca un ocular y se comienza a enfocar variando manualmente la longitud del tubo del ocular, para concluir con un enfoque más fino girando la rueda de dicho tubo.

En la proyección se aprecia claramente las manchas solares (distinguiéndose la umbra y la penumbra) el oscurecimiento hacia el borde, la granulación y las fáculas⁴.

⁴ En las fotografías que se mostrarán de las proyecciones a penas se pueden ver estos detalles.



Proyección del Sol en la pared de la sala de análisis

Se han utilizado tres oculares distintos, que resumimos en la siguiente tabla:

<i>Focal</i>	<i>Diámetro de imagen</i>	<i>Resolución</i>
Aprox. 10 mm	Muy grande (128 cm)	Deficiente
30 mm	Media-grande (90 cm)	Buena
40 mm	Media (64 cm)	Muy buena



Oculares utilizados con el telescopio. De arriba hacia abajo: 30, 40 y 10 mm de focal.



Nótese que los diámetros de las imágenes se corresponden a la proyección en la pared de la sala de análisis. El primer ocular mostrado en la tabla es el propio del telescopio y el segundo pertenece habitualmente al telescopio Celestron de la cúpula.

A la vista de los resultados, es aconsejable utilizar el de 40 mm de focal, ya que la resolución que ofrece es excelente (también para ojo desnudo). También se puede usar el del Celestron, ya que apenas hay diferencia con el anterior, aunque normalmente no es accesible.

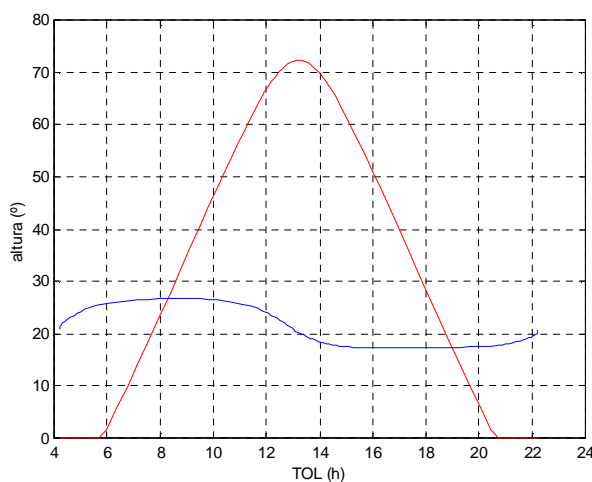
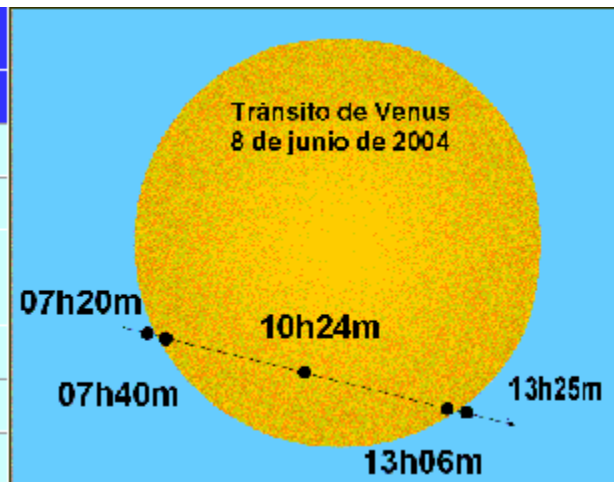
En el siguiente apartado mostraremos imágenes de la proyección, utilizando los tres oculares.



TRÁNSITO DE VENUS

El tránsito de Venus ha sido, sin lugar a dudas, la prueba de fuego para el celóstato. Este tránsito tuvo lugar el ocho de junio de 2004, y sus efemérides⁵ y el estudio de tiempos de observación para el celóstato fueron las siguientes:

Efemérides para Madrid			
Contactos	UT (horas)	D	Altura
Primer contacto	05 20 27	1.6° 0	5° 4
Primer contacto	05 44 10	1.9° 4	8° 0
Mirada del centro de los centros	06 20 46		39° 0
Segundo contacto	11 05 30	2.3° 0	57° 5
Segundo contacto	11 24 47	2.6° 0	59° 0



Vemos que los dos primeros contactos tuvieron lugar a una hora en la que no se pudo observar por medio del celóstato, ya que la sombra de la pared de la cúpula lo impedía. De este modo, hasta después de las nueve de la mañana (hora local) fue imposible comenzar la proyección. Por tanto, esta observación duró unas cuatro horas.

⁵ Toda la información sobre el tránsito de Venus se puede consultar en página web del departamento.

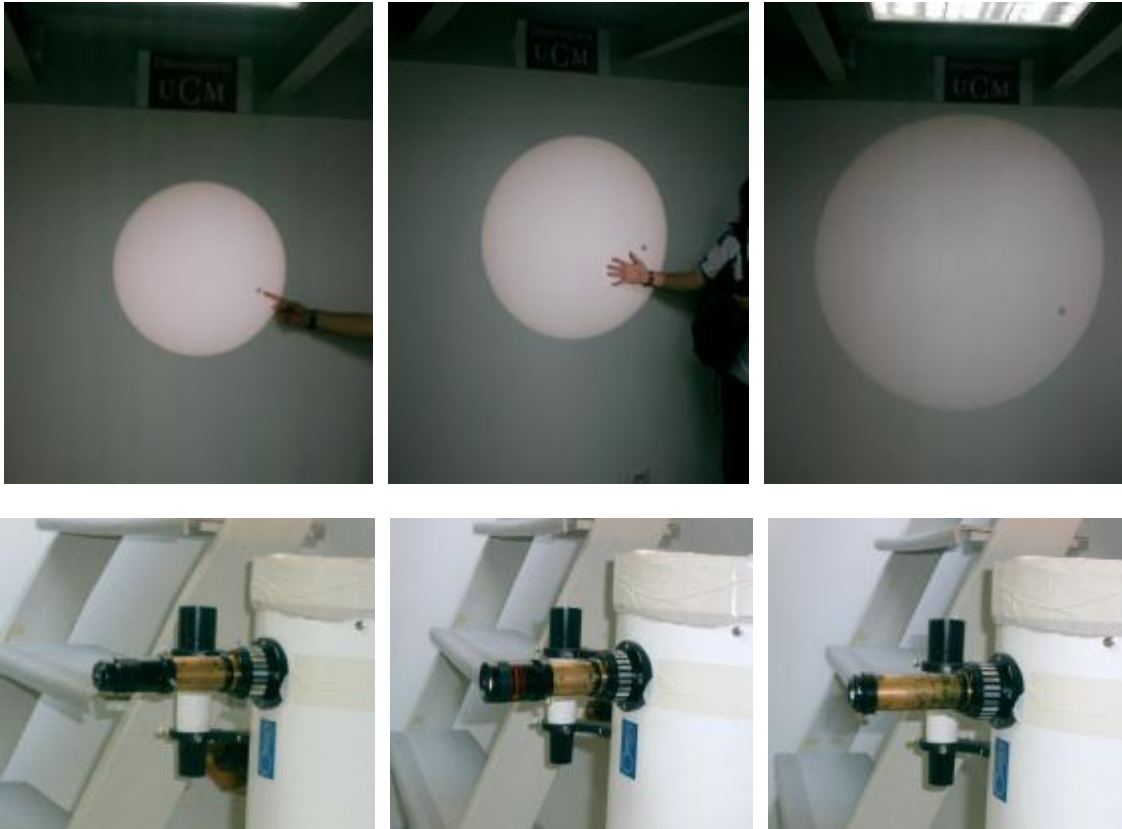


El celóstato fue una pieza clave para la observación del tránsito de Venus, ya que fue un evento abierto al público y la temperatura exterior era bastante elevada, por lo que la proyección en la sala de análisis fue uno de los mejores métodos para contemplarlo.



Imágenes ambiente. Arriba, puerta principal de la facultad (izquierda) y terraza (derecha); abajo, sala de análisis (izquierda) y equipo encargado del seguimiento del tránsito (derecha).

Atendiendo a la proyección obtenida con distintos oculares, se puede observar las diferencias de resolución y tamaño, como ya comentamos en el apartado anterior:



Proyección usando diferentes oculares. De izquierda a derecha, oculares con focales de 40, 30 y 10 mm.

Al acabar el tránsito (tercer y cuarto contacto) se puede apreciar incluso el *efecto gota*:





Durante toda la observación se comprobó que el celóstato presentaba una estabilidad satisfactoria. Sin embargo, aparecieron unos pequeños problemas, que son sujetos de mejora:

- Los motores se calentaban bastante, debido a un funcionamiento tan largo y a la alta temperatura ambiental.
- En ciertas ocasiones el espejo secundario se giraba ligeramente de su posición original, como consecuencia del insuficiente rozamiento del tornillo que lo debía sujetar.
- La imagen proyectada oscilaba cuando existía mucho movimiento en la cúpula (principalmente personas subiendo y bajando).
- Alto calentamiento de los oculares, lo que obligó a ir cambiándolos cada cierto tiempo.



Celóstato durante el tránsito de Venus

CONCLUSIONES



FUTURO

Como hemos visto, el celóstato presenta la estabilidad adecuada para ya ser utilizado de forma regular en observaciones. Sin embargo, puede ser perfeccionado teniendo en cuenta ciertos aspectos:

- Cambiar los motores por otros más modernos, que se calienten menos y permitan mayor libertad de movimiento (en ambos sentidos y a distintas velocidades).

- Conseguir un mayor rozamiento en los tornillos de agarre para que los espejos no se desplacen de las posiciones deseadas.

- Utilización de un diafragma variable más sofisticado para la proyección. Lo ideal sería que pudiera oscurecer su superficie en función de la luz que llegara.

- Situar una pantalla para poder contemplar aún mejor las proyecciones.

También se baraja la opción de continuar, en un futuro, con la construcción de un espectroheliógrafo que permita analizar la imagen del Sol en banda estrecha y un sistema de observación solar en banda ancha a gran tamaño. Además ya se pueden comenzar pruebas con el espectrógrafo solar *FOCUSS* unido al celóstato.



AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido el fruto de tres años de trabajo y la participación de muchos colaboradores. Personalmente, me gustaría recordar la labor de varias personas.

En primer lugar, mi agradecimiento se dirige a Jaime Zamorano y Antonio Verdet. El primero por su implicación y por dotarme de una gran libertad de actuación; y el segundo por su trabajo diario y estrecha colaboración, además de ser el intermediario con otros departamentos. Me gustaría dar las gracias a David Montes por su ayuda con las pruebas iniciales de detección.

También querría extender mi agradecimiento a los responsables de delineación, electrónica y a los miembros de los talleres del Centro de Ayuda a la Investigación, los cuales diseñaron, repararon y construyeron algunos de los elementos más importantes del celóstato.

Por último, me gustaría recordar el importantísimo trabajo que realizaron mis antecesores: Miguel Santander (2001-2002) y Víctor Villar y Tanio Díaz (2002-2003).

BIBLIOGRAFÍA

Debido al carácter de este proyecto, prácticamente sólo ha sido necesario consultar la memoria correspondiente al Trabajo Académicamente Dirigido de Miguel Santander *El celóstato de la UCM* (2001-2002).

Para la introducción se han visitado las siguientes direcciones de Internet:

<http://www.nso.edu>

<http://astro.uchicago.edu/yerkes/virtualmuseum/Heliostat.html>

<http://www.bibliotheque.polytechnique.fr/patrimoine/instruments/optique/Optique.html>

<http://web.grinnell.edu/physics/PMuseum/Heliostat.html>

Por último, mencionar la página correspondiente al celóstato de la UCM:

<http://www.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/CELOSTATO>