

EL CELOSTATO DE LA U.C.M.

Miguel Santander García
5º de Físicas, Universidad Complutense de Madrid

Trabajo académicamente dirigido por
Profesor Jaime Zamorano Calvo
*Departamento de Astrofísica y CC. de la Atmósfera
de la Universidad Complutense de Madrid*

Curso 2001-2002



*Una boca que alaba desde el abismo
la justicia del firmamento*

Antología Poética
JORGE LUIS BORGES

Índice

1. Introducción	4
2. Restauración y Replanteamiento	8
3. Configuraciones	27
3.1.1 Altura del Primario	29
3.1.2. Giro en declinación del primario y su sombra	30
3.1.3. Trayectoria del Sol y posición del secundario	31
3.1.4. Altura mínima del secundario y desviación respecto al primario	33
3.2.1. Configuración 1	35
3.2.2. Configuración 2	37
3.2.3. Configuración 3	38
3.2.4. Configuración 4	41
3.3. Comentarios a las configuraciones	43
4. Diseños	44
4.1. Discusión sobre movilidad del primario	44
4.2.1. Diseños Preliminares	46
3.2.2. Diseños Finales	63
5. Conclusiones	72
6. Bibliografía	73
7. Agradecimientos	73

1. Introducción

En el s. XIX, cuando no existían fuentes de luz artificial intensas como lámparas eléctricas o arcos voltaicos, era muy común usar la luz solar en los experimentos de óptica. La forma más simple de obtener un haz de luz en un laboratorio consistía en colocar un espejo en el exterior, de modo que la luz reflejada por dicho espejo entrara por la ventana a través de un disco agujereado convenientemente.

Añadiendo un simple sistema de relojería al espejo se puede conseguir que este siga el movimiento aparente del Sol, de modo que la dirección del haz de luz reflejado por el espejo permanece constante durante varias horas. Este aparato constituiría lo que se conoce como un *heliostato*.

Si se añade un segundo espejo, regulable en altura y orientación, se consigue un *celostato*, que sigue al Sol permanentemente, a lo largo, no sólo del día, si no del año, al ir variando su declinación.

Se podría definir, entonces, un celostato, como un dispositivo óptico sincronizado con la rotación de la Tierra, de modo que contrarresta ésta recogiendo un área fija del firmamento, la cual puede ser proyectada a cualquier otro instrumento astronómico para producir una imagen.

Podríamos distinguir dos partes fundamentales en un celostato: primario y secundario. Dicha designación se refiere a los espejos. El espejo primario, y su montaje, por tanto, está destinado a mandar el haz de luz reflejada del Sol en una dirección fija, al menos, a lo largo de un día, que es donde se encuentra el espejo secundario.

El secundario y su montaje tendrían la misión de recoger ese haz y reflejarlo en otra dirección, a lo largo de la cual habría un objetivo de telescopio o el instrumento óptico que se requiera.

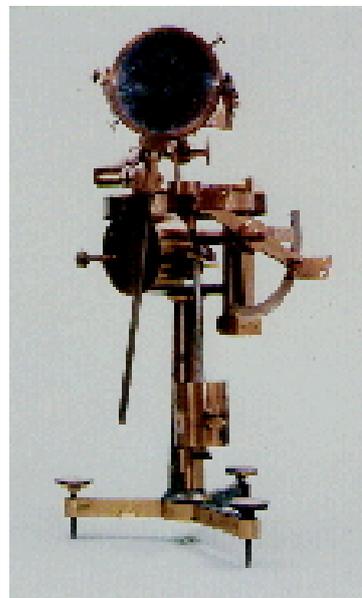


Figura 1. Heliostato ideado y construido por Gambey instalado en el Laboratorio Real de París, en 1841. Su altura total es de 50 cm.

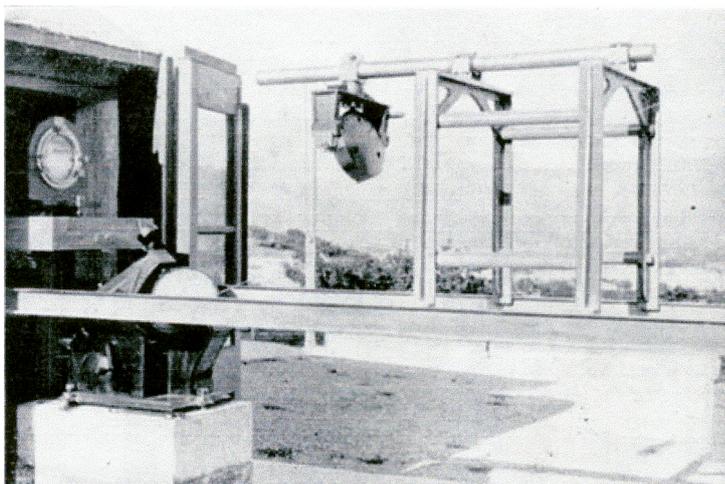


Figura 2. Celostato de la casa Grubb amb Mirall de 200mm, instalado en el Observatorio del Ebro, cerca de Tortosa, en la segunda década del s. XX.

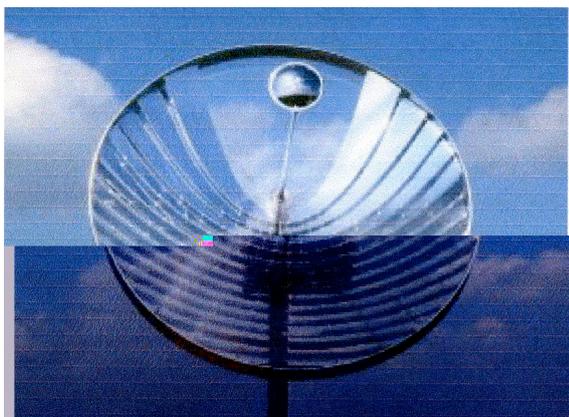


Figura 3. Un ejemplo de heliostato cuyo uso es no astronómico.

Este trabajo trata de la restauración, replanteamiento, rediseño e implantación de un celostato en la cúpula Oeste del Observatorio U.C.M. sito en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid. En su realización se ha invertido una gran cantidad de esfuerzo, así como de tiempo, casi desde el principio del presente curso, hasta el final del mismo.

A su vez, este trabajo forma parte de un proyecto más grande y ambicioso, consistente en la instalación de un espectroheliógrafo solar en la sala de control de la cúpula (debajo de la cúpula), dotado con diversa y sofisticada instrumentación. Resulta lógico pensar que dicho aparato, dado su gran volumen y masa, deba estar en la sala de control y no en la cúpula, evitando además luz difusa. El propósito, por tanto, del trabajo del celostato, consiste en llevar la luz del Sol en forma de un haz de luz igual o mayor al objetivo del espectroheliógrafo (unos 15 cm) hacia el piso de abajo de la cúpula a través de un orificio.

Podría pensarse, en principio, que la existencia del secundario es supérflua, pero un análisis más cuidadoso de la situación arroja que de cara al seguimiento del Sol, al variar a lo largo del año su declinación, variará también la dirección del haz reflejado por el espejo primario. por tanto, el único remedio es añadir este segundo espejo, regulable (en altura, por ejemplo), de modo que podamos, efectivamente, mandar la luz al mismo sitio durante todo el año.

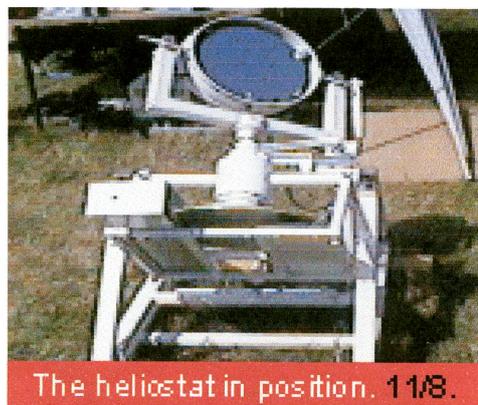


Figura 4. Ejemplo de heliostato similar al primario del celostato de la U.C.M.

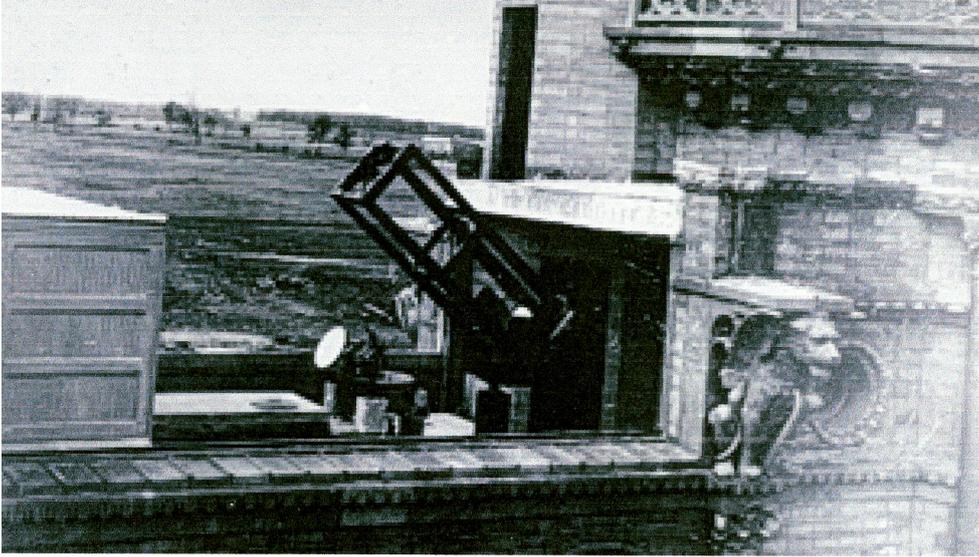


Figura 5. Heliostato del Observatorio de Yerkes, Universidad de Chicago. Se podía usar como celostato añadiendo un espejo secundario en la habitación de recepción de luz.

Una vez restaurado y reinstalado en la cúpula Oeste de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, dicho celostato se usará fundamentalmente para trabajos y prácticas de alumnos. Por ello, en todo el proceso seguido para su consecución se ha puesto siempre dicho objetivo como prioritario. Además, servirá también, como es de suponer, para trabajos de investigación.

Por supuesto, hay que señalar que el uso de dicho instrumento no tiene porque limitarse al seguimiento del Sol, sino que se puede obtener la imagen fija de un trozo de esfera celeste, para estudios nocturnos.

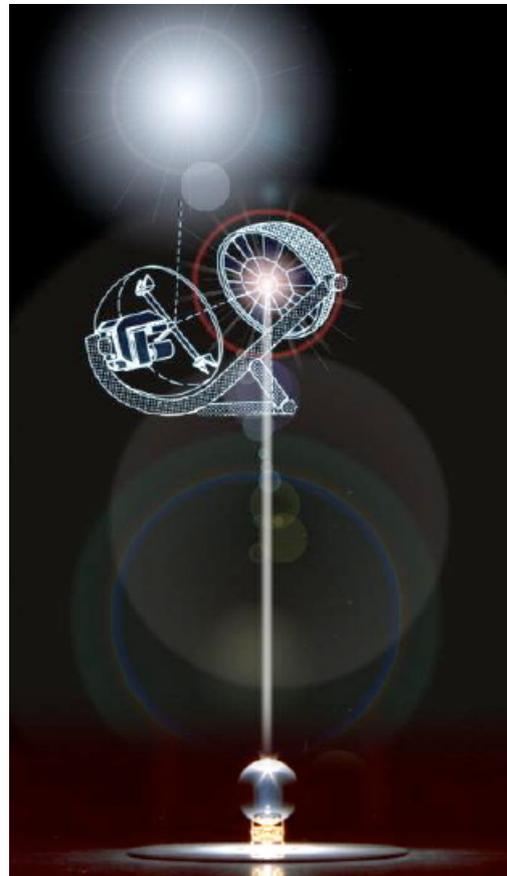


Figura 6. Diseño del celostato cuyo proyecto es denominado Matrimandir instalado en Auroville, India.

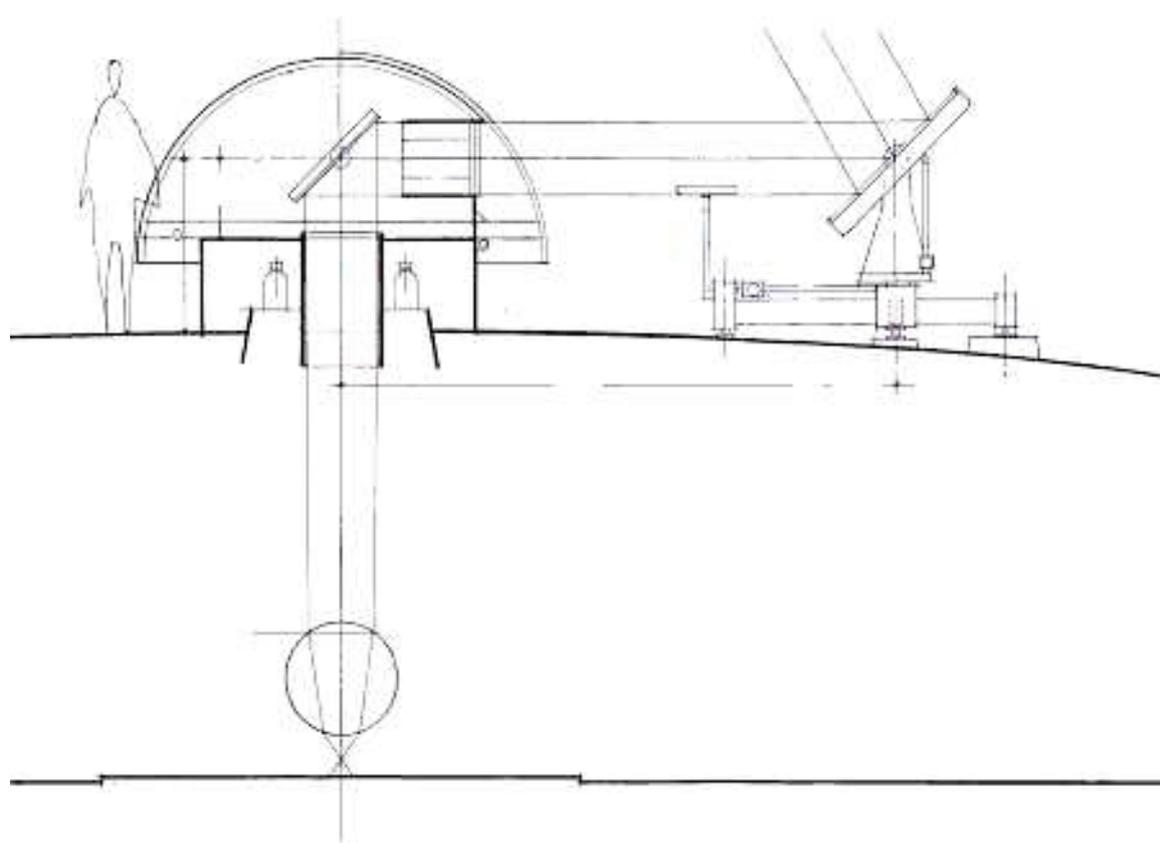


Figura 7. Diagrama de direccionamiento de los rayos luminosos en el celostato Matrimandir en Auroville, India. El individuo esta ahí para apreciar la escala del aparato.

2. Restauración y Replanteamiento

A continuación se presenta el trabajo de restauración, así como de trabajos de replanteamiento previos al diseño, en forma de cuaderno de bitácora.

Lunes 12 de Noviembre 2001



Figura 8. Aspecto que presentaba el celostato el primer día de trabajo. De izquierda a derecha: el autor y Antonio de Ugarte.

La primera tarea que abordamos fue la restauración del celostato. Dicho instrumento tenía un aspecto bastante antiguo y deteriorado por el paso del tiempo. Constaba de dos piezas principales, con sendos espejos, que serán denominadas a partir de ahora como primario, que es la pieza cuyo espejo reorienta la luz hacia el otro espejo, dotada de un motor, y secundario, cuya única función es reorientar de nuevo la luz hacia el punto que se desee (*Figuras 9 y 10*).

Observamos que la tapadera del espejo primario se encontraba en un estado lamentable, lo que hacía que el espejo estuviera muy mal conservado.

Con cuidado desatornillamos las celdas cilíndricas en las cuales van engarzados los espejos, separándolas del primario y secundario. Con objeto de sacar los espejos, desatornillamos los 4 tornillos que ceñían un aro de metal que a su vez aprisionaba el espejo. Por desgracia, dos de los tornillos del primario estaban demasiado oxidados como para

salir, debido a las condiciones a las que probablemente había sido sometida la pieza. Y por si esto no fuera suficiente mal por un día, el espejo secundario se atascó al intentar sacarlo, quedando encajado oblicuamente en la celda que lo contenía.



Figura 9. Diferentes vistas del celostato original. Abajo a la derecha, el autor en el primer día de trabajo.

Martes 13 de Noviembre 2001

Por la mañana tuvimos el cilindro del secundario expuesto al Sol con objeto de que el metal (hierro de fundición) se dilatara lo suficiente como para que el espejo pudiera volver a la posición inicial. Presionando suavemente sobre el borde del espejo (superficie no útil al quedar oculta bajo el aro metálico que aprisiona el espejo en su celda) éste se movía uno o dos milímetros, pero no más. Parece ser que el Sol de otoño no es suficientemente buen dilatador, o bien que se necesita mucho más calor para dilatar un aro de fundición. O, posiblemente, ambas cosas.

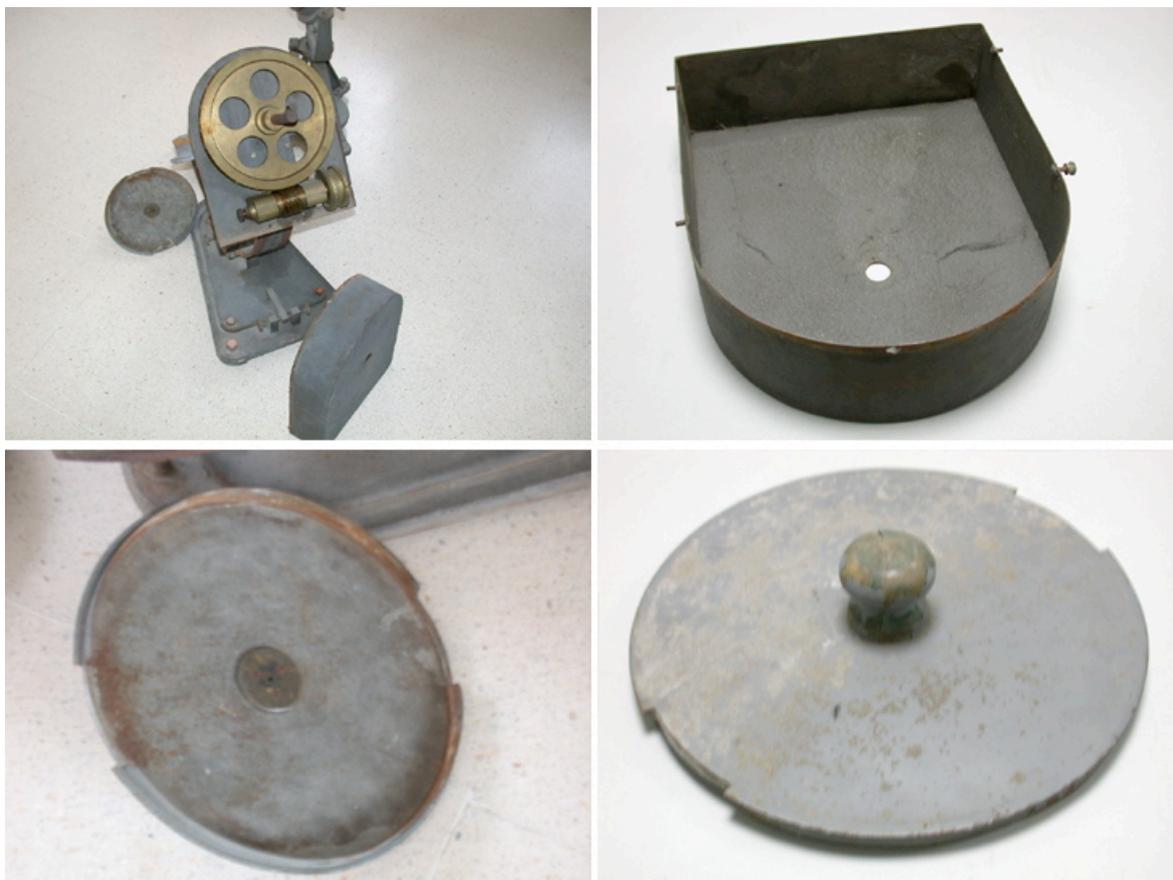


Figura 10. *Arriba Izquierda:* Pieza primaria del celostato original. *Arriba Derecha:* Tapa de la caja de engranajes del primario. *Abajo:* Dos fotografías de la tapa del espejo primario. Por su aspecto destartado y oxidado se comprende el pésimo estado de conservación de dicho espejo.

El siguiente procedimiento empleado consistió en calentar la pared de hierro con un soldador de estaño. No surtió ningún efecto, debido posiblemente a que la masa de hierro era enorme respecto a la fuente de calor.

Intentamos un tercer procedimiento, que por fin dió sus frutos: Con mucho cuidado, engrasamos la pared visible del espejo con aceite lubricante, gracias a lo cual el espejo bajó a su posición original al aplicar una leve presión en su borde.

Una vez en esa posición, sacar el espejo fue fácil usando unos trapos y una sencilla habilidad culinaria. Guardamos el espejo en una caja de cartón, embalándolo con cuidado, quedando preparado para su posterior transporte (*Figura 12 Abajo Derecha*).

Por otro lado empezamos a aplicar refresco de cola (siguiendo oportunas indicaciones del personal del taller mecánico de la Universidad, sito en la Facultad de Ciencias Físicas de la U.C.M.) en los tornillos oxidados cada 5 ó 10 minutos, con el propósito de que su carácter ácido corroyera dicho óxido lo suficiente como para poder desatornillarlos (*Figura 11 Extremo Superior*).



Figura 11. *Extremo Superior:* Aspecto de la celda del espejo primario después de un día de aplicarle refresco de cola a los tornillos. *Arriba Izquierda:* Celda del espejo primario. *Arriba Derecha:* Detalle del sistema de latitud del primario. *Abajo Izquierda:* Aro de hierro de sujeción del espejo secundario en su celda. *Abajo Derecha:* Tapadera del engranaje de altura del secundario.



Figura 12. *Arriba Izquierda:* Celda del espejo secundario. *Arriba Derecha:* Aros de hierro, goma y papel usados como nivelador del espejo secundario en su celda. Se aprecian manchas de lubricante como resultado del método empleado para la extracción del espejo. *Abajo Izquierda:* Tapadera del espejo secundario. Está en mejor estado de conservación que la de su homónimo primario, y es por ello que el espejo también lo está. *Abajo Derecha:* Vista cenital del espejo secundario embalado en una caja para su transporte.

Miércoles 14 de Noviembre 2001

Seguimos aplicando el refresco de cola en los tornillos oxidados.

Limpiamos los montajes con *Terclén*, un disolvente industrial. Con la ayuda de una brocha, dimos dos capas fijándonos en la diferencia entre una pequeña zona en la que no aplicamos el disolvente y el resto.

Intentamos desmontar alguna rueda dentada encargada del giro en ascensión recta del primario, sin éxito.

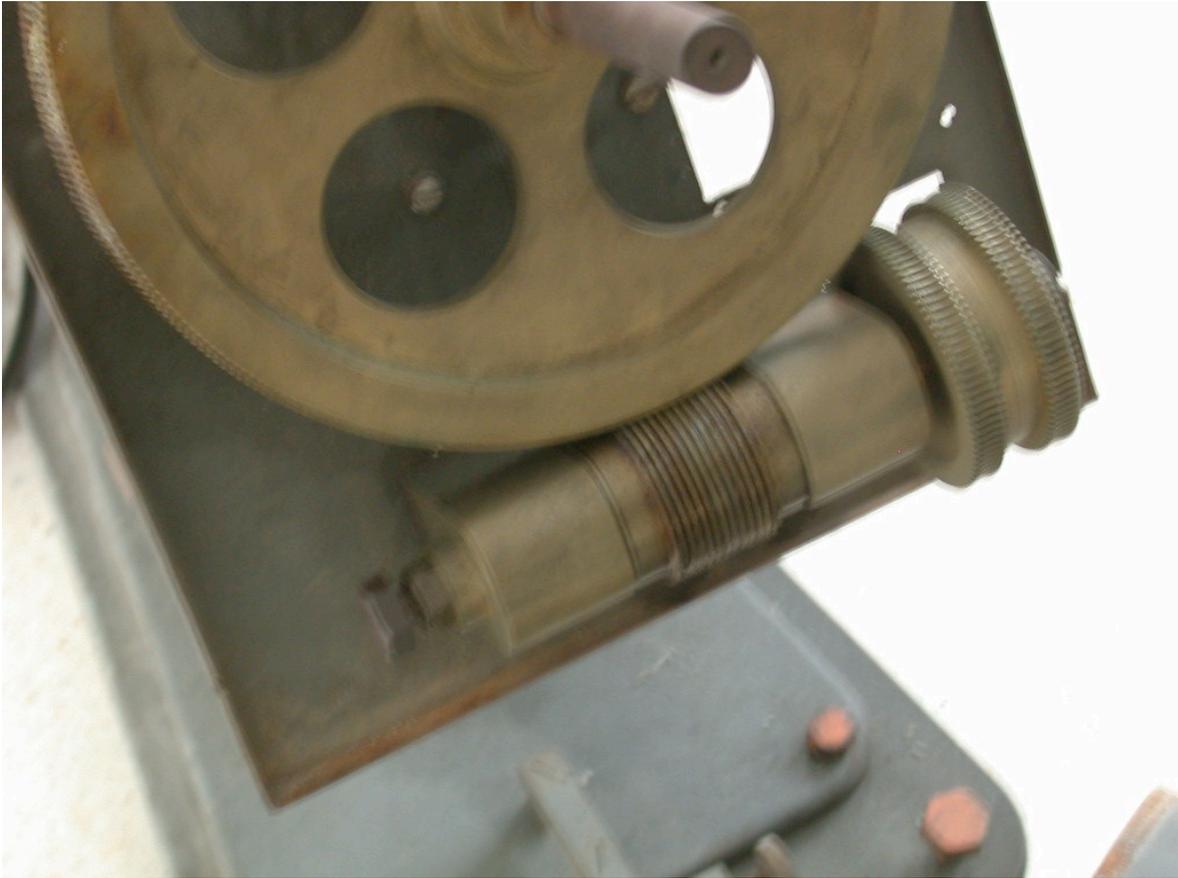


Figura 13. Mecanismo de rotación del espejo primario antes de ser limpiado. Aunque el aspecto de la fotografía es algo borroso, se aprecia el mal estado de los engranajes.

Lunes 19 de Noviembre 2001

Realmente no se aprecia mucha diferencia entre las zonas en las que aplicamos el disolvente y aquellas en las que no lo hicimos. Anotamos probar con alcohol industrial.

Seguimos aplicando cola en los tornillos oxidados.

Las ruedas dentadas tienen restos de grasa reseca entre los dientes. Las limpiamos con cuidado aplicando disolvente mediante la ayuda de un cepillo de dientes. Los dientes quedan bien limpios después de semejante lavado (*Figura 14*).

Intentamos desmontar de nuevo el sistema de giro, de nuevo sin éxito.

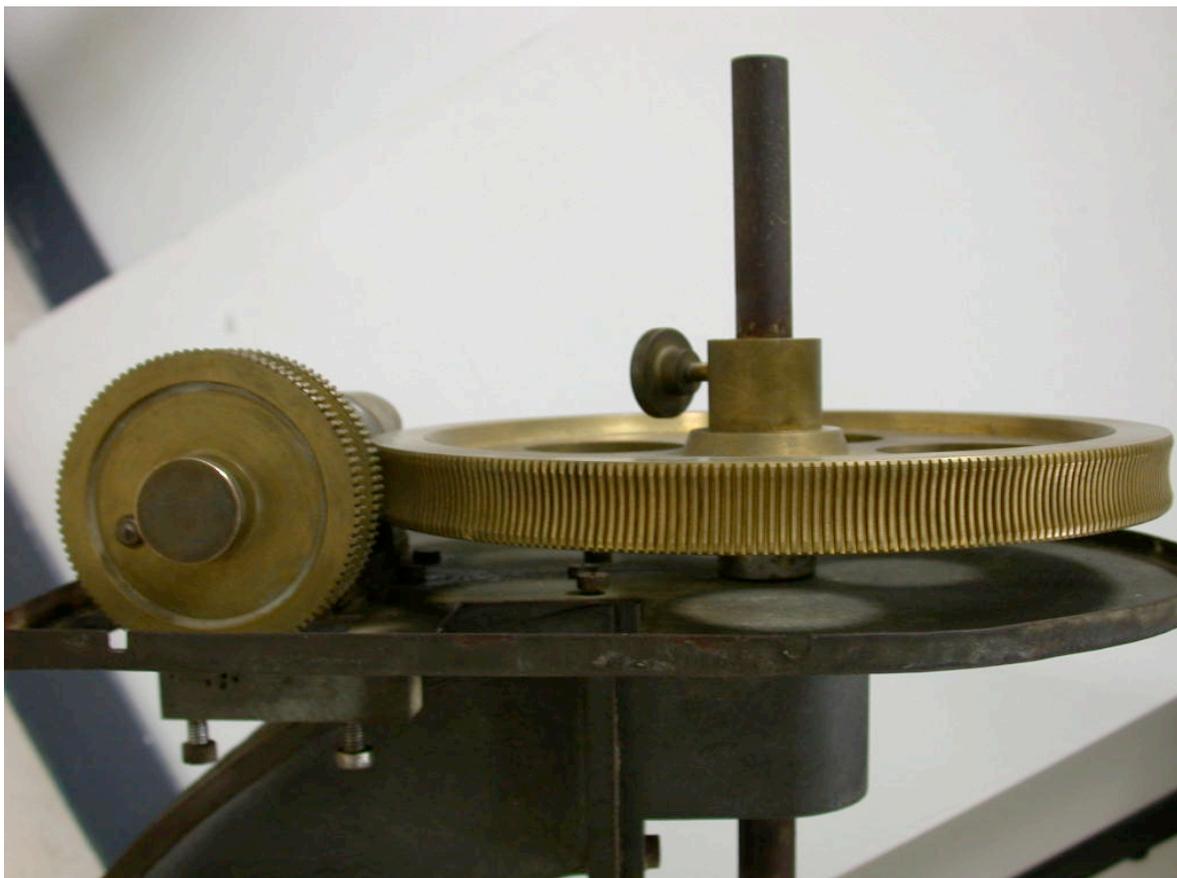


Figura 14. Mecanismo de rotación del primario antes (*Arriba*) y después (*Abajo*) de limpiarlo con disolvente industrial y un cepillo.

Martes 20 de Noviembre 2001

Conseguimos desmontar el tornillo sin fin que comunica el movimiento a la celda del secundario, para moverlo en ascensión recta. Limpiamos dicha pieza con el cepillo, y lo volvimos a instalar.

Seguimos aplicando cola.

Empezamos a tomar medidas de la cúpula para hacer un esbozo del diseño preliminar del aparato.

Finalmente, gracias a los efectos del ácido de la cola, uno de los dos tornillos oxidados ha salido casi sin esfuerzo. Resolvemos seguir aplicando cola al otro.

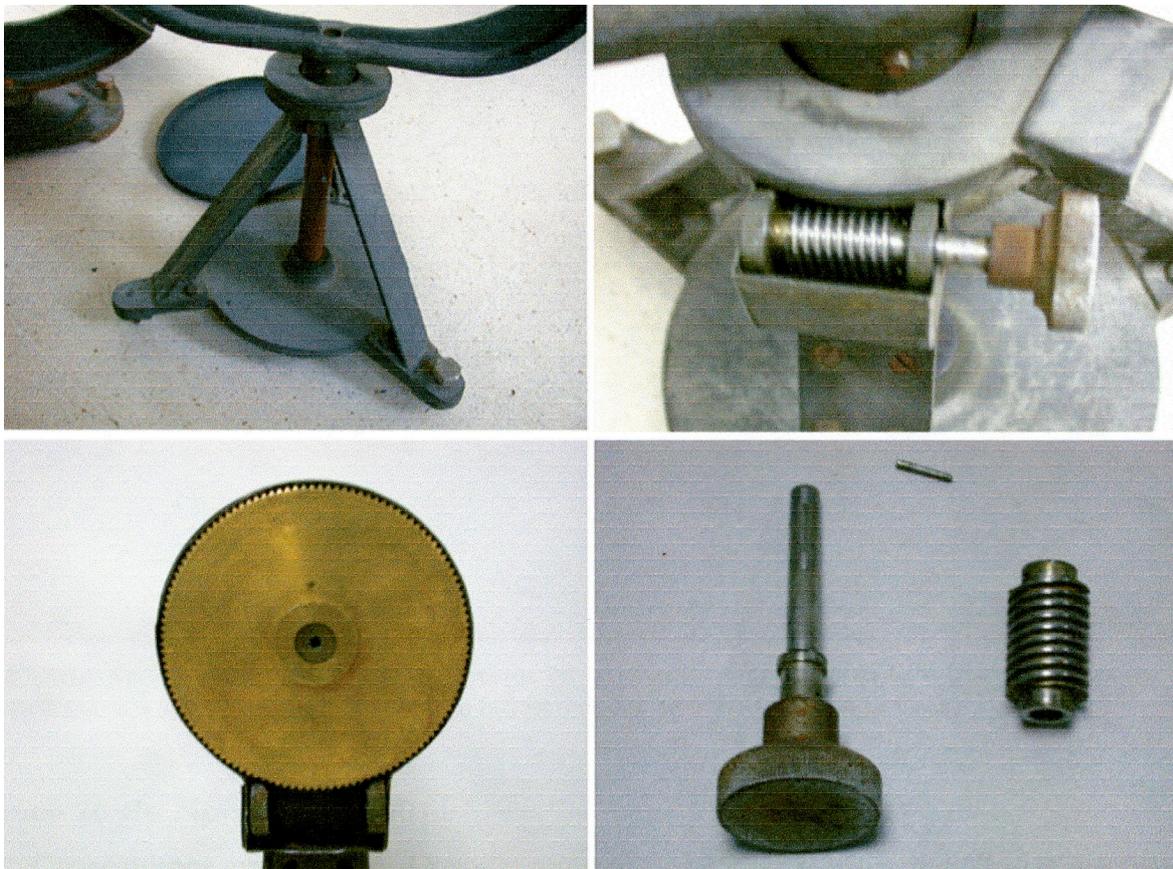


Figura 15. *Arriba Izquierda:* Detalle de la pieza secundaria del celostato original. *Arriba Derecha:* Mecanismo de giro en Acimut del secundario. *Abajo Izquierda:* Engranaje de inclinación en altura del secundario sin su tornillo sin fin. *Abajo Derecha:* Tornillo sin fin del giro en altura del secundario.

Miércoles 21 de Noviembre 2001

Falsa alarma: El Martes nos equivocamos de tornillo, era la otra celda. Seguimos dando cola a ambos tornillos.

Una de las bobinas de un motor está rota, se lleva a rebobinar a la empresa *DINAMO*, ubicada en c/Trafalgar 7, Madrid. Allí se desmontan dos transformadores del motor para conseguir otros idénticos bobinándolos de nuevo.

Por otro lado, limpiamos los motores con la ayuda del disolvente. El efecto conseguido es bastante aceptable (*Figuras 16 y 18*).



Figura 16. *Arriba:* Vistas de los motores en su estado original. *Abajo:* Vistas de los mismos motores una vez limpios con disolvente industrial. La diferencia salta a la vista.

Lunes 26 de Noviembre 2001

Conseguimos grasa sólida. Con ella engrasamos todas las ruedas dentadas del sistema (*Figura 17*).

Seguimos aplicando cola. Con un destornillador viejo afilado, horadamos un poco las cabezas de los tornillos oxidados para poder introducir mejor el destornillador y hacer más par. Uno de los dos sale sin mucho esfuerzo, lo que demuestra de hecho el carácter corrosivo del refresco en cuestión. El otro no, y además su cabeza está dada de sí. Rayamos el contorno de la cabeza para que la cola entre con menor dificultad.

Con algodón, el tapón de una botella de plástico y aceite lubricante, ideamos un sistema de dosificación de aceite para el tornillo (*Figura 19*).

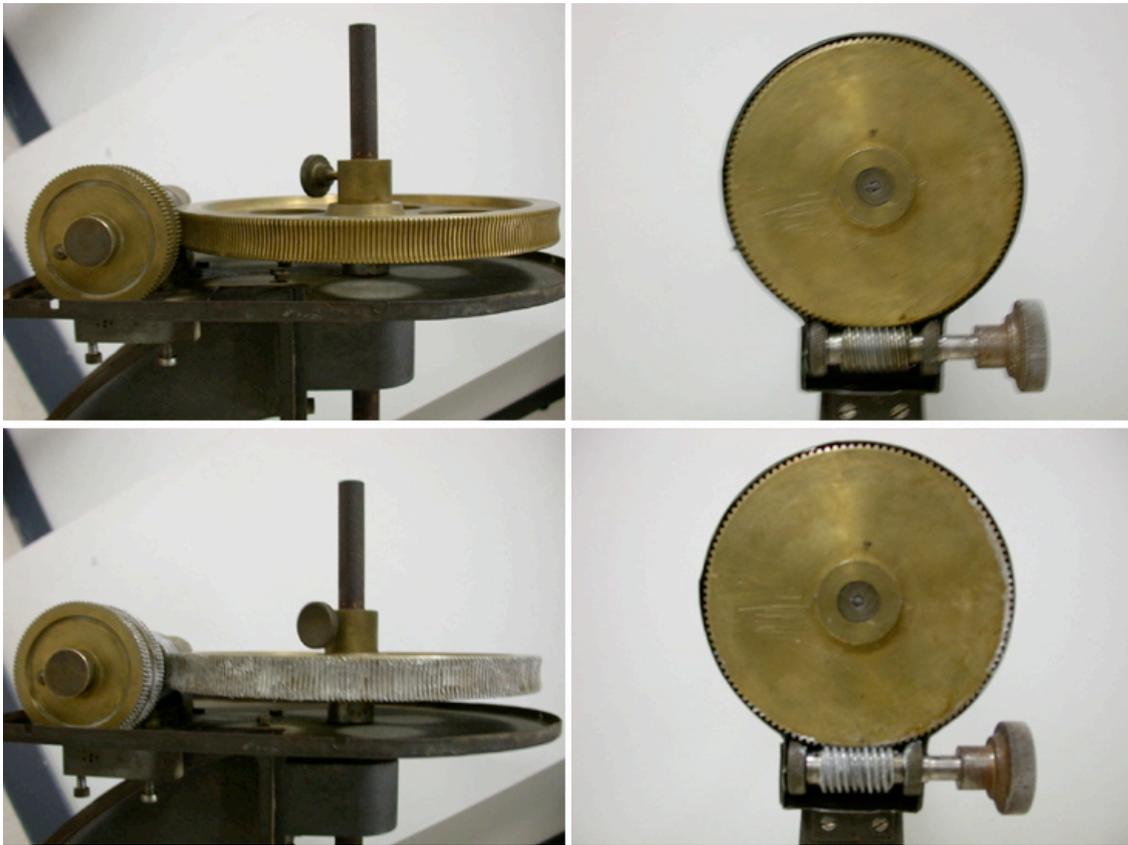


Figura 17. Arriba: Engranajes. Abajo: Engranajes una vez engrasados.

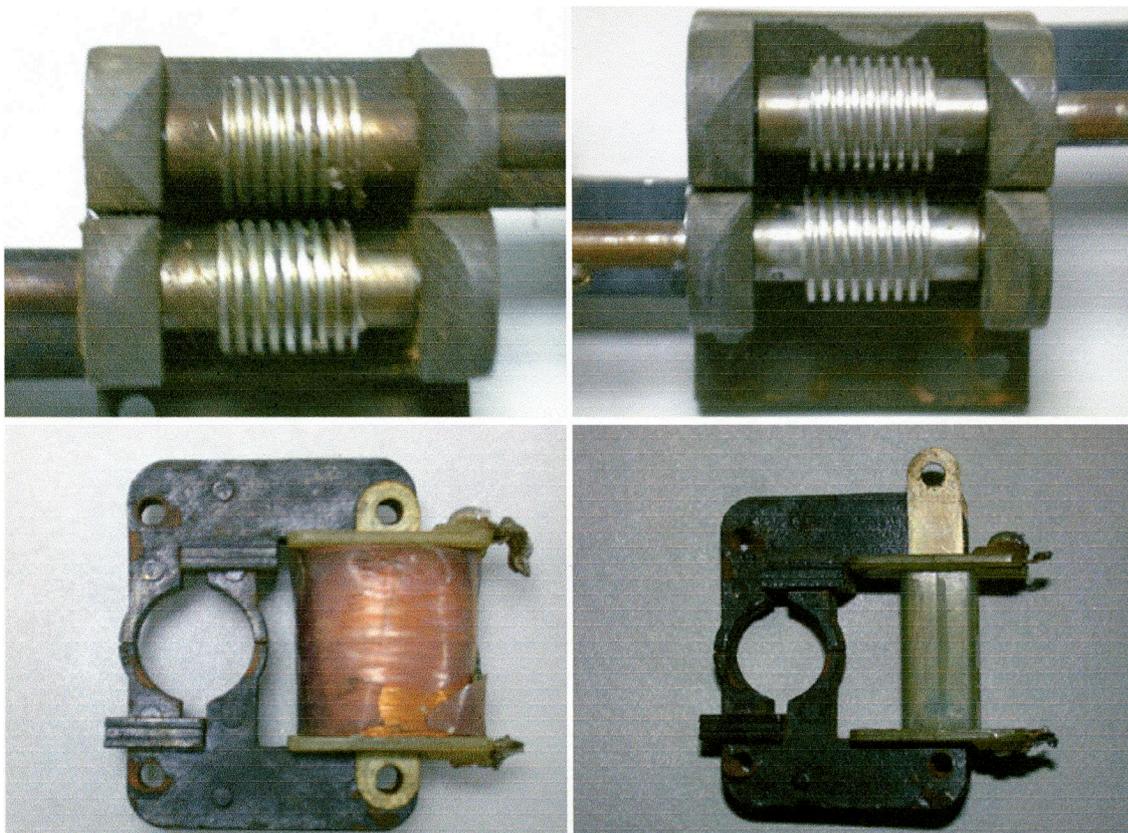


Figura 18. Arriba: Detalle del bisínfin del motor en su estado original y una vez limpio. Abajo: Transformador del motor roto e ídem sin bobina, preparado para ser rebobinado.

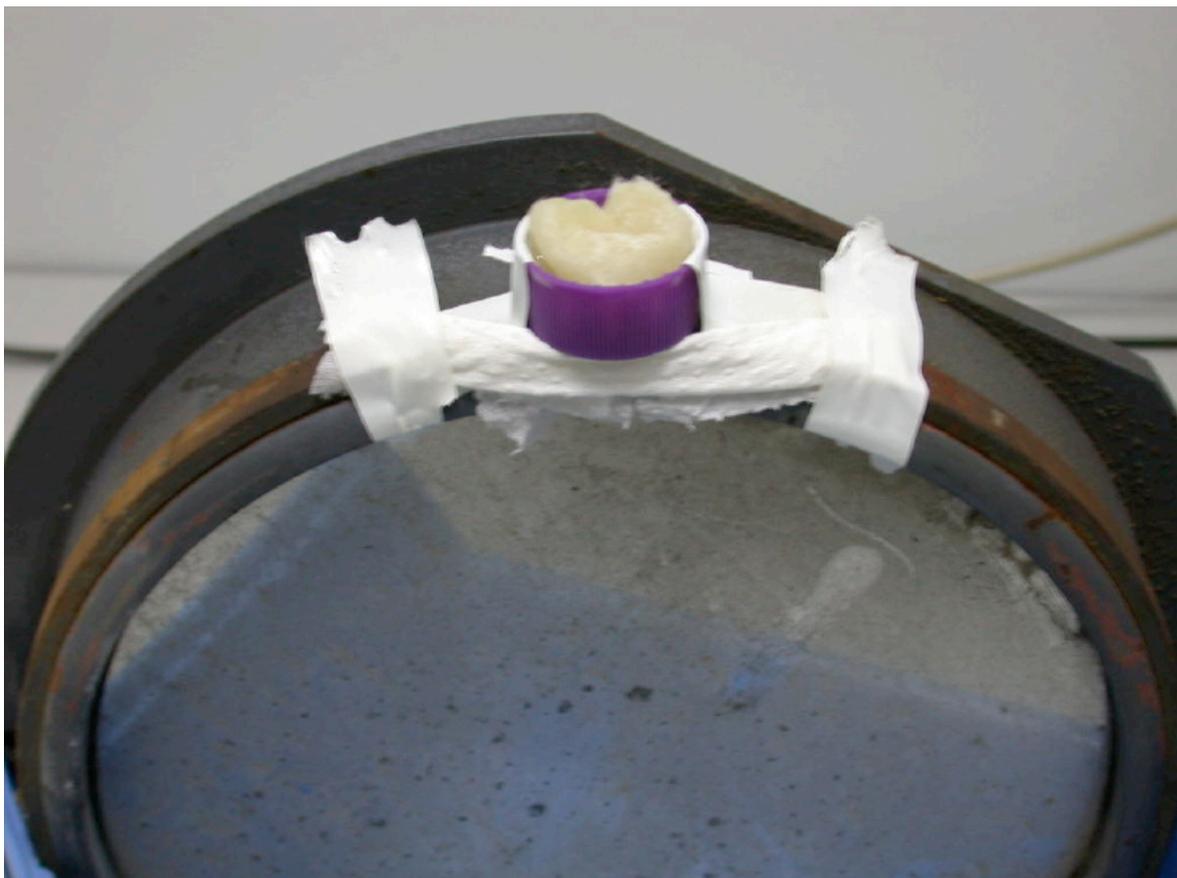


Figura 19. Arriba: Mecanismo dosificador de cola a los tornillos oxidados de la celda del espejo primario. Abajo: Pieza clave del mecanismo de dosificación.

Martes 27 de Noviembre 2001

Quitamos un par de tornillos del montaje del secundario. Muchos no salen, y parecen muy oxidados. Dudamos si incluir dicha pieza en el montaje final, debido a su gran peso (12 kg).

Empezamos el trabajo de documentación y revisión de diseños preliminares. De momento no encontramos ninguna buena idea en libros, y tenemos un diseño preliminar¹ realizado por Antonio de Ugarte .

Recogemos los transformadores rebobinados hace un par de días en *DINAMO* (*Figura 20*).

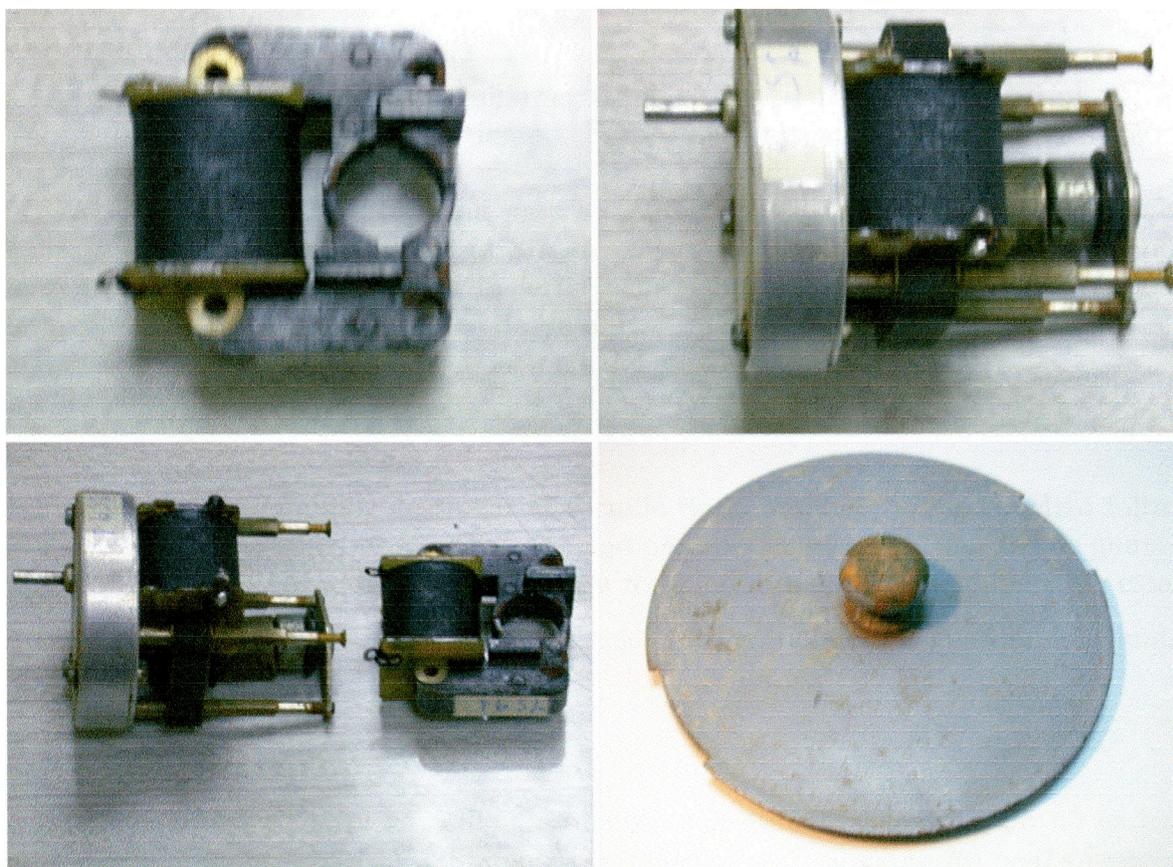


Figura 20. Arriba Izquierda, Arriba Derecha y Abajo Izquierda: Transformadores y piezas del motor recién bobinados. Abajo Derecha: Tapadera del espejo primario después de su limpieza. Aunque el resultado no es espectacular, se aprecia diferencia con el estado anterior.

Miércoles 28 de Noviembre 2001

Resolvimos medir experimentalmente la altura a la que debe estar el primario en la cúpula, con arreglo al paso del Sol por el meridiano del observador, a mediodía. Pero el sistema de apertura de la cúpula estaba estropeado, lo que hizo imposible dicha labor.

¹Véase 4.2.1. Diseños Preliminares

La importancia de esa medida reside en corroborar lo que tememos tras haber hecho los cálculos: con el espejo secundario alineado al Sur con el primario (*i.e.* al Sur de éste), la altura a la que debería estar para recoger la luz del Sol en invierno es desmesurada², de modo que puede llegar casi al techo de la cúpula. Hay que buscar una solución urgentemente para este problema, porque levantar una pieza de más de dos metros y conseguir que sea estable y de fácil manipulación (por no hablar del problema de su instalación en la cúpula), es una tarea que parece casi imposible.

En cuanto a la fase de diseño, calculamos la altura a la que debería estar el secundario si desalineamos éste de la dirección Sur. En principio, desalinearlo 45° parece una buena opción, al no quedar muy arriba en la posición de altura máxima, en el solsticio de invierno.

Lunes 3 de Diciembre 2001

Desistimos de la idea de desatornillar el tornillo oxidado por el método ortodoxo. Si no ha salido ya, no va a salir con más tiempo. Planeamos destruirlo con un taladro eléctrico y una broca de metal.

Parece ser que la altura óptima para el centro del espejo primario en la cúpula es 120 *cm* si éste está a unos 10 *cm* al Sur del pilar del telescopio. De este modo podrá observarse el Sol en el solsticio de invierno justamente a mediodía, incrementándose el intervalo de observación poco a poco desde ahí³.

Hicimos los primeros dibujos de la torre del espejo secundario⁴.

Martes 4 de Diciembre 2001

Finalmente conseguimos destrozarnos el tornillo de la manera planeada. Hizo falta engrasar el aro de metal que aprisionaba al espejo para poder sacarlo. Los aros de goma que soportaban el espejo para aprisionarlo bien se rompieron debido a su paupérrimo estado.

Limpiamos la celda del espejo y embalamos éste en otra caja, guardándolo junto al secundario (*Figura 21*).

Martes 11 de Diciembre 2001

Limpiamos todas las piezas cuidadosamente con etanol. El resultado no es espectacular, pero se aprecia bastante diferencia. Incluso salen fácilmente los restos resacos de cola.

Construimos una maqueta del montaje experimental utilizando diversos objetos y un par de espejos. Hacemos unas pruebas usando un puntero láser, con lo que nos convencemos de la gran diferencia entre el secundario alineado al Sur y desalineado de allí. La guardamos para usarla en la medición pendiente de la altura del Sol. Planeamos hacer la medición el día más próximo posible al solsticio de invierno, la posición límite para la altura máxima del secundario (*Figura 21 Extremo Superior*).

²Véase **3.1.3. Trayectoria del Sol y posición del secundario**

³Véase **3.1.1. Altura del primario**

⁴Véase **4.2.1. Diseños Preliminares**



Figura 21. *Extremo Superior:* Maqueta de la torre del espejo secundario. *Arriba Izquierda:* Espejo primario y su celda recién desacoplados. *Arriba Derecha:* El espejo ha sido dado la vuelta para que se vea la cara especular. *Abajo Izquierda:* Aros de hierro y goma del montaje. *Abajo Derecha:* Espejo primario embalado.

Miércoles 12 de Diciembre 2001

Averiguamos la función de los dos motores y las ruedas dentadas movidas por ellos: La más interior regula el giro de la celda en ascensión recta de forma gruesa, siendo la más exterior para el ajuste fino. Pueden girar de manera independiente.

Engrasamos los tornillos de ajuste fino en ascensión recta del primario.

Dibujamos en el suelo de la cúpula un boceto de los montajes, emplazándolos en el entorno con objeto de restringir a lo plausible las diferentes posibilidades y variables de que disponíamos. Encontramos ciertos valores óptimos.

Jueves 13 de Diciembre 2001

Los motores ya han sido rebobinados. Los limpiamos, y engrasamos de nuevo los rodamientos de los tornillos sin fin para hacer su movimiento totalmente fluido.

Dudamos si hacer el pilar del primario móvil en alguna de dirección. Después de diversos cálculos desechamos esa idea, en cualquier dirección, debido tanto a la inutilidad práctica de algunos de dichos movimientos, como a la dificultad técnica derivada de la implementación de los demás. Además, el sistema será tanto más robusto y estable cuanto menor movilidad tenga⁵.

Lunes 17 de Diciembre 2001

Realizamos dibujos a mano alzada y a escala 1 : 4 de la torre del espejo secundario⁶.

Martes 18 de Diciembre 2001

Tuvimos una reunión en la cúpula Oeste para discutir el diseño y la mejor configuración del aparato con Jesús Gallego, David Montes y Antonio de Ugarte. Llegamos a la conclusión de que el diseño debe ser lo más compacto posible, no impidiendo en manera alguna el paso, y debe estar distribuido en torno al pilar del telescopio.

Incluso discutimos la posibilidad de instalar el celostato fuera, en la terraza, mandando la luz de manera horizontal al espectrógrafo, en vez de vertical; pero desechamos la idea por las enormes dificultades que presentaría.

Además, decidimos no desaprovechar la ocasión (día soleado) para comprobar la altura a la que debe ir el secundario al paso del Sol por el meridiano del observador, a mediodía, en un día muy cercano al solsticio de invierno, momento en el que la órbita del Sol presenta su declinación mínima. Instalamos la maqueta que construimos hace unos días y comprobamos los modelos matemáticos contruidos, reafirmando la necesidad imperante de desalinear el secundario del Sur.

⁵Véase 4.1. **Discusión sobre movilidad del primario**

⁶Véase 4.2.1. **Diseños Preliminares**

Miércoles 19 de Diciembre 2001

Seguimos calculando el problema de la altura del secundario. Con el diseño actual (secundario desalineado 45° del Sur, a 0.52 m en horizontal del primario), la altura óptima que se obtiene para el secundario en el solsticio de invierno (la peor situación) es la nada desdeñable cifra de 2.89 m . Con esas expectativas, la torre del secundario debería ser bien sólida para soportar tanto peso a tanta altura. Empezamos a pensar en alguna alternativa.

Jueves 20 de Diciembre 2001

Hablamos con el responsable del taller mecánico de la Universidad. Nos sugirió la idea de hacer la torre del secundario como una corona giratoria afianzada al suelo y dos barras verticales huecas que guarden otras dos, que subirían telescópicamente, y a las que iría unido el eje del espejo secundario, con su correspondiente celda⁷.

Solucionamos el problema de la altura: Si dotamos a la celda del espejo primario del giro en dirección de declinación, podemos regular la altura a la que mandamos el haz, pudiendo hacer, por ejemplo, que la luz sea dirigida hacia el secundario como si fuera verano, a la altura mínima. Con ello, perdemos algo de flujo debido al gran ángulo de inclinación que tendrá en invierno, pero parece mucho mejor solución que no hacer nada al respecto.

Anotamos estudiar la posibilidad de que como resultado de la reorientación de la luz mediante este último movimiento la torre del secundario hiciera sombra impidiéndonos una observación óptima.

Navidades 2001

Durante las navidades preparamos el aparato matemático necesario para la descripción de las distintas configuraciones de observación, y preparamos diversas tablas de observación en distintas configuraciones⁸.

Lunes 14 de Enero 2002

Diseñamos las piezas que parecen definitivas con la ayuda de un programa de diseño asistido por ordenador.

Martes 15 de Enero 2002

Enseñamos los diseños al responsable del taller mecánico, que alega que no les son útiles para construirlo, debido a su carácter de esbozo. Nos recomienda hablar con el delineante para encargarle realizar los diseños. Concertamos una cita con el delineante.

Jueves 31 de Enero 2002

Vamos a hablar con el delineante, pero aún no ha empezado con los diseños. Nos dice que empezará la semana que viene.

⁷Veáse **4.2.1. Diseños Preliminares**

⁸Veáse **3. Configuraciones** y **4. Diseños**

Febrero-Abril 2002

Vamos periódicamente a hablar con el delineante, dándole las indicaciones necesarias para llevar a buen término el diseño final del aparato. Como ideas de última hora para la mejora del dispositivo, resolvemos la incorporación de un par de niveles al montaje final, así como una escala graduada para el giro en declinación del primario, como asistencia para su puesta en estación.

La pieza entera del espejo primario es bajada al taller mecánico para su estudio y disposición, pues construyendo las piezas *in situ* se asegura su adecuado ensamblaje y funcionamiento correcto y preciso. Se discute si es posible hacer la construcción desmontable, pues la escalera de la cúpula es muy empinada e incómoda, y el primario es excesivamente voluminoso y pesado. Además, la torre del secundario debería ser lo suficientemente ligera como para poder ser elevada por dicho hueco de alguna manera (aunque, por otro lado, deberá ser lo suficientemente robusta para asegurar su estabilidad). Habrá que resolver ese problema de instalación en cierto momento.

Llevamos los dos espejos para su aluminizado a una empresa especializada en ese tema, así como en dispositivos ópticos en general, *BOBES*, sito en Cno Fuente del Toro SN, El Molar. Como los espejos no presentan signos de daños suficientes como para que haya que volverlos a pulir para la tarea que realizarán, simplemente se les limpiará y quitará la capa de aluminio, volviéndolos a aluminizar en una campana de aluminizado (*Figura 22*).



Figura 22. Campana de aluminizado de espejos en BOBES, el Molar.



Figura 23. 4 Fotos Superiores: Espejo primario antes de ser limpiado y aluminizado. 4 Fotos Inferiores: Espejo primario realuminizado. La diferencia es abismal. No obstante, se aprecia una pequeña mella en el espejo. esperamos que dicha mella no interfiera demasiado con la resolución del espectrógrafo encargado de recoger la imagen.

Mayo-Junio 2002

Volvemos a *BOBES* a recoger los espejos, que ya han sido aluminizados. El resultado es espectacular, comparado con su estado anterior, como se puede apreciar en las fotografías, aunque en uno de los espejos haya una pequeña mella (que también puede apreciarse en las fotografías). No obstante, suponemos que esta mella no es lo suficientemente grande como para desmejorar mucho la resolución y funcionamiento preciso del aparato al instalar el telescopio en la siguiente fase del proyecto (*Figura 23*).

Seguimos trabajando codo a codo con el delineante, añadiendo pequeñas mejoras como la incorporación de unos piñones para la regulación del giro en la torre del secundario. Dicha mejora requiere ensanchar la base de la torre unos pocos cm^9 , lo cual llevará una o dos semanas, de manera que en el momento de la redacción de esta memoria el diseño que se refleja aquí es incompleto y está siendo modificado aún por el delineante. Además, el delineante realiza unas vistas renderizadas informáticamente de la torre del secundario.

El taller mecánico estará preparado para empezar con la construcción del aparato en cuanto el diseño final se complete, en Julio de 2002, por lo que la construcción del celostato se terminará previsiblemente durante el curso 2002/2003. Esto demuestra que a pesar de todo el esfuerzo realizado para llevar el proyecto a cabo y terminarlo antes de final de curso, la gran magnitud de éste y la necesidad de pasar por varias etapas cuya duración no depende de nosotros y en las que se ve mucha genta implicada, hacen que el tiempo necesario para su consecución sea mucho mayor del que se pensó en un principio, por desgracia. Por lo tanto, recomendamos la continuación del proyecto durante el curso que viene, y esperamos que entonces pueda ser finalmente instalado y puesto en funcionamiento.

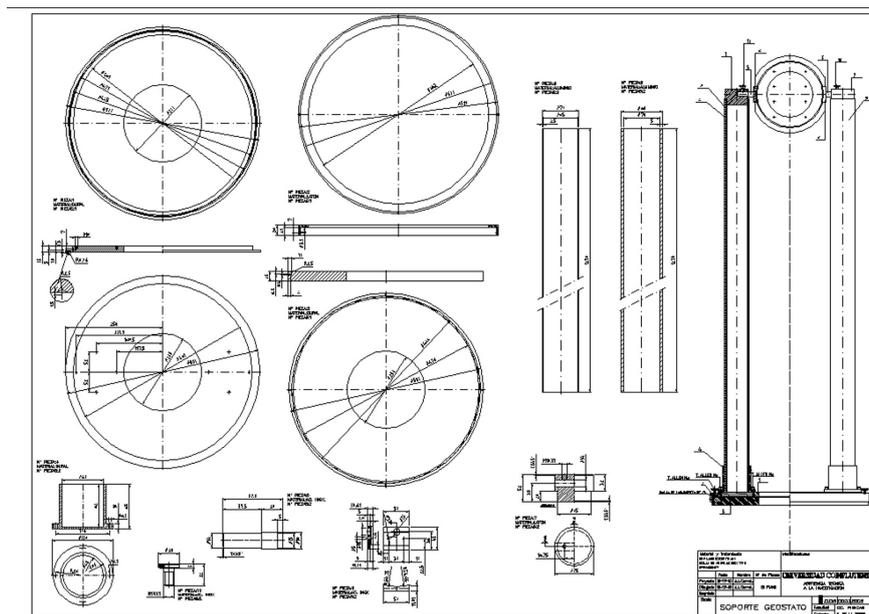


Figura 24. Planos de la torre del secundario realizados por el delineante de la facultad, José Luis Corral. Estos planos son diseños cercanos a los finales. Para más información sobre los diseños, Véase la sección 4. Diseños.

⁹Véase 4.2.2. Diseños Finales

3. Configuraciones

Se barajaron diversas configuraciones de disposición del aparato en la cúpula Oeste de la facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid. Dicha decisión es importante porque afecta a toda una serie de factores. Existen una serie de necesidades que se tuvieron en cuenta para hallar la configuración ideal. Entre ellas se pusieron como prioritarias las siguientes:

- El celostato debe poder ser utilizado por el alumnado en prácticas de astrofísica solar a lo largo del año el mayor número posible de horas. Por ello la cantidad de horas en las que un elemento hace sombra a otro debe ser mínima, y se debe buscar una altura adecuada (suficientemente alta) para el espejo primario para poder observar el Sol por encima de la pared de la cúpula el mayor tiempo posible a lo largo del año.

- Debe estar preparado para adecuarse correctamente al horario de clases de los alumnos lo mejor posible, para la realización de prácticas. Es por esto por lo que la hora de observación óptima (debido a la mínima deformación de la imagen del Sol por el giro de los espejos al estar el Sol alineado con el secundario y el primario) debe estar adecuada a dichos horarios de alumnos.

- La altura máxima de la torre del espejo secundario debe ser la menor posible, para que la torre sea estable en cualquier posición de altura, además de liviana y de fácil y cómodo transporte y manipulación.

- Todo el sistema debe ser lo más compacto posible y estar distribuido en la cúpula de manera que no dificulte el paso y no resulte excesivamente voluminoso.

Asímismo, existen una serie de restricciones a tener en cuenta:

- La altura máxima a la que puede estar colocado el primario vendrá dada por la altura del telescopio del pilar central de la cúpula, siendo la altura límite aquella en que pudiera empezar a molestar de cara a la manipulación del telescopio. Además, una subida del primario implica una subida de igual magnitud del secundario, y la altura de la cúpula también determina una altura máxima para la torre del secundario (una altura no deseable, en cualquier caso).

- El secundario tiene una altura mínima, con respecto al primario, si se quiere que la imagen deformada por el flujo incidente en los espejos inclinados arroje una circunferencia o elipse que llene el objetivo del telescopio. Dicha altura vendrá dada, en realidad, por un ángulo mínimo de desviación respecto del Sur, como se verá más adelante.

- La disposición de los aparatos en la cúpula así como el diseño de cada uno de ellos provocará ciertas sombras en el camino óptico a determinadas horas. Dichas sombras podrán ser causadas tanto por el propio aparato como por el pilar del telescopio principal.

- La restricción más fuerte viene dada por la estructura de la cúpula, que deberá ser tenida en cuenta a la hora de diseñar configuraciones realistas. Este discriminante servirá para echar abajo las configuraciones irrealizables y quedarnos con la óptima.

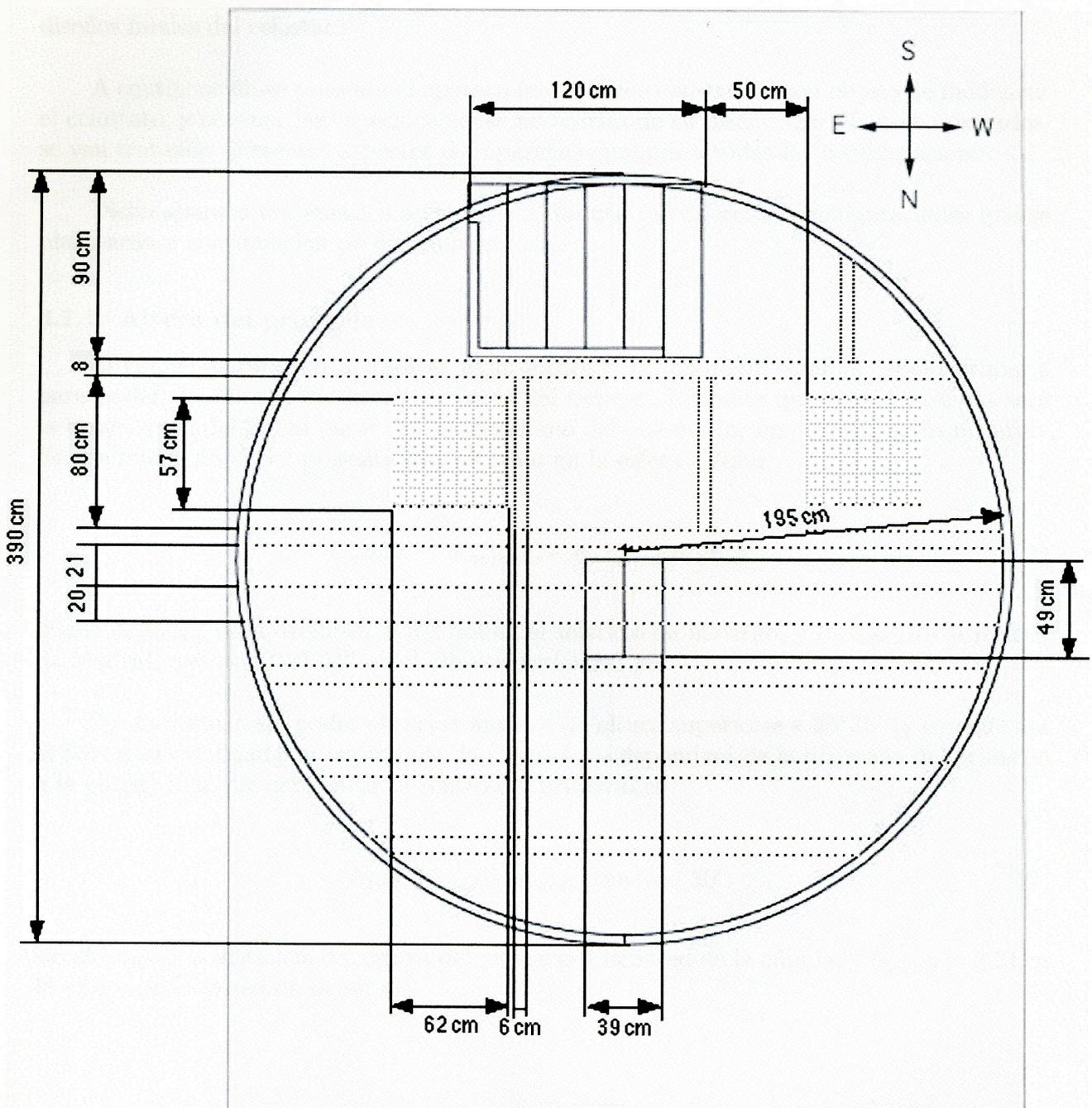


Figura 25. Diagrama acotado de la cúpula Oeste del Observatorio U.C.M. Se representan tan sólo las cotas de las distancias importantes para el proyecto, de cara a la claridad del diagrama. Las líneas discontinuas representan vigas en el techo de la sala de control, debajo de la cúpula, y los dos recuadros con trama discontinua son lámparas fluorescentes en el techo de la sala de control. Las unidades no indicadas son *cm*. La altura de la pared de la cúpula es 2.21 *cm*, la del centro de la cúpula unos 390 *cm*, y la del pilar del telescopio, 142 *cm*.

Naturalmente, habrá que llegar a un compromiso entre las necesidades y las restricciones, para dar con el diseño y la configuración óptimos. En esta sección se utilizan los diseños finales del celostato¹⁰.

¹⁰Véase 4.2.2. Diseños Finales

A continuación se presenta el aparato matemático construido con objeto de modelizar el celostato, y obtener las especificaciones necesarias de su diseño. En diversos apartados, se van tratando diferentes aspectos del aparato, comunes a todas las configuraciones.

Dicho aparato matemático servirá para discutir las diferentes configuraciones que se plantearán a continuación de dichos cálculos.

3.1.1. Altura del primario

El primer parámetro a resolver es la altura a la que debe estar el espejo primario para poder observar el Sol la mayor parte del tiempo. El límite que consideraremos será la observación del Sol al pasar por el meridiano del observador en el solsticio de invierno. En ese momento el Sol presenta una altura a en la esfera celeste

$$a = 90^\circ + \delta_{invierno} - \phi_{Madrid} = 26^\circ 5' \quad (1)$$

donde $\delta_{invierno}$ es la declinación del Sol en el solsticio de invierno, y ϕ_{Madrid} es la latitud de Madrid, que es $40^\circ 27' 04''$ en el Observatorio U.C.M.

Por lo tanto, para poder observar ángulos de altura superiores a $25^\circ 35'$ (y con ello ver el Sol en su totalidad con seguridad), la altura (que dependerá de la distancia del primario a la pared) a la que debe estar el centro del primario es

$$h_1 = h_{pared} - d_{pared} \tan(a - 30') \quad (2)$$

siendo d_{pared} la distancia del centro del primario a la pared de la cúpula, y $h_{pared} = 2.21 \text{ m}$ la altura de la pared de la cúpula.

3.1.2. Giro en declinación del primario y su sombra

El propósito de dotar al montaje de este giro es conseguir que el espejo primario refleje la luz en la misma dirección en que lo haría naturalmente en verano, durante todo el año. Este giro fue incluido en el diseño final del celostato¹¹.

Esta situación presenta, no obstante, un problema añadido: la horma del espejo primario podría hacer sombra cuando el espejo se encuentre girado 23°.5, preparado para enviar la luz del Sol invernal a la posición veraniega.

Para que dicha horma no haga sombra, por tanto, la separación entre ella y el borde del espejo (m en la Figura 26) debe ser, si la declinación efectiva es la declinación de verano ($\delta_{ef} = \epsilon = 23^\circ.5$)

$$10\left(\frac{1}{\cos \delta_{ef}} - 1\right) \text{ cm} = 0.9 \text{ cm} \tag{3}$$

que se tiene en cuenta para el diseño.

A pesar de dicha solución, hay otro problema independiente: A lo largo del día, al ir girando el primario y el Sol, podría darse el caso de que la horma hiciera sombra como resultado de dicho giro. Este problema presenta muy difícil solución, y posiblemente lo único que se puede hacer es diseñar el aparato de manera que la horma presente una altura mínima con respecto a la superficie del espejo.

No obstante, se realizaron una serie de estimaciones que indicaron que con el presente diseño el problema no sería nada grave.

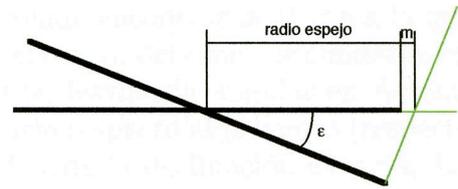


Figura 26. En este diagrama, m representa la separación mínima entre el borde del espejo y su horma para que no haga sombra por el giro en declinación, si la horma es rasante, como se pretende, al borde del espejo.

¹¹Véase 4.2.2. Diseños Finales

3.1.3. Trayectoria del Sol y posición del secundario

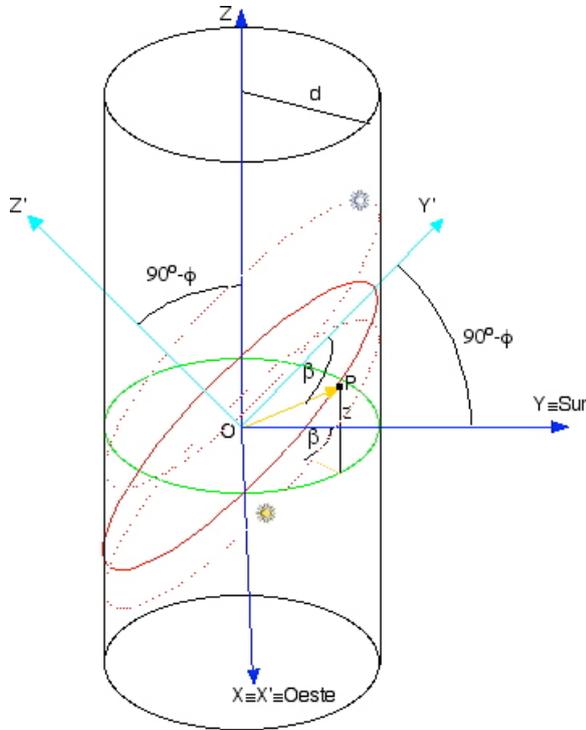


Figura 27. Diagrama de trayectoria del Sol tras reflejarse en el espejo primario durante un equinoccio. O representa la posición del espejo primario. El corte de la trayectoria con el cilindro determina posibles posiciones del secundario P , habiendo puesto como ligadura que la distancia horizontal entre ambos sea d . En el diagrama se han pintado también en discontinuo las trayectorias del Sol en invierno y en verano (mediante apropiados símbolos). En realidad, la trayectoria vendrá determinada por la declinación efectiva. Se han pintado aquí los casos extremos.

Se pretende encontrar la altura a la que debe estar el centro del espejo secundario, en función de la desviación angular en Acimut del secundario respecto al primario (respecto del Sur), β , y de la declinación efectiva, δ_{ef} (declinación del Sol modificada por el giro en declinación del primario, *i.e.* la declinación aparente).

Gracias al giro en declinación del primario tenemos la capacidad de mandar la reflexión del Sol a donde queramos en cada momento del año, de ahí la declinación efectiva.

Para estudiar el problema se considera el corte de un plano inclinado que representaría la trayectoria del Sol, con un cilindro de radio d , cuya pared serían las posibles posiciones del espejo secundario, quedando en el centro a altura h_1 el centro del primario. Dicho plano inclinado iría variando de altura con respecto al cilindro a lo largo del año, sin variar la inclinación, que depende de la latitud del lugar.

De este modo podremos construir una gráfica donde veamos los valores óptimos de cada parámetro y las diferencias entre ellos.

Haciendo los cálculos pertinentes, se obtiene que la altura del secundario es, siendo $\phi = \phi_{Madrid}$

$$h_2(\beta, \delta_{ef}) = h_1 + d \left(\frac{\cos \phi}{\sqrt{\sin^2 \phi + \tan^2 \beta}} + \tan(90^\circ - \phi - \delta_{ef}) - \tan(90^\circ - \phi) \right) \quad (4)$$

siendo β el ángulo de desviación de la posición del espejo secundario respecto al Sur. O , en otras palabras, la desalineación del Sur del secundario.

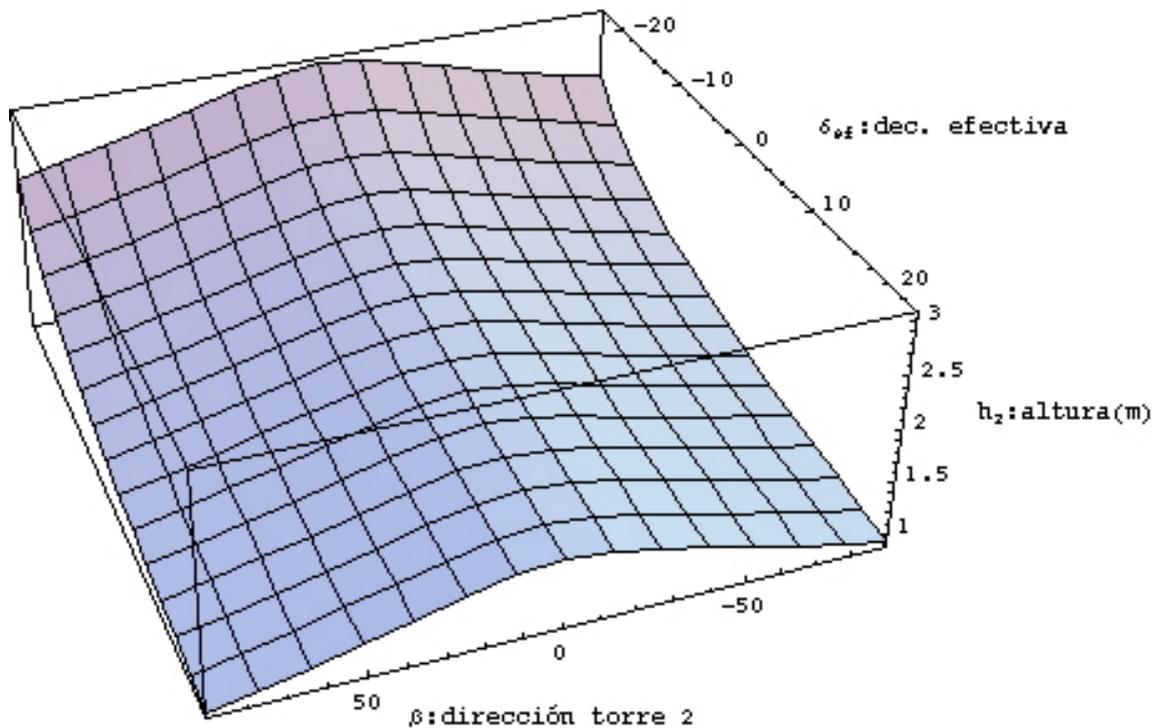


Figura 28. Altura del centro del secundario en función de la declinación efectiva y de la desalineación del Sur del secundario, parámetros ambos regulables. Como se puede apreciar, tanto la idea de dotar al primario de giro en declinación (permitiéndonos regular la declinación efectiva), como la de desviar el secundario del Sur contribuyen a solucionar de manera muy satisfactoria el ya comentado problema de altura excesiva del secundario. La figura realizada asumiendo valores de $d = 0.52 \text{ m}$ y $h_1 = 1.43 \text{ m}$. Dichos valores no son importantes, en realidad, puesto que la forma de la gráfica (que es lo interesante aquí) no depende de ellos.

3.1.4. Altura mínima del secundario y desviación respecto al primario

Se busca la altura a la que debe estar el secundario para que un haz de luz de sección circular y diámetro 20 cm (como espejo) se convierta en una elipse cuyo eje menor sea de 15 cm (diámetro del objetivo), para que entre luz en todo el objetivo del telescopio. Por supuesto, el espejo secundario ha de estar ligeramente por encima del primario, a distancia horizontal d de aquel.

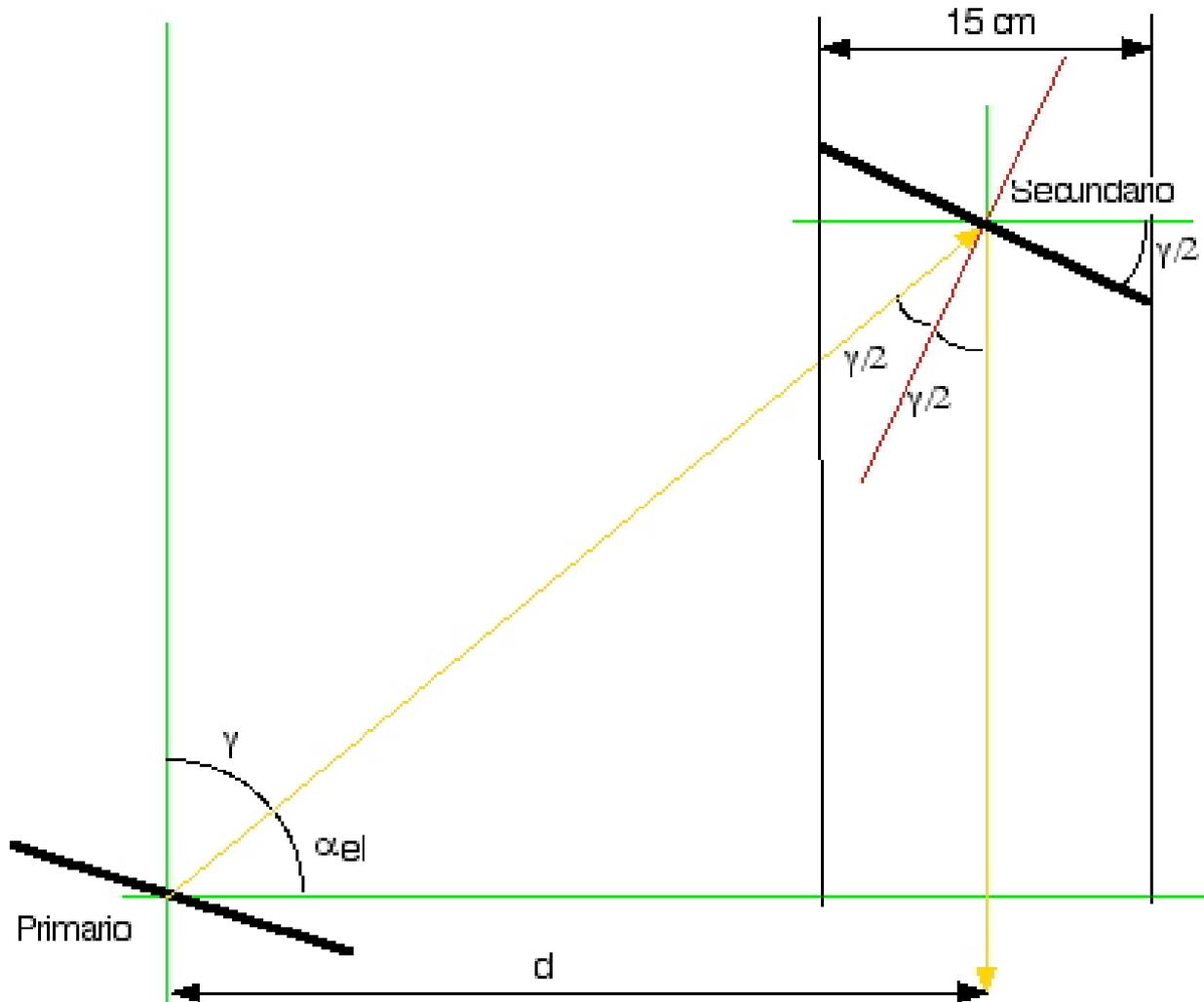


Figura 29. Diagrama de altura mínima del secundario. El haz de luz reflejado por el espejo secundario debe tener un grosor mínimo de 15 cm. Por lo tanto, habrá una relación entre las alturas relativas ambos espejos.

Sea un rayo de luz que incide en el centro del secundario desde el primario. Llamemos γ al ángulo entre la vertical y la dirección del rayo. El secundario lo reflejará hacia abajo de manera que el ángulo entre la horizontal y el espejo secundario sea $\gamma/2$. De esta forma, la condición para que la anchura del haz sea de 15 cm (el supuesto diámetro del objetivo del telescopio que se pondrá a continuación del celostato) será

$$\cos(\gamma/2) = \frac{15 \text{ cm}}{D(\text{cm})} \tag{5}$$

siendo $D = 20 \text{ cm}$ el diámetro del espejo. De este modo, obtenemos $\gamma = 82^\circ.8$. Si llamamos α_{el} al ángulo complementario de γ

$$\alpha_{el} = 90^\circ - \gamma = 7^\circ.2 \quad (6)$$

podremos relacionar la altura del secundario, h_2 , con la tangente de α_{el} , como

$$h_2 = h_1 + d \tan(\alpha_{el}) \quad (7)$$

donde d es la distancia horizontal entre los centros de ambos espejos, y h_1 la altura del centro del espejo primario. Igualando las ecuaciones (4) y (7) y simplificando,

$$\tan(\alpha_{el}) = \frac{\cos \phi}{\sqrt{\sin^2 \phi + \tan^2 \beta}} + \tan(90^\circ - \phi - \delta_{ef}) - \tan(90^\circ - \phi) \quad (8)$$

que en esencia, una vez introducida la latitud del observatorio ($\phi = 40^\circ 25'$), el valor de α_{el} obtenido en (4), y habiendo asumido (por razones de ahorro de altura total del secundario) una declinación efectiva veraniega ($\delta_{ef} = 23^\circ.5$), es una condición para el ángulo de desalineación del secundario con respecto al Sur, β . Teniendo en cuenta el valor límite calculado, la condición resulta en

$$|\beta| \leq 34^\circ.2 \quad (9)$$

Aquellas configuraciones que no cumplan esta relación, tendrán el problema de que la elipse resultante de las reflexiones en los espejos tendrá un eje menor *menor* de 15 cm , por lo que no aprovechará plenamente el telescopio. Estas configuraciones ni siquiera serán ya consideradas.

A continuación se presentan 4 configuraciones distintas, con sus parámetros determinados por las anteriores relaciones [fundamentalmente (2) y (4), cumpliendo (9)] para dar idea del tipo de configuración óptimo, y un comentario posterior sobre ellas. En todas se ha supuesto un valor para la declinación efectiva de $\delta_{ef} = 23^\circ.5$ ¹².

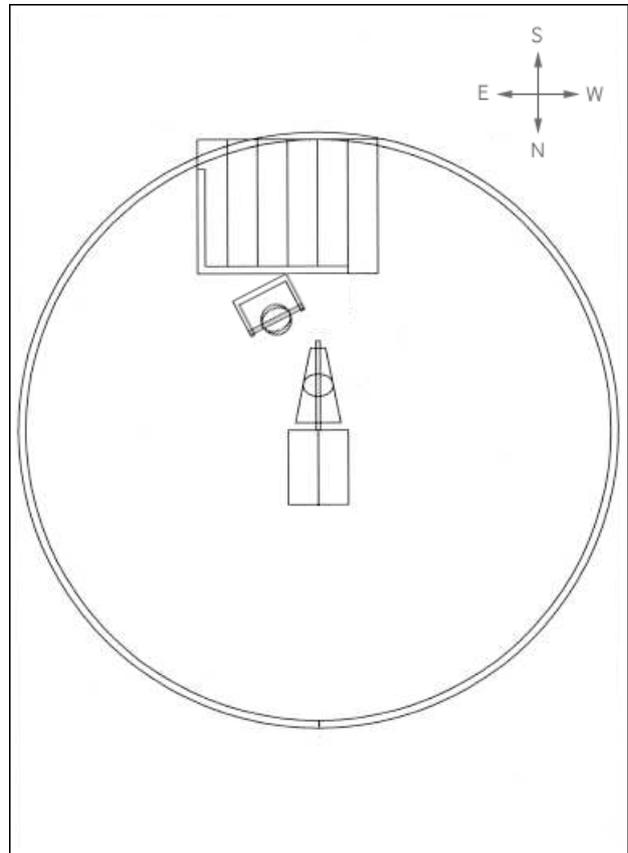
¹²Véase **3.1.2. Giro en declinación del primario y su sombra**

3.2.1. Configuración 1

Primario centrado en la cúpula, a una distancia de la pared $d_{pared} = 1.5 m$, por lo que según (2) su centro estará a $1.49 m$ del suelo; secundario a $34^\circ.2$ hacia el W [cumpliendo (9)], a una distancia horizontal d del anterior. De ella dependerá la altura del secundario.

Para fijar la distancia d se considera la sombra que la torre del secundario pudiera causar sobre el primario. De cara a tratar matemáticamente la sombra, la descompondremos en sombra en altura y sombra en Acimut.

La sombra en altura dependerá, lógicamente, de la distancia d entre los espejos. Teniendo en cuenta el semidiámetro angular del Sol y la extensión del espejo secundario, usando trigonometría básica se obtiene la siguiente gráfica donde el secundario hace sombra al primario en toda la región por debajo de la siguiente curva.



Configuración 1

Configuración 1: Sombra en altura por el secundario

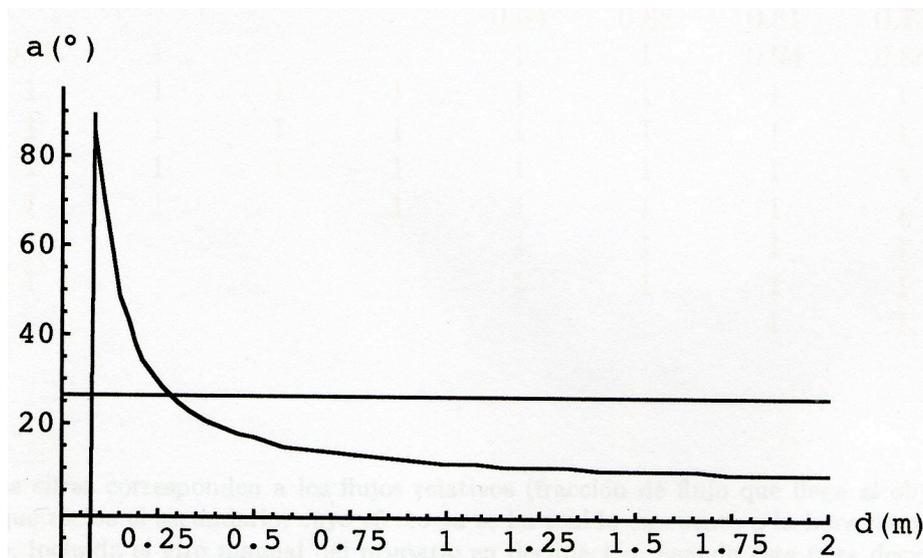


Figura 30. El secundario causará sombra al primario si está situado a una distancia horizontal menor o igual a aquella de la intersección de la línea horizontal (la pared) con la curva. Dicha situación es imposible, en la práctica.

En la figura anterior a es la altura en grados. La línea recta horizontal representa la

pared de la cúpula. Es simple observar que el secundario sólo hará sombra en altura al primario si se encuentra a menos de 28 cm de éste (lo cual es físicamente imposible debido a la incapacidad de dos cuerpos de ocupar el mismo espacio simultáneamente). Por esta razón, no hay que preocuparse por la sombra en altura en esta configuración.

En cuanto a la sombra en Acimut, no debe preocuparnos, pues si el secundario no hace sombra en altura nunca, entonces nunca la hará, tampoco, en Acimut.

A continuación, se muestra una tabla de horas (en Tiempo Civil Local, TCL) efectivos de observación solar en esta configuración.

Tabla 1: Tiempo-Flujo de observación de la configuración 1

TCL	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
8							0.60	0.53	0.49
9						0.78	0.71	0.63	0.58
10					0.94	0.88	0.81	0.73	0.68
11	0.99	1			1	1	0.94	0.86	0.80
12	1	1	1	1	1	1	1	1	0.95
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1		1	1	1	1	1	1
16	1				1	1	1	1	1
17	1				1	1	1	1	1
18							1	1	1
19								0.92	1
20						0.97	0.87	0.78	0.74
21					0.94	0.86	0.79	0.71	0.63

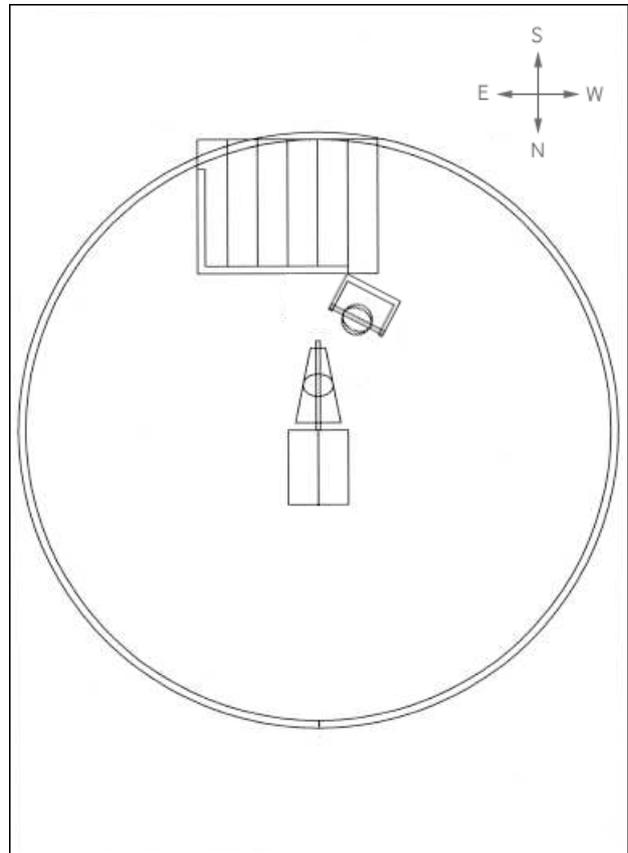
Tabla 1. Las cifras corresponden a los flujos relativos (fracción de flujo que llega al objetivo, respecto del posible) que recibe el secundario, cuyo efecto ya se ha tenido en cuenta a la hora de pasar al objetivo del telescopio, incluida el giro manual del primario en declinación, usando éste para desviar la luz hacia la posición más baja (la de verano) posible. Los cálculos tienen carácter estimativo, corresponden al día 21 de cada mes, y se dan resultados medios de cada hora. Colores: Se ha usado el rojo para indicar que el Sol es visible en esa hora, y naranja si sólo es visible en parte, debido a la pared de la cúpula.

3.2.2. Configuración 2

Primario centrado en la cúpula, a una distancia de la pared $d_{pared} = 1.5 m$, por lo que según (2) su centro estará a $1.49 m$ del suelo; secundario a $34^\circ.2$ hacia el E [cumpliendo (9)], a una distancia horizontal d del anterior. De ella dependerá la altura del secundario.

Esta configuración es igual que la configuración 1 de cara a la determinación de la distancia horizontal d , puesto que es la situación simétrica respecto del eje Norte-Sur. Lo mismo para la sombra.

De hecho, la única diferencia efectiva entre ésta y la configuración 1 es que las horas óptimas de observación (aquellas con flujo relativo 1) se desplazan a la mañana. Esto hace esta configuración peor que la anterior para prácticas de alumnos, y además la disposición en la cúpula impide más el paso.



Configuración 2

Tabla 2: Tiempo-Flujo de observación de la configuración 2

TCL	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
8							1	1	1
9						1	1	1	1
10					1	1	1	1	1
11	1	1			1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1		1	1	1	1	0.92	0.87
16	1				1	0.97	0.87	0.78	0.74
17	0.99				0.94	0.86	0.75	0.67	0.63
18							0.65	0.57	0.54
19									0.45
20									
21									

Tabla 2. Flujos relativos que recibe el secundario. La notación es la misma que en la Tabla 1.

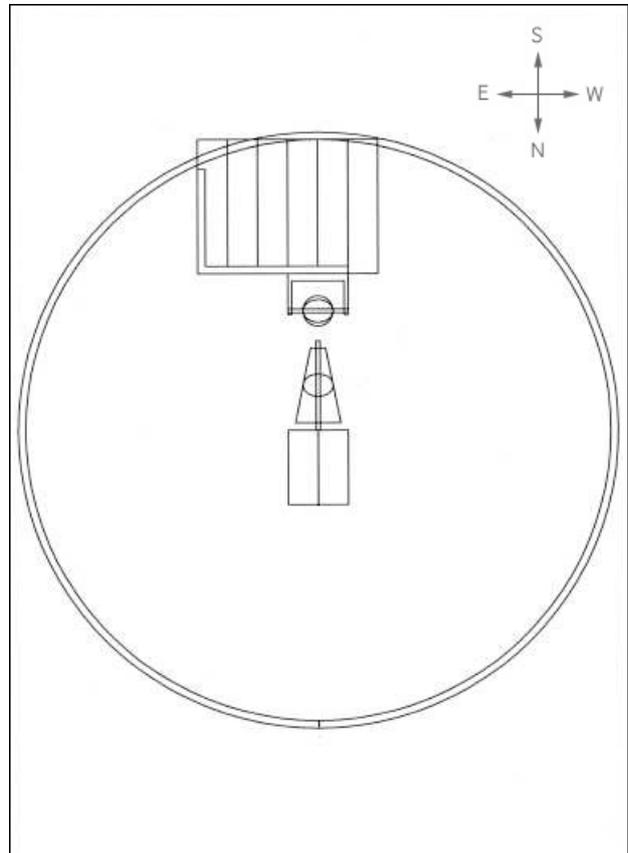
3.2.3. Configuración 3

Primario centrado en la cúpula, a una distancia de la pared $d_{pared} = 1.5\text{ m}$, por lo que según (2) su centro estará a 1.49 m del suelo; secundario alineado al S, a una distancia d del anterior (cuanto mayor sea, mayor será la sombra), cumpliendo (9). De ella dependerá la altura del secundario.

Se usará $d = 0.52\text{ m}$ en este caso, por lo que según (4), el centro del espejo secundario estará a 1.52 m .

Al igual que en configuraciones anteriores, descomponemos la sombra del secundario en sombra en altura y sombra en Acimut.

En este caso, la gráfica de la sombra en altura es la siguiente.



Configuración 3

Configuración 3: Sombra en altura por el secundario

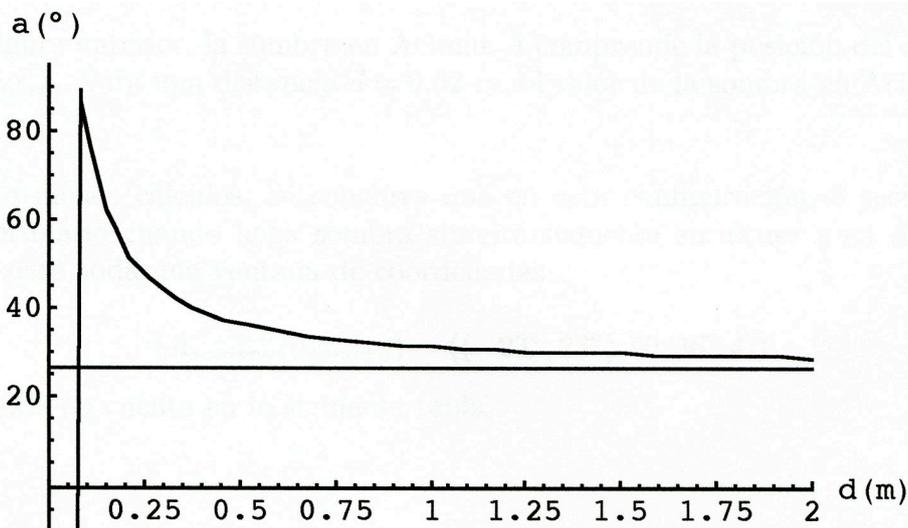


Figura 31. El secundario podrá causar sombra en altura al primario si está situado a una distancia horizontal menor o igual a aquella de la intersección de la línea horizontal (la pared) con la curva.

Se aprecia que siempre habrá cierta sombra en altura, en esta configuración. El

ángulo máximo en el que hay sombra disminuye al aumentar d . El problema reside en que la distancia máxima entre los dos espejos depende mucho de la estructura de la cúpula, y será muy limitada (en el caso de que se pudiera poner en absoluto). Para la distancia asumida en esta configuración, la sombra en altura es hasta $36^\circ.4$.

En cuanto a la sombra en Acimut, teniendo en cuenta que la torre tiene unos 44 cm de ancho, la sombra en función de la distancia será:

Configuración 3: Sombra en Acimut por el secundario

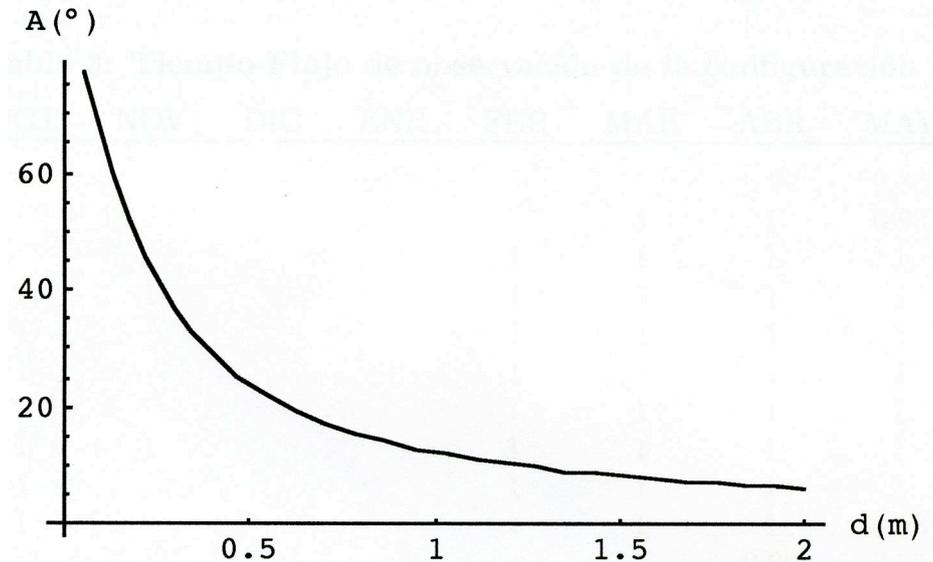


Figura 32. El secundario podrá causar sombra en Acimut al primario en todos los valores del Acimut A por debajo de la curva, para una distancia horizontal entre espejos d dada.

En la figura anterior, la sombra en Acimut A comprende la posición del espejo secundario $\pm A_{sombra}$. Para una distancia $d = 0.52\text{ m}$, el valor de la sombra en Acimut es hasta 48° .

Uniando dichos cálculos, se concluye que en esta configuración el secundario hará sombra al primario cuando haga sombra simultáneamente en altura y en Acimut en, lo cual ocurre para toda una ventana de coordenadas

$$(A_{sombra}, a_{sombra}) = ((-23^\circ, 23^\circ), (0, 36^\circ \dots 4))$$

que será tenida en cuenta en la siguiente tabla.

Tabla 3: Tiempo-Flujo de observación de la configuración 3

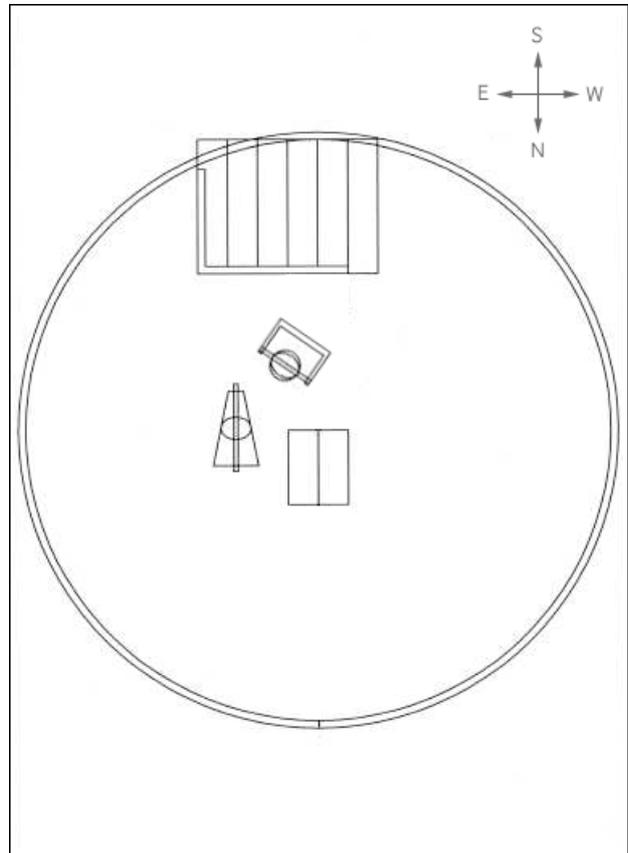
TCL	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
8							0.92	0.86	0.81
9						1	1	0.93	0.88
10					1	1	1	1	0.95
11	1	1			1	1	1	1	1
12	1				1	1	1	1	1
13	1				1	1	1	1	1
14	1				1	1	1	1	1
15	1	1			1	1	1	1	1
16	1				1	1	1	1	0.99
17	1				1	1	1	0.96	0.92
18							0.96	0.89	0.85
19									0.78
20									
21									

Tabla 3. Las cifras corresponden a los flujos relativos (fracción de flujo que llega al objetivo, respecto del posible) que recibe el secundario, cuyo efecto ya se ha tenido en cuenta a la hora de pasar al objetivo del telescopio, incluida el giro manual del primario en declinación, usando éste para desviar la luz hacia la posición más baja (la de verano) posible. Los cálculos tienen carácter estimativo, corresponden al día 21 de cada mes, y se dan resultados medios de cada hora. Colores: Se ha usado el rojo para indicar que el Sol es visible en esa hora, naranja si sólo es visible en parte, debido a la pared de la cúpula, y gris si algún otro elemento hace sombra, impidiendo en parte o del todo la visión del Sol.

3.2.4. Configuración 4

Primario descentrado, situado en paralelo a la pared S del pilar del telescopio, a 0.41 m del centro de la cúpula, a una distancia de la pared en dirección Sur $d_{pared} = 1.93 m$, por lo que según (2) su centro estará a 1.27 m del suelo; secundario a $34^\circ.2$ hacia el W [cumpliendo (9)], a una distancia horizontal d del anterior. De ella dependerá la altura del secundario.

En este caso, al no estar el primario en el centro de la cúpula, la distancia a la pared no será constante, por lo que conviene representar ahora la sombra por el secundario en 3 dimensiones, en función, de a , la altura, y de A , el Acimut, (sabiendo que en el Oeste $A = -90^\circ$). La zona de sombra por causa de la altura del secundario o de la pared de la cúpula, vendrá dada, entonces, por todas las ternas de valores por debajo de la superficie, para una distancia d dada, de la siguiente gráfica.



Configuración 4

Configuración 4: Sombra por el secundario

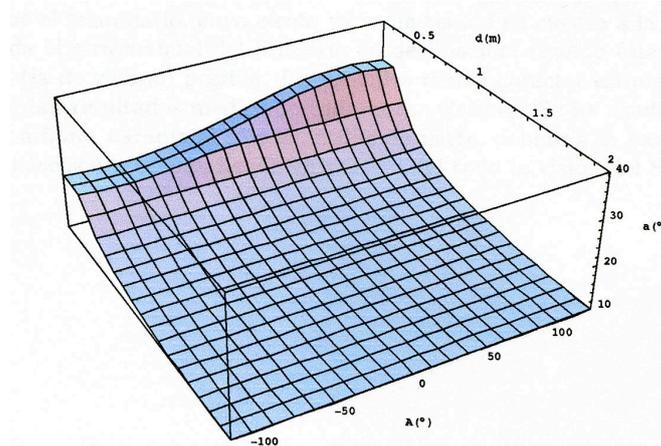


Figura 33. El secundario causará sombra al primario en todos los pares de valores (a, A) de altura y Acimut por debajo de la curva, para una distancia horizontal entre espejos d dada.

Entonces, para que hubiera sombra en altura debido al secundario (y no a la pared, causa incorregible), la distancia entre ambos espejos debería ser $d \leq 35 cm$, lo cual, dada

la disposición de la cúpula, es prácticamente imposible, por las mismas razones aludidas anteriormente en la configuración 1. Por este motivo, no consideraremos la sombra por causa del secundario, sino sólo la de la pared.

Esto hará, en definitiva, que las horas de observación se desplacen hacia la tarde, donde está centrado el máximo de flujo, y menos por la mañana. A continuación se presenta la consabida tabla de observaciones.

Tabla 4: Tiempo-Flujo de observación de la configuración 4

TCL	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
8								0.53	0.49
9							0.71	0.63	0.58
10						0.88	0.81	0.73	0.68
11	0.99	1			1	1	0.94	0.86	0.80
12	1	1		1	1	1	1	1	0.95
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1			1	1	1	1	1	1
17	1				1	1	1	1	1
18	1					1	1	1	1
19							1	1	1
20									
21									

Tabla 4. Las cifras corresponden a los flujos relativos (fracción de flujo que llega al objetivo, respecto del posible) que recibe el secundario, cuyo efecto ya se ha tenido en cuenta a la hora de pasar al objetivo del telescopio, incluida el giro manual del primario en declinación, usando éste para desviar la luz hacia la posición más baja (la de verano) posible. Los cálculos tienen carácter estimativo, corresponden al día 21 de cada mes, y se dan resultados medios de cada hora. Colores: Se ha usado el rojo para indicar que el Sol es visible en esa hora, naranja si sólo es visible en parte, debido a la pared de la cúpula, y gris si algún otro elemento hace sombra, impidiendo en parte o del todo la visión del Sol.

3.3. Comentarios a las Configuraciones

Todas las configuraciones podrían disponer de un secundario regulable en altura, con objeto de poder disminuir el giro en declinación del primario a medida que se acerque el verano, reduciendo el ángulo de incidencia y subiendo el secundario para compensar, acercando más la figura resultante a una circunferencia de tamaño el objetivo del telescopio. Dicho movimiento no causaría sombra al acercarse el verano, en principio.

En cuanto a las configuraciones, un vistazo a la tabla indica que la óptima es una versión del tipo de la 4. La gran extensión hacia por la tarde del periodo de observación de dicha configuración, sobre todo a partir de primavera, facilitaría la incorporación del celostato al programa de prácticas de las asignaturas de la especialidad de astrofísica, sobre todo en el segundo cuatrimestre.

Por otro lado, las configuraciones 1 y 2 presentan un problema en cuanto a que de cara a su instalación, habría que aumentar el ángulo de desviación entre las dos piezas, debido a la estructura del emplazamiento. Dicho aumento acarrearía una disminución del flujo efectivo [condición (9)]¹³.

En cuanto a la configuración 3, su disposición en la cúpula es imposible, pues la barandilla de la escalera impide la colocación en serie, alineados hacia el Sur, de las dos piezas.

Por lo tanto, la configuración 4, además de ser la óptima por sus cualidades, es la única posible en dicho emplazamiento. En esencia, esta configuración es como la 1, excepto en que el mínimo ángulo visible varía con el Acimut. Aunque no se aprecie muy bien en la tabla, la diferencia con la 1 es que las horas de observación se desplazarían hacia la tarde, al no haber una distancia constante de la pared de la cúpula al primario a lo largo del día.

Además, esta configuración es mejorable: Si las dos piezas del celostato se desplazan 30 *cm* hacia el Sur (lo cual es físicamente posible), con lo cual el centro del primario debería estar más alto según (2) (a 1.43 *m*), pero como mejora, el pilar del telescopio no haría sombra a últimas horas de la tarde, en abril, mayo y junio.

De este modo, en este trabajo se propone la instalación del celostato en la cúpula según la configuración 4 modificada como en el párrafo anterior. Consideramos que esta configuración alcanza el mejor compromiso entre las necesidades y restricciones existentes.

¹³Véase 3.1.4. **Altura mínima del secundario y desviación respecto al primario**

4. Diseños

En esta sección se recoge un análisis sobre la posible movilidad del espejo primario y su utilidad. A continuación se refleja la evolución que han ido experimentando los diseños del celostato hasta su estado final. Muchos de los diseños en las etapas tempranas no son más que esbozos realizados a mano por sus distintos autores, sobre los que se ha ido cavilando, analizando y mejorando, hasta llegar a la colaboración con el delineante de la facultad, José Luis Corral, que realizó los diseños finales.

4.1. Discusión sobre movilidad del primario

Este apartado recoge un análisis de la situación del celostato en una configuración en la cúpula del tipo de la Configuración 3¹⁴. No obstante, sirve esencialmente un análisis similar para cualquier configuración, por lo que se estudiará este aspecto como caso particular.

Movilidad vertical del pilar primario

La distancia del primario a la pared es en este caso $d = 1.5 \text{ m}$, por lo que según las ecuaciones y modelos matemáticos utilizados¹⁵ la altura del centro del espejo primario es 1.48 m , estando su base a 1.16 m . De este modo, la situación extrema de altura mínima sería poner el primario en el suelo, con lo que el centro del espejo estaría a 32 cm de altura, y podríamos ver ángulos de altura superiores a $51^\circ.6$.

¿Que ganaríamos con eso?

- Dado que la altura del primario es una constante aditiva¹⁶ (y que sólo la hemos hecho depender del ángulo límite del Sol en el solsticio de invierno a mediodía), no influye en los demás cálculos.

Quiere esto decir que si subimos el primario, ¡tendremos que subir también el secundario, la misma magnitud!

- Dicho esto, y como la gran altura máxima de la torre del espejo secundario, sólo recomendaríamos hacer posible este movimiento si dicha altura molesta durante el resto del año (dado que la mínima es bastante menor). Y aún así, el Sol durante el día varía bastante el ángulo que subtiende a la horizontal, por lo que si se quiere un estudio prolongado debemos estar el máximo tiempo posible (*i.e.* en situación alta).

Dado el coste y complicación que supondría hacer posible este movimiento (por no hablar de la pérdida de robustez y la posible pérdida de precisión del sistema), aconsejamos descartar la idea, a no ser que fuera éste un movimiento para plegarlo cuando no se use, siempre y cuando moleste e interfiera con el telescopio (lo cual no parece probable, por ahora)¹⁷.

¹⁴Véase **3.2.3. Configuración 3**

¹⁵Véase ecuación (2) en **3.1.1. Altura del Primario**

¹⁶Véase **3.1.3. Trayectoria del Sol y posición del secundario**

¹⁷Más adelante se descartó totalmente dicha interferencia

Movilidad Norte-Sur del primario

Tan sólo podría moverse unos pocos *cm* hacia Norte o Sur (10 *cm* hacia el Norte y 38 *cm* al Sur (movimiento inútil) en su actual diseño).

Moviéndolo hacia el Norte no ganaríamos gran ángulo para observar en invierno, aumentando en cambio la sombra del secundario sobre el primario (pasamos, con 10 *cm* hacia el Norte, de 26° de límite inferior de observación a 27°.5). Comparando esa ventaja con el coste de diseño y complejidad que presenta, sobre todo si se quiere acoplar con una posible movilidad Este-Oeste, queda automáticamente descartado por sí solo.

Movilidad Este-Oeste del primario

La movilidad en esta dirección permitiría ver el Sol en invierno pronto por la mañana (hacia el Oeste) o tarde por la tarde (hacia el Este). Con un movimiento pequeño, de unos pocos *cm* se podría observar el Sol en invierno hacia las 9:00 TCL moviéndolo hacia el Oeste, por ejemplo. Eso, claro, si no fuera porque a esa hora es imposible observar el Sol debido a la pared de la cúpula.

De modo que para observar una mejora mínimamente apreciable, habría que dotar al sistema de un movimiento de más de 30 *cm*, lo cual dificultaría el acceso y el paso en la cúpula, y provocaría un reajuste necesario de la rotación del primario cada vez que se moviera. Eso, unido a las dificultades técnicas y de realización de la implementación de este movimiento hacen que esta propuesta deba ser descartada.

4.2.1. Diseños Preliminares

El diseño del celostato ha ido evolucionando enormemente desde sus etapas iniciales hasta su estado actual. El propósito de esta sección es hacer un repaso cronológico a los diferentes diseños que se se fueron pensando antes de llegar a los actuales (en la siguiente sección), así como las ideas que fueron suponiendo cambios cualitativos en el concepto de dichos diseños.

La idea de base de un celostato queda reflejada en dibujo en la Figura 34. Dicho dibujo y el siguiente, la Figura 35, son bocetos a mano alzada de Antonio de Ugarte del proyecto original de Observatorio Solar, que incluía el espectroheliógrafo de la sala de control de la cúpula.

Como se puede observar en ellos, no existía aún un concepto del diseño del celostato muy definido. La idea principal consistía en usar el primario como tal, como estaba en el celosato antiguo, emplazándolo en lo alto de un pilar al lado Sur del pilar del telescopio.

En cuanto al secundario, en las figuras pueden verse dos ideas distintas. En la Figura 34, la torre del secundario lleva un mecanismo de subida y bajada mediante una cremallera accionable por medio de una manivela. Dicho movimiento sería necesario, para compensar la distinta inclinación de la trayectoria de la luz solar generada por la variación de declinación de éste. En la figura, el diseño del secundario es totalmente distinto al secundario original, como puede apreciarse en la Figura 9. Solamente se aprovecharía entonces el espejo del secundario, y tal vez su celda.

En la Figura 35, en cambio, la torre del secundario parece más robusta y estable, cualidades imprescindibles a implementar en el diseño final. No obstante, en la figura el espejo secundario parece carecer de movimiento vertical, necesario de momento, tal y como expresamos en el párrafo anterior.

Por tanto, las conclusiones que sacamos de la idea original fueron, básicamente, que en el caso del primario, en principio bastaría con montarlo sobre un pilar sin características especiales¹⁸, y en el caso del secundario habría que encontrar un compromiso entre la movilidad y la robustez de la torre, aprovechando siempre que fuera posible la estructura del celostato original.

¹⁸Véase 4.1. **Discusión sobre movilidad del primario**

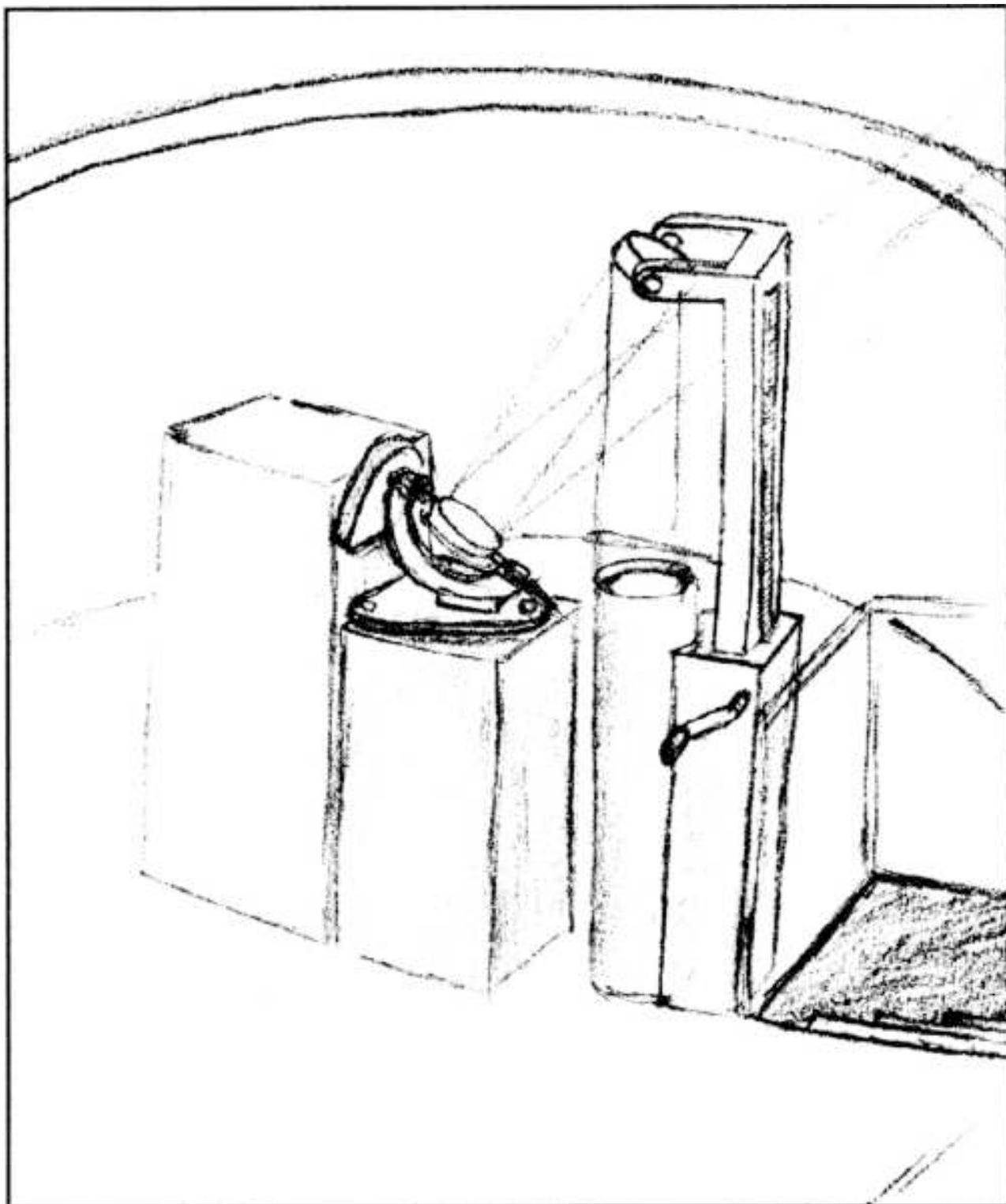


Figura 34. Dibujo a mano alzada de Antonio de Ugarte mostrando un diseño preliminar del celostato. La luz va del secundario al tubo donde se encuentra el objetivo del telescopio, que debido a su focal, sobresaldría del suelo de la cúpula hacia arriba.

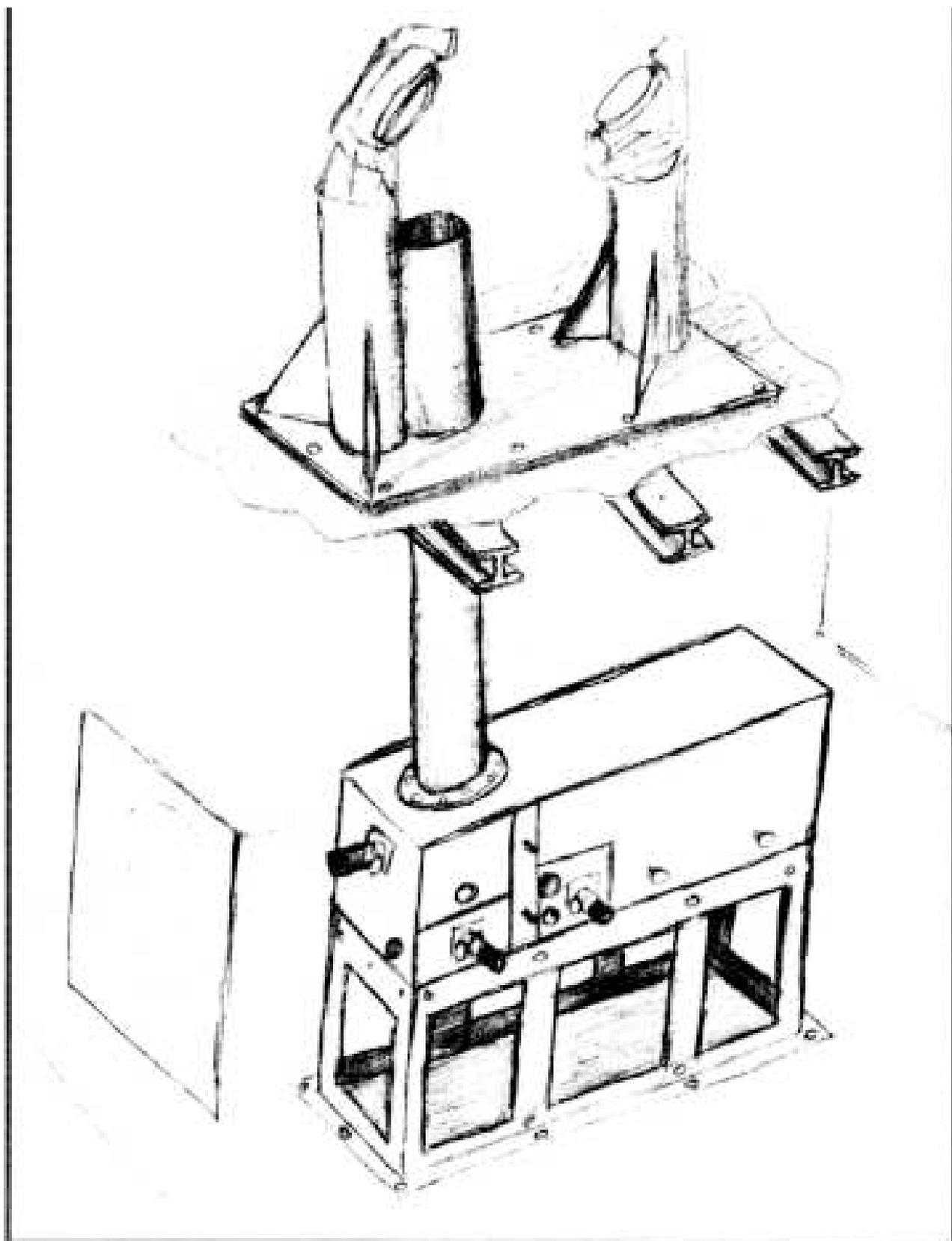


Figura 35. Dibujo a mano alzada de Antonio de Ugarte mostrando el proyecto entero de Observatorio solar, con las dos partes (celostato y espectroheliógrafo) claramente diferenciadas.

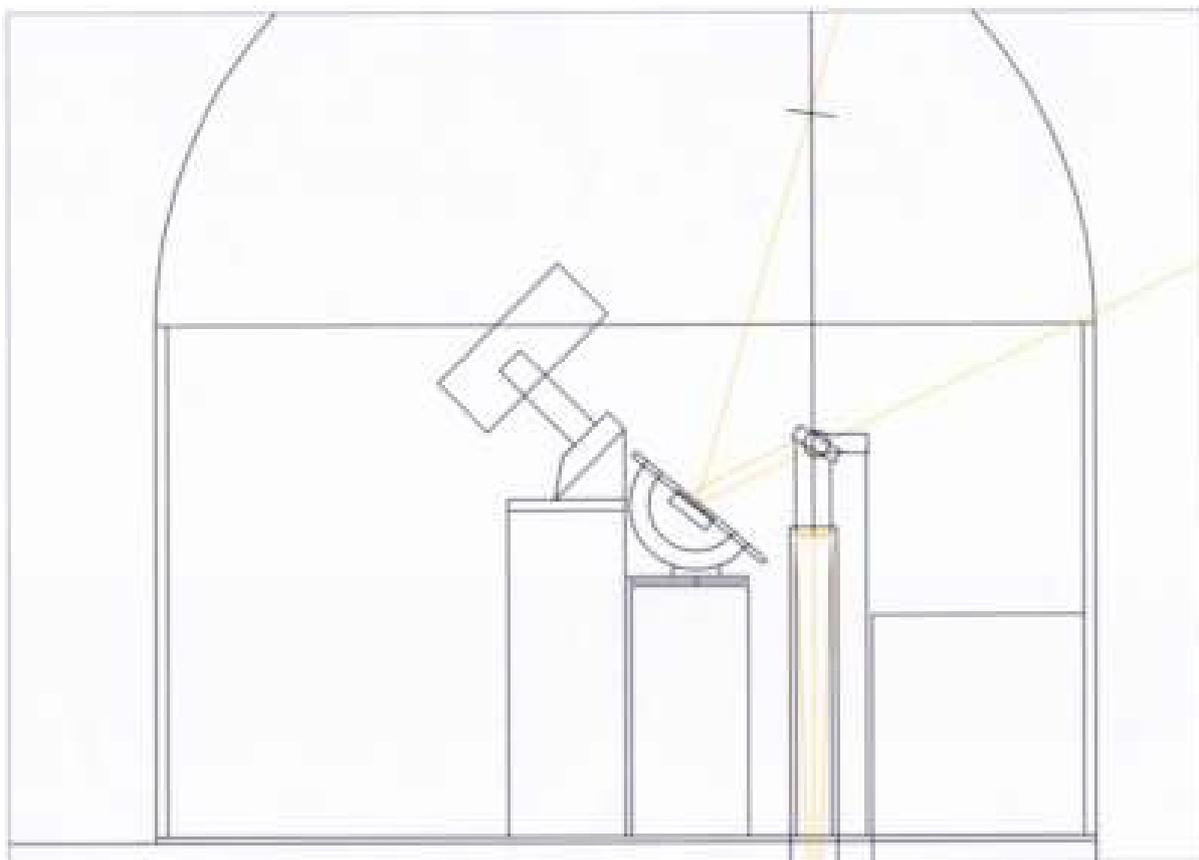


Figura 36. Diagrama de Antonio de Ugarte mostrando el camino óptico de la luz en dos posiciones, una de ellas marcada en el espejo secundario, y la otra en la vertical un poco más arriba. Dichas posiciones corresponden al espejo secundario en verano e invierno, respectivamente.

El siguiente paso consistió en pensar diseños que cumplieran dichos requisitos. No pensamos en modificar para nada el primario, que iría sobre un pilar, como hemos dicho anteriormente. Para la torre del secundario, ideamos un sistema que consistía, básicamente, en dos barras verticales rígidas, ancladas al suelo de la cúpula, y sólidamente unidas en su punto más alto. Rodeando a dichas barras discurrirían sendos anillos cilíndricos que irían acoplados a una plancha de metal, donde iría atornillado como un trípode el secundario original, de manera horizontal. Dicha torre tendría que ser de un material muy resistente y durable, como acero, lo cual añadiría gran peso al sistema entero, y dificultaría su transporte.

Se puede apreciar dicha idea en la Figura 37, un boceto a mano alzada de Jaime Zamorano. Posteriormente, este diseño sufrió algunos cambios. Por ejemplo, calculamos que habría que anclar también la parte superior de las barras a la pared, por encima de las escaleras, tal vez, a suficiente distancia para que no impidieran el acceso a la cúpula y no incidieran en accidentes.

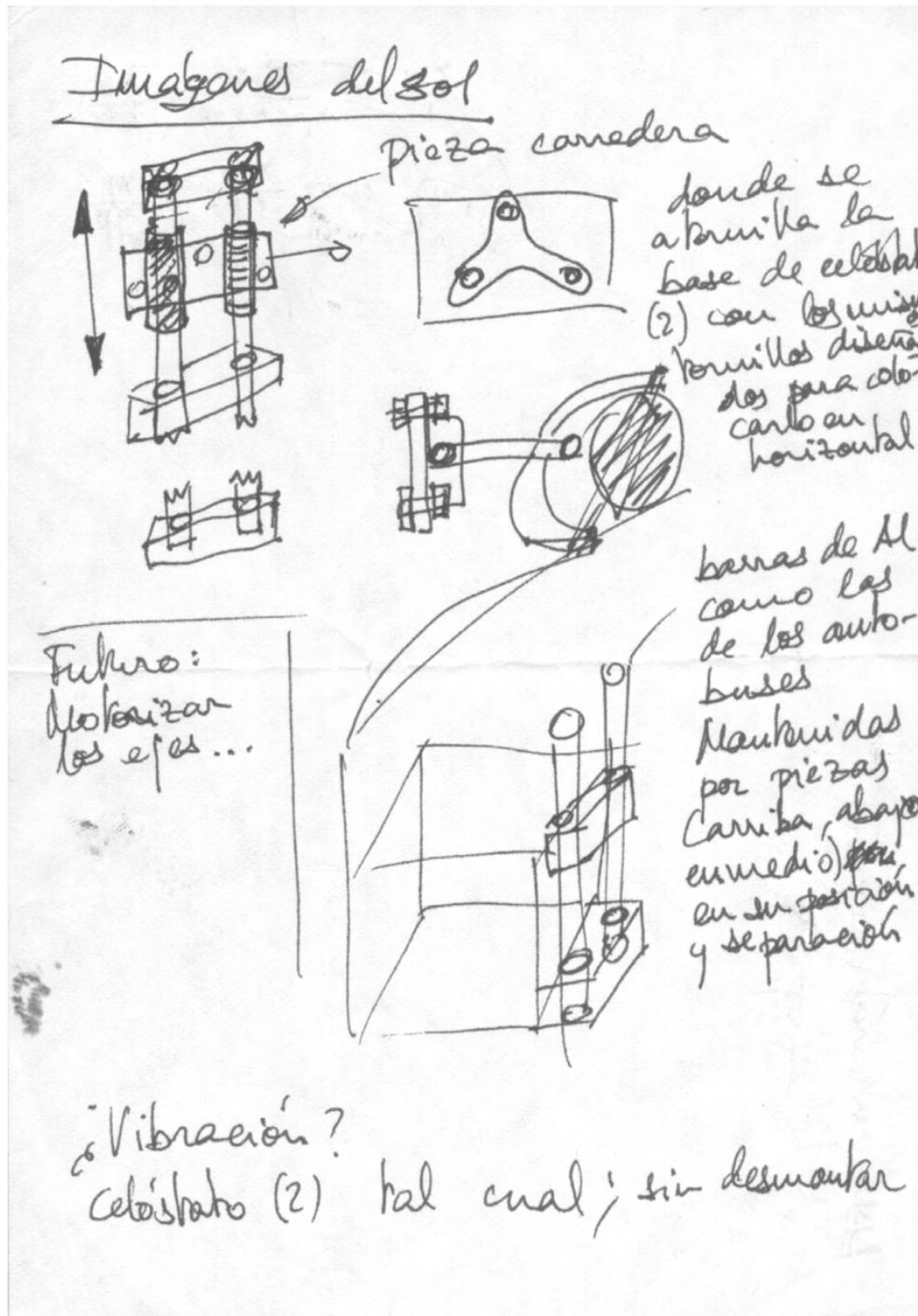


Figura 37. Boceto a mano alzada de Jaime Zamorano de un diseño preliminar. En éste, se aprovecharía la estructura del celostato original prácticamente tal cual.

La razón de que descartáramos este diseño fue múltiple. Por un lado, la imposibilidad de transporte del aparato, unido a su gran peso. Por otro, el secundario original pesaba 12 kg, por lo que sujetarlo de manera horizontal y esperar que aguantase requeriría una ensamble extraordinariamente fuerte. Además, habría que hacer ligerísimas modificaciones en la estructura del secundario, y desmontarlo no parecía una buena idea de

cara a su posterior ensamblaje, aparte de que la mayoría de los tornillos estaban bastante oxidados.

La conclusión que sacamos fue que usar el secundario original completo no era lo adecuado, posiblemente. Resolvimos usar tan sólo la celda del espejo y el propio espejo, y diseñar una torre adecuada en la que pudieran ser emplazados.



Figura 38. Boceto a mano alzada de Jaime Zamorano mostrando el concepto de torre del secundario telescópica.

De este modo surgió el siguiente diseño de la torre del secundario, apreciable en su concepción original en la Figura 38. Consistía en dos tubos telescópicos, de interior hueco, en cuya parte superior iría engarzado un eje que sujetara la celda del espejo secundario. Llevaría unas asas para elevar un tubo respecto al otro, que servirían asimismo como tope de bajada del mismo.

Este diseño parecía bastante adecuado, de cara a una serie de cosas. Para empezar, su robustez y estabilidad serían un punto a su favor, así como la posibilidad de introducir

el objetivo del telescopio en su interior, aislándolo tanto de la luz circundante como de posibles golpes o imprevistos.

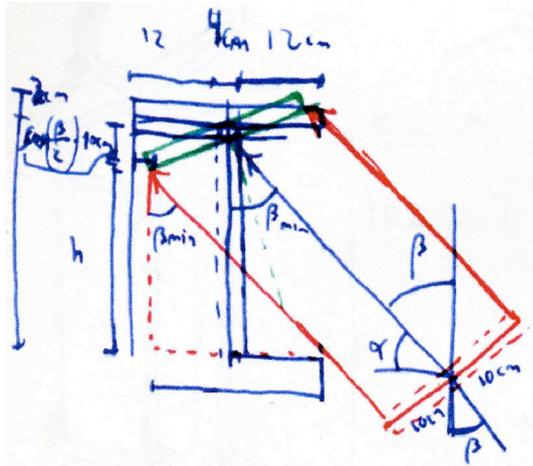


Figura 39. Diagrama a mano alzada del autor sobre la apertura del tubo superior en relación con la inclinación de la luz en el diseño de torre del secundario telescópica. No se incluyen los cálculos debido a que este diseño fue desechado.

Una vez realizados los cálculos necesarios de altura de la torre del secundario y la desalineación del secundario respecto del Sur¹⁹, realizamos algún cálculo sobre la apertura que debería tener el tubo superior para permitir a todo el haz de luz incidir correctamente y por completo en el objetivo del telescopio, como se puede ver en la Figura 39, y algún otro boceto más avanzado del sistema, apreciable en la Figura 40.

Llegamos a la conclusión de que sería más conveniente construir un anillo cilíndrico –otro tubo– para anclar todo el diseño al suelo de la cúpula, en adición a los otros dos tubos, debido al peso y a la facilidad de transporte y manejo.

Además, pensamos en añadir rodamientos entre los tubos para mejorar su deslizamiento interno, así como hacer tres orificios ovalados en las paredes del anillo inferior (pasantes) con objeto de poder atornillar el tubo principal en diferentes posiciones para permitir un pequeño giro de la torre en caso de ser este necesario, para su puesta en estación. Este diseño, presentaba, de este modo, otro problema: el secundario no podría girar en Acimut prácticamente nada. Esto no sería un problema, sin embargo, si el primario no se moviera nunca de su sitio original. No consideramos que eso fuese un grave inconveniente, y seguimos adelante con el proyecto.

Algo más adelante, realizamos diseños acotados de la torre a mano alzada, como primera aproximación a un diseño más elaborado. Dichos diseños pueden encontrarse en las Figuras 41, 42, y 43.

¹⁹Véase 3.1.3. Trayectoria del Sol y posición del secundario

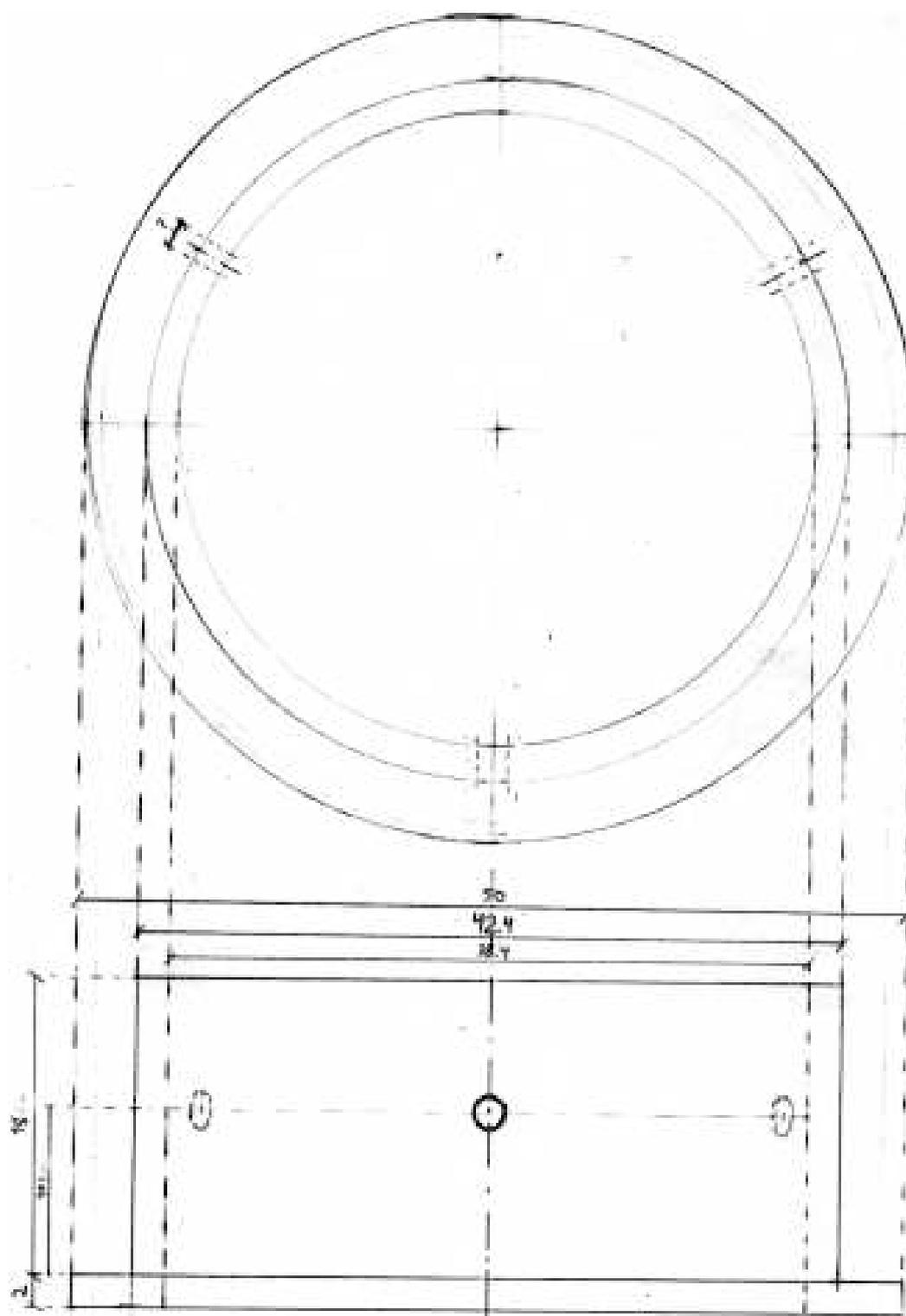


Figura 41. Diseño a mano alzada del autor de la pieza de agarre inferior de la torre del secundario telescópica. Las medidas son mayormente orientativas. El diseño original estaba a escala 1:4, y las acotaciones en *cm*.

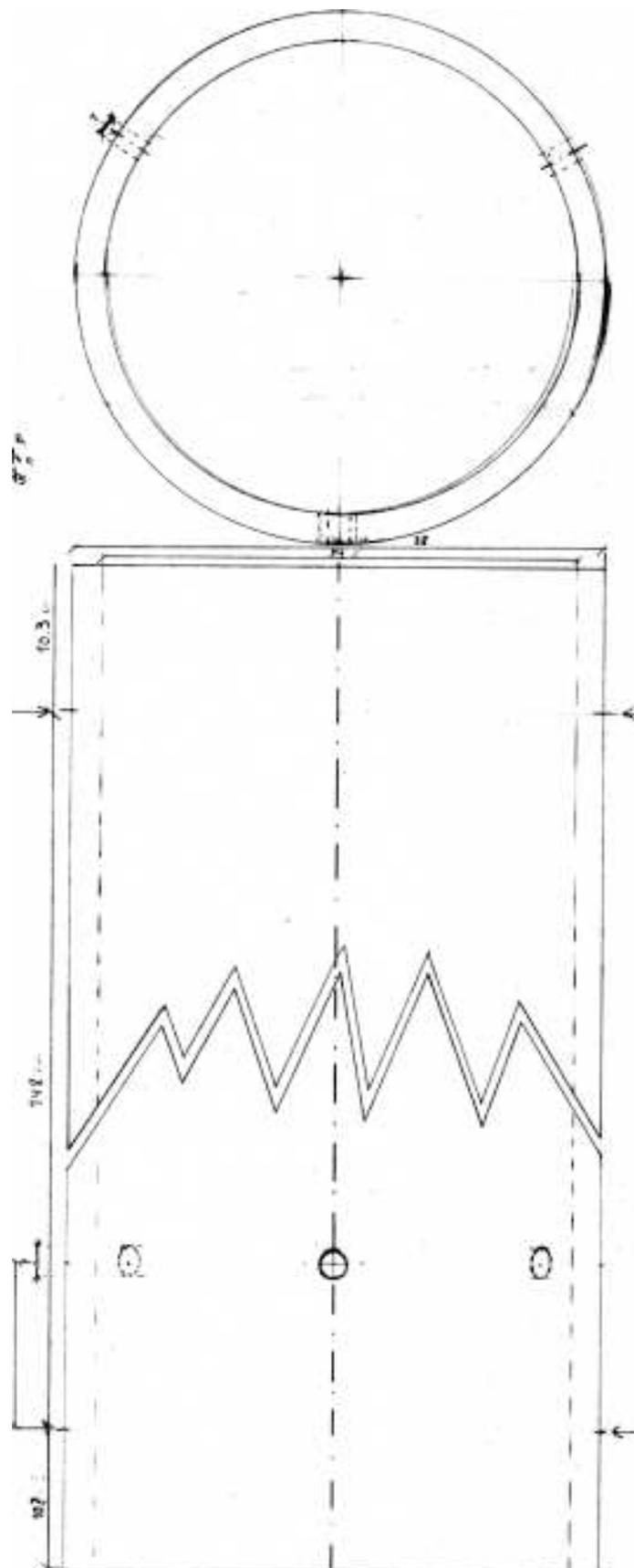


Figura 42. Diseño a mano alzada del autor del tubo principal de la torre del secundario telescópica. Las medidas son mayormente orientativas. La franja zigzagueante indica un corte necesario debido a la gran longitud del tubo. El diseño original estaba a escala 1:4, pero ha sido reducido para ser insertado en la página. Las acotaciones en *cm*.

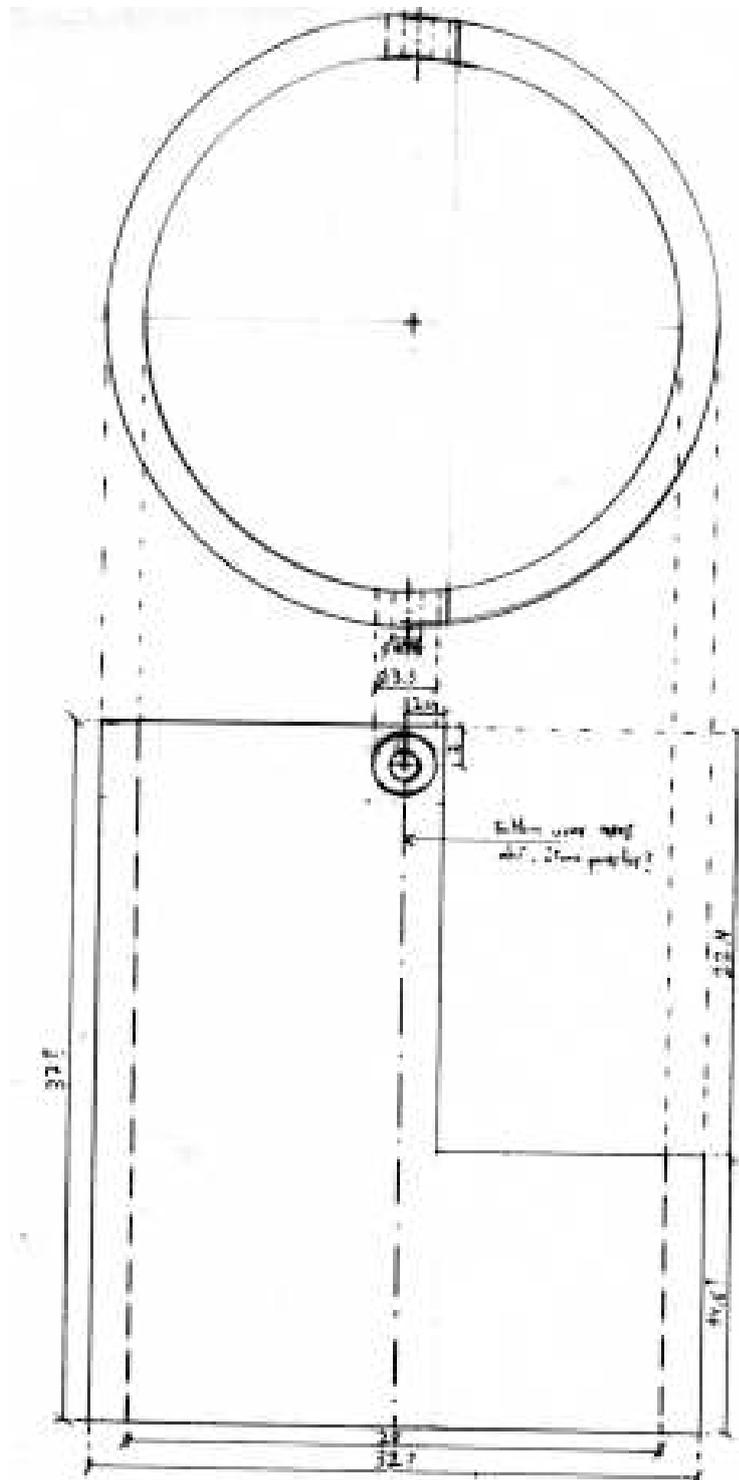


Figura 43. Diseño a mano alzada del autor del tubo superior de la torre del secundario telescópica. Se indican las posiciones de los orificios correspondientes al eje de la celda del espejo secundario. En su interior habría también una serie de rodamientos para su correcto engranaje. Las medidas son mayormente orientativas. El diseño original estaba a escala 1:4, y las acotaciones en *cm*.

No obstante, el diseño siguió evolucionando: una visita al C.A.I. (Centro de Asistencia a la Investigación) de la Universidad –el taller mecánico anteriormente referido– para preguntar por diámetros exteriores e interiores estándar de tubos de PVC para la construcción de la torre del secundario nos convenció de la imposibilidad técnica e impracticabilidad de dicho diseño, debido, esencialmente, al enorme peso y dificultad de transporte del aparato.

De esta forma descartamos la torre telescópica. Pero, a resultas de la conversación, el responsable del taller mecánico nos sugirió construir, no una, sino *dos* torres telescópicas. Mucho menos espesas y gruesas, no obstante, sirviendo cada una de barra de sujeción para el eje del espejo secundario. Dichas barras telescópicas irían firmemente soldadas a una base cilíndrica en la que se practicaría un orificio para el objetivo del telescopio. Esta base descansaría sobre otra, sobre la cual, además, podría girar en Acimut con cierta libertad. Se puede observar la idea inicial en la Figura 44.

Las ventajas de este diseño respecto a los anteriores resultaban evidentes. Para empezar, tanto su estructura como su material –aluminio, en principio– permitirían su transporte y manipulación con cierta facilidad, pudiendo además elevarse sin mucho problema hasta bastante altura en la cúpula. El sistema entero podría girar en Acimut, por si en el futuro se cambiase el montaje del espejo primario de posición en la cúpula.

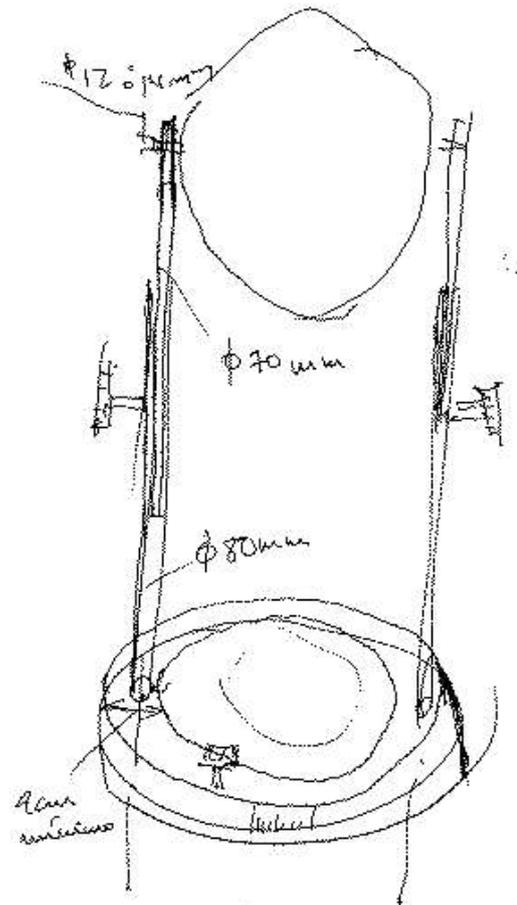


Figura 44. Boceto a mano alzada del responsable del taller mecánico de la torre del secundario que luego resultaría la definitiva.

Además de la nueva idea de diseño de la torre del secundario de este modo, surgió una buena idea que resolvería el problema de la excesiva altura de la torre del secundario: Sustituir el eje del espejo primario por otro eje acoplado a una horma con forma de anillo, en la que iría engarzado otro eje transversal al primero, que llevaría sujeta la celda del espejo. De esta manera, además del giro del primario en ascensión recta, proporcionado por el primer eje, el espejo primario podría también girar en declinación, gracias al nuevo eje transversal, consiguiendo así una declinación *efectiva* regulable por nosotros. Así, podríamos mandar la luz del Sol en invierno en la dirección natural que llevaría ésta en verano, y el problema de la altura quedaría solucionado de forma cómoda y elegante.

Con ayuda de Antonio de Ugarte, realizamos unos diseños más avanzados usando un programa de diseño asistido por ordenador. Estos pueden verse en las Figuras 45 a la 49.

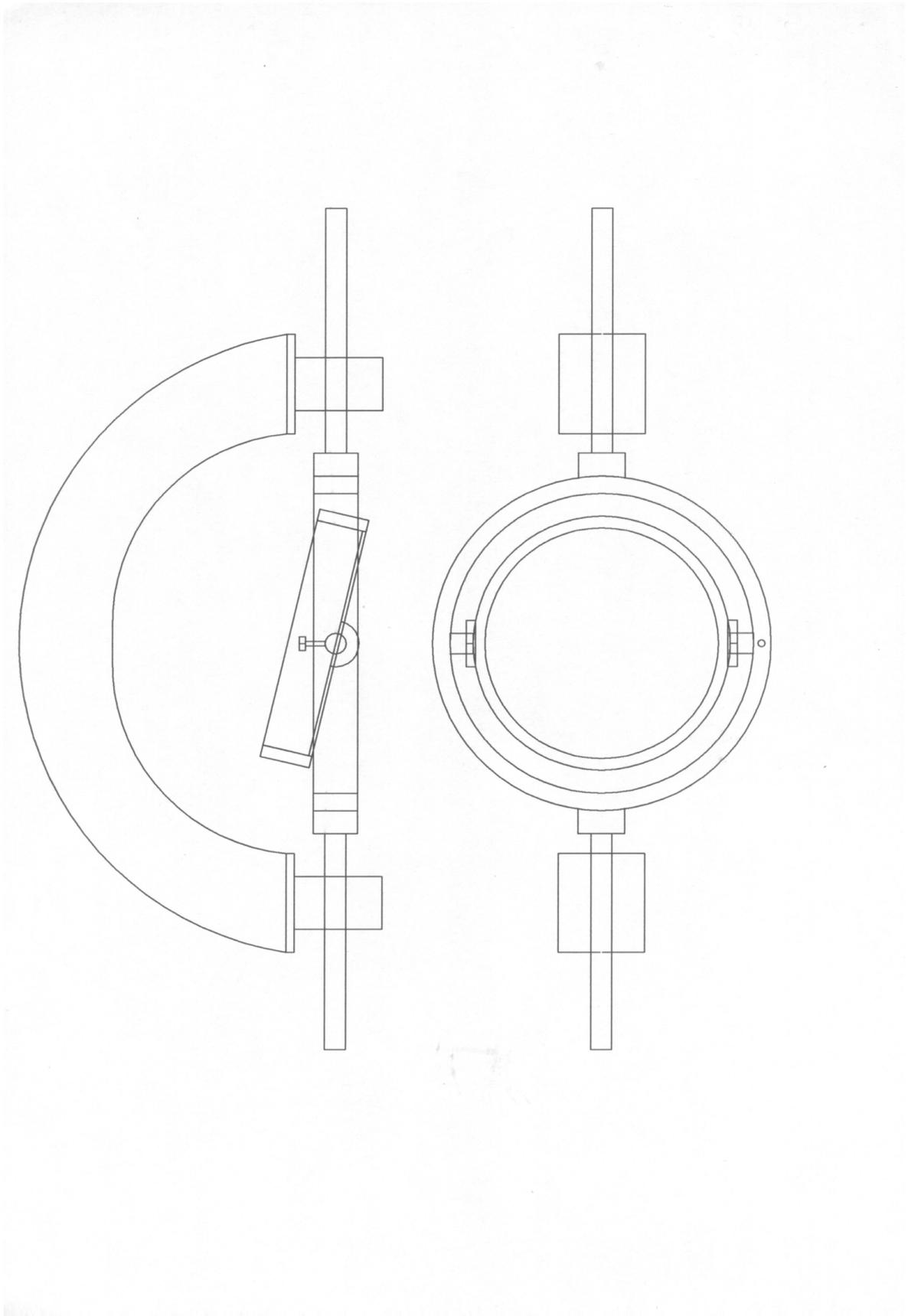


Figura 45. Diseño del eje de la celda del espejo primario, realizado con ayuda de Antonio de Ugarte. La posición de la celda en declinación quedaría fijada por el tornillo. Se ha incluido una pieza del primario original para mayor claridad de visión. En este dibujo no se ha incluido cota alguna.

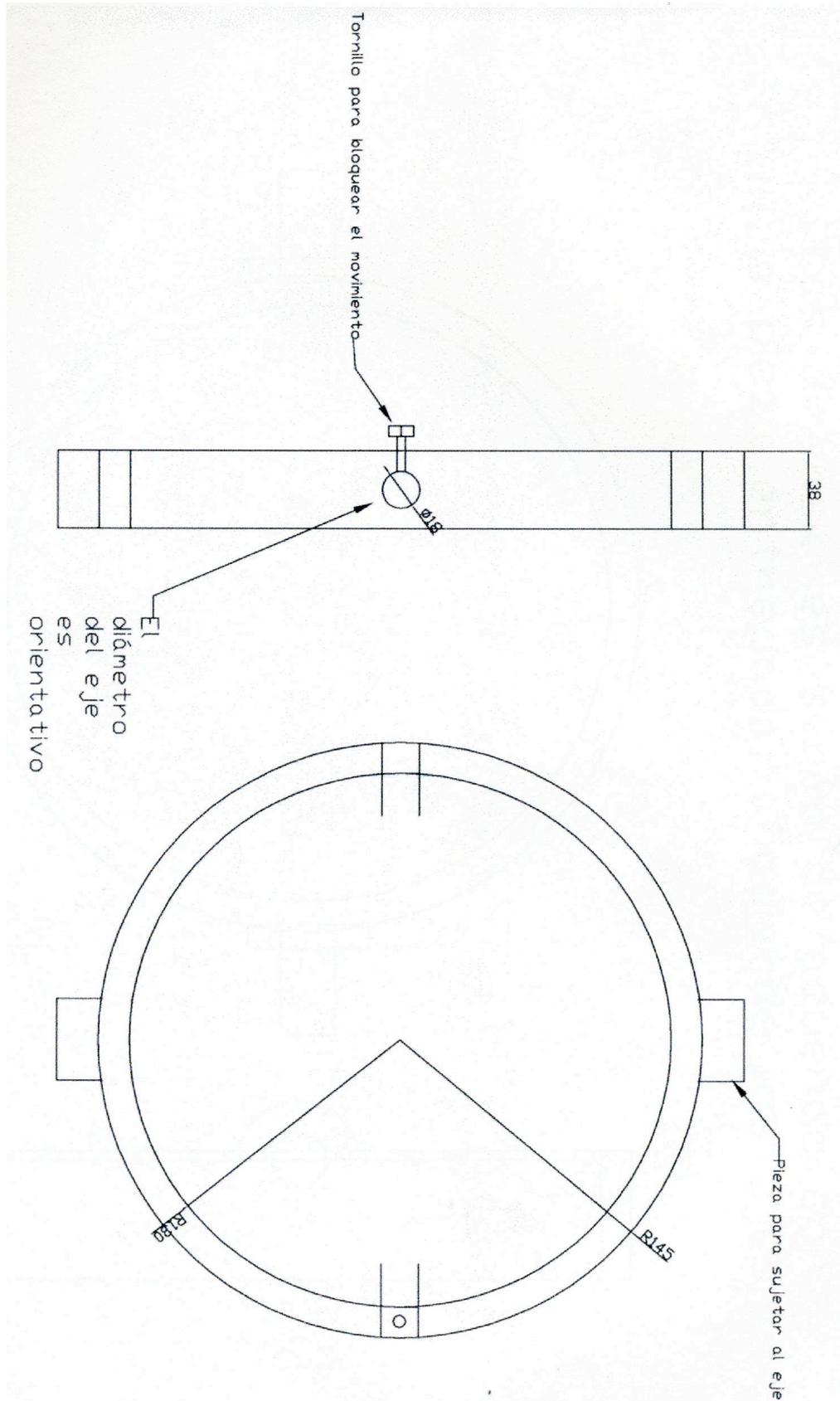
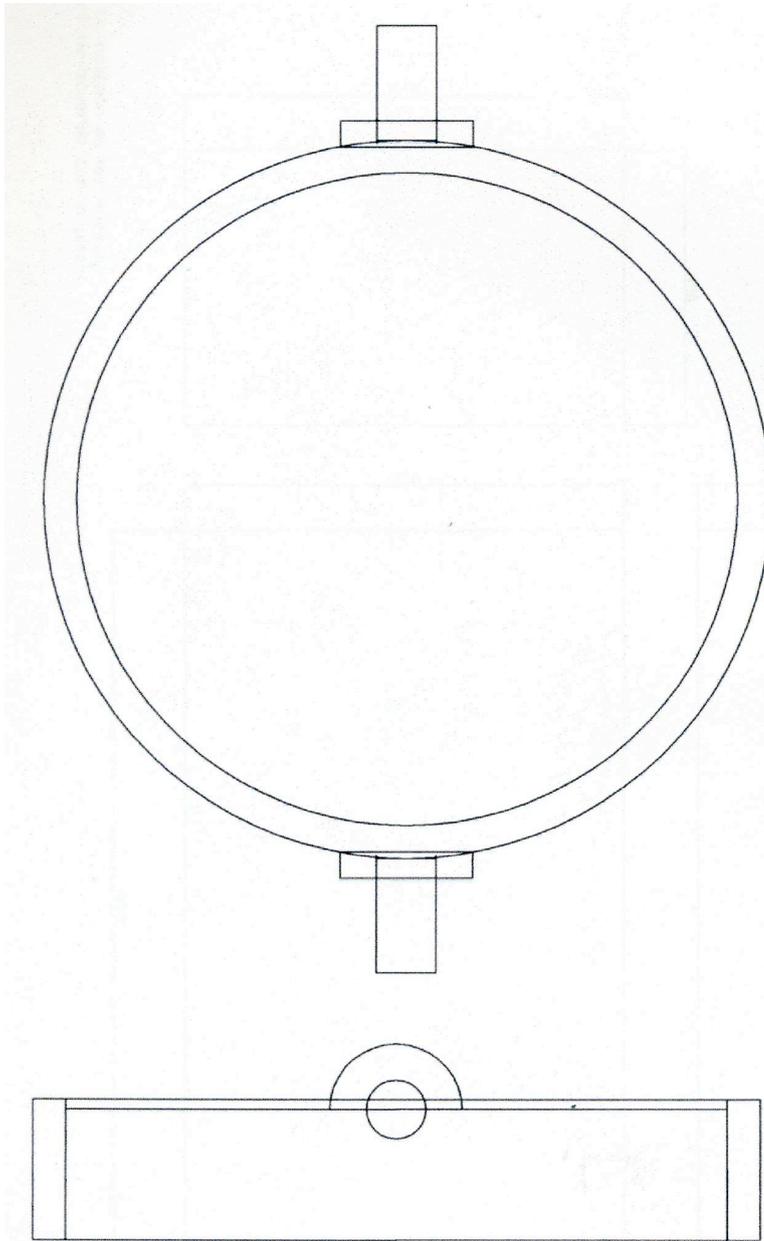


Figura 46. Diseño de la horma para el giro en declinación del espejo primario, realizado con ayuda de Antonio de Ugarte. La posición de la celda en declinación quedaría fijada por el tornillo. Las cotas figuran en *mm*.



Las dimensiones serán de acuerdo con la pieza entregada, añadiendo los ejes

Figura 47. Diseño de las celdas de los espejos primario y secundario, realizado con ayuda de Antonio de Ugarte. El centro de los ejes de giro deberían estar al mismo nivel que las superficies de los espejos. En este dibujo no se ha incluido cota alguna.

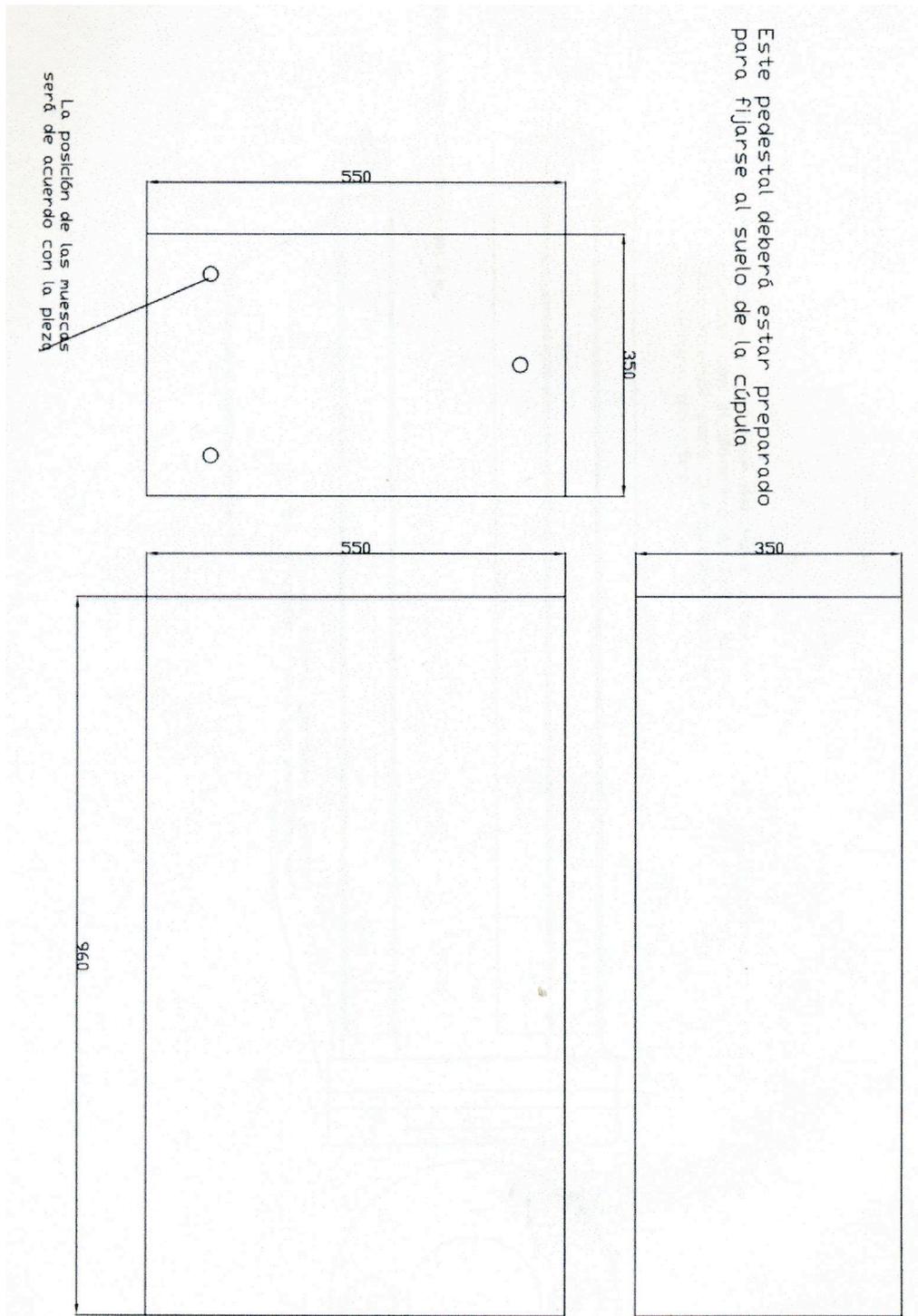


Figura 48. Diseño del pilar del primario, realizado con ayuda de Antonio de Ugarte. El pilar debería ir provisto de muescas para atornillar adecuadamente el montaje primario. Las cotas figuran en *mm*.

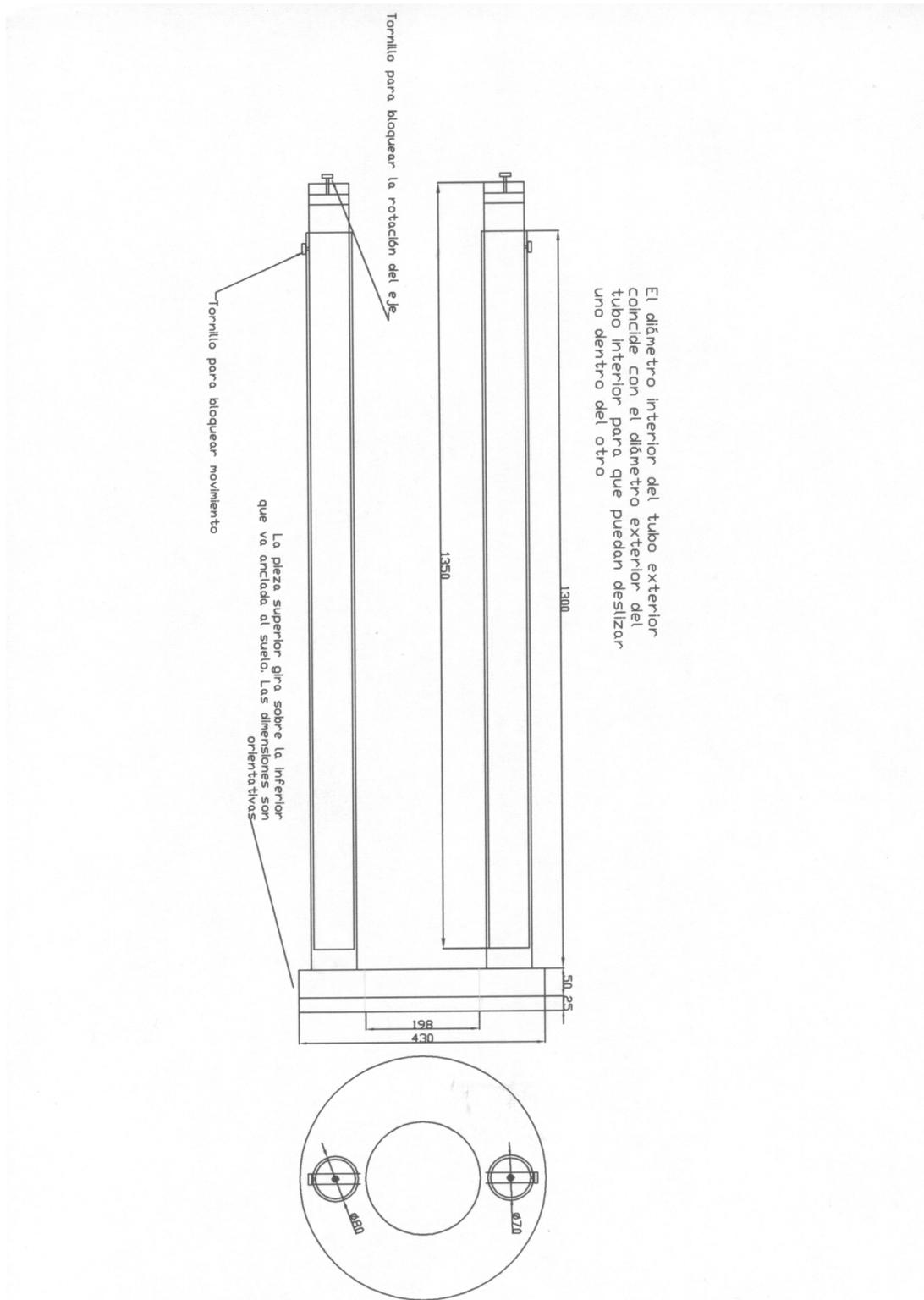


Figura 49. Diseño de la torre del espejo secundario, realizado con ayuda de Antonio de Ugarte. En la parte superior se incluyen sendos tornillos para afianzar la celda del espejo en una posición concreta. La pieza sobre la base permite el giro en Acimut de todo el sistema sobre ésta. Las cotas figuran en *mm*.

4.2.2. Diseños Finales

Los últimos diseños de la sección anterior no sirvieron para la construcción del aparato, debido a su carácter no profesional. De ahí la necesidad trabajar en estrecha colaboración con el delineante del C.A.I. de la Universidad, José Luis Corral.

Durante meses estuvimos en contacto con él, solucionando nuevos problemas que iban surgiendo, e implementando nuevas mejoras al diseño definitivo. No obstante, en la fecha de escritura de esta memoria, el diseño no está completamente terminado. Tan sólo queda ensanchar un poco la torre del secundario para poder introducir dos piñones perpendiculares que ajusten la celda del espejo secundario a la posición correcta. Dichos piñones ya están diseñados, y quedan tan sólo cambios menores, por tanto, por realizar.

De esta manera, se incluyen aquí los diseños prácticamente definitivos, a espera de esa pequeña remodelación que ha de llevarse a cabo en el mes de Julio, presumiblemente. Estos diseños ya tienen carácter profesional y serán enviados al taller mecánico tan pronto como sean finalizados por completo, para la inmediata construcción del celostato.

En las siguientes páginas pueden verse dichos diseños, así como una serie de vistas tridimensionales *renderizadas* (procesadas informáticamente) de la torre del espejo secundario.



Figura 50. Vista tridimensional informatizada de la celda del espejo secundario, instalada en su torre, realizada por José Luis Corral. Los tornillos que ajustan la celda requieren la inclusión de dos piñones perpendiculares que harán que la anchura global del montaje aumente unos pocos *cm*.



Figura 51. Dos vistas tridimensionales informatizadas de la torre del espejo secundario, realizadas por José Luis Corral.

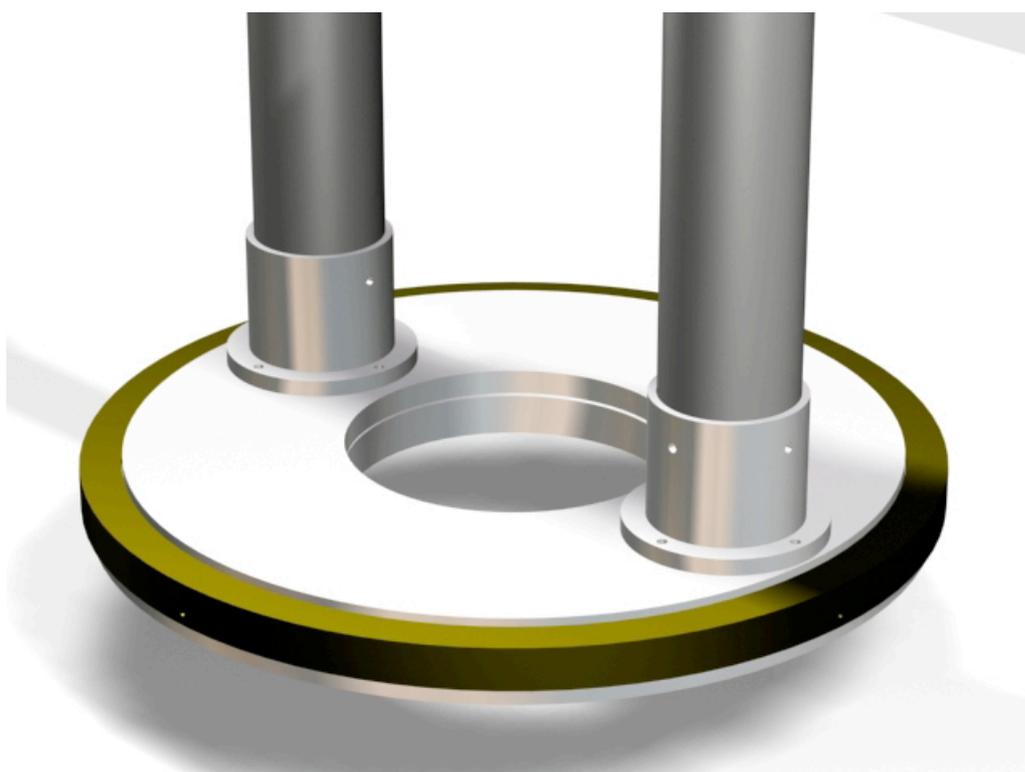


Figura 52. Vista tridimensional informatizada de la base de la torre del espejo secundario, realizada por José Luis Corral.

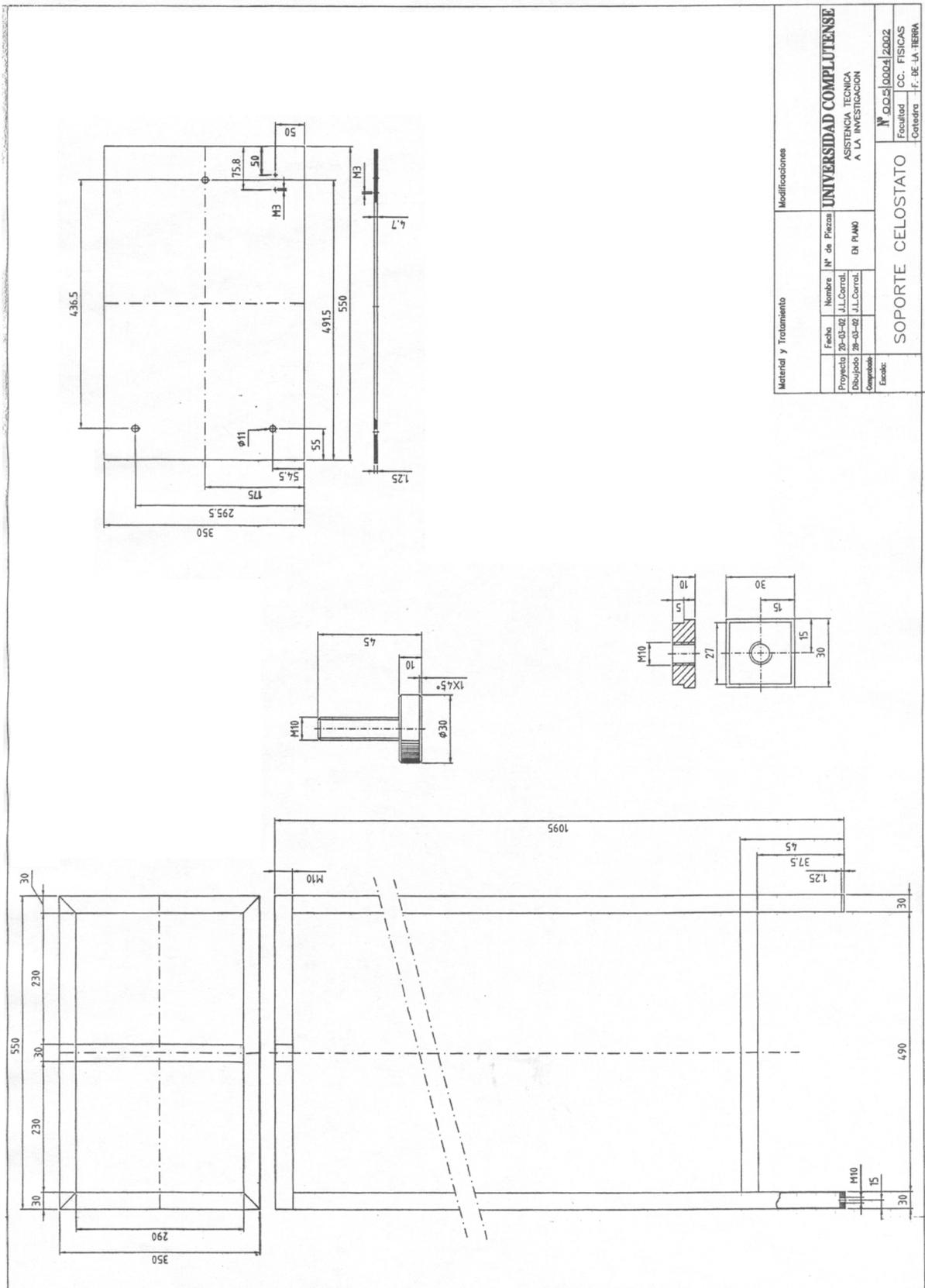


Figura 53. Diseño final del pilar del primario, realizado en colaboración con José Luis Corral.

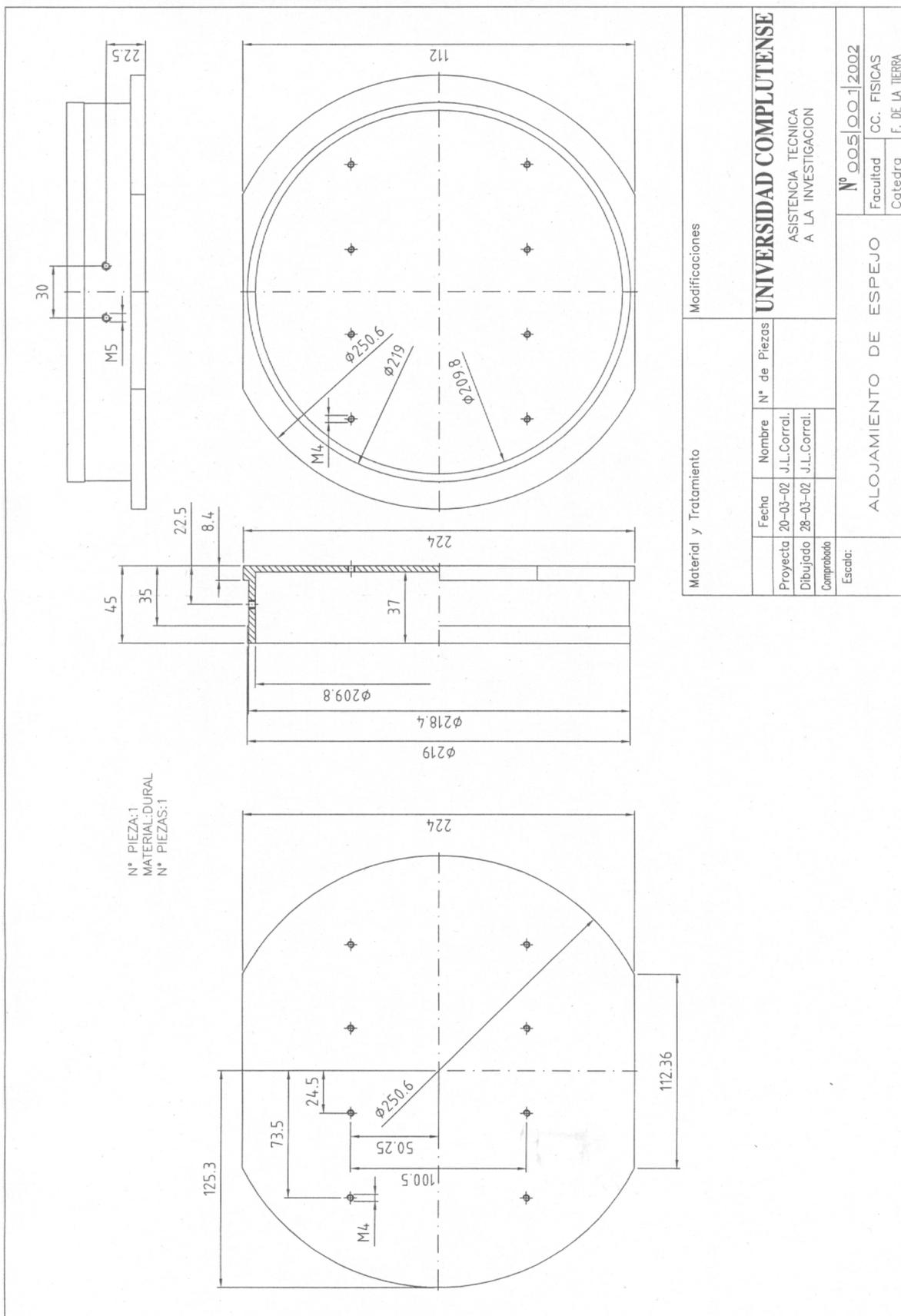


Figura 55. Diseño final de las celdas donde se alojan ambos espejos, realizado en colaboración con José Luis Corral. Aunque originalmente ambas tenían profundidades algo diferentes se acordó hacer ambas iguales y nivelarlas adecuadamente al introducir los espejos en ellas.

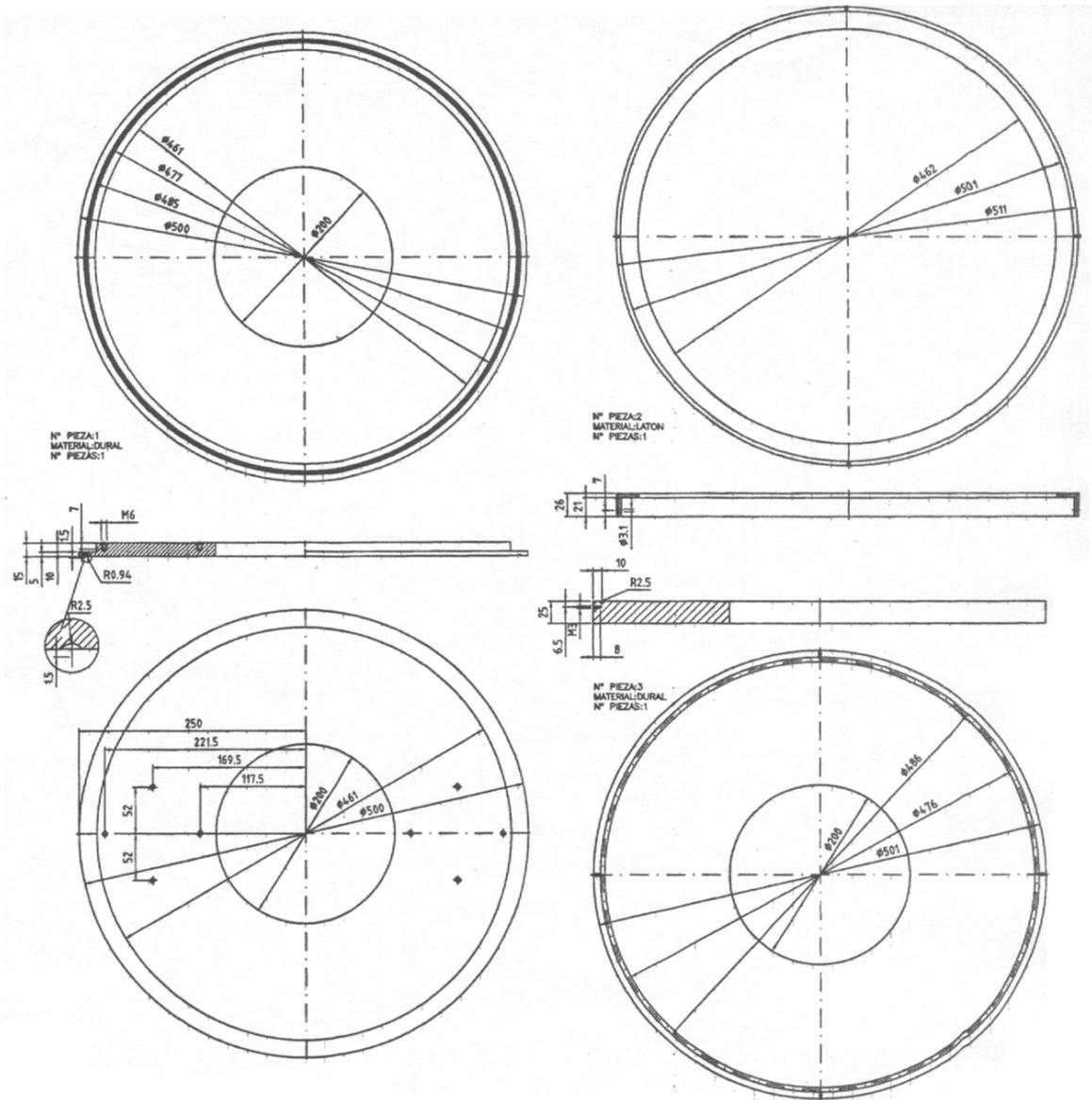


Figura 56. Diseño de la base de la torre del espejo secundario, realizado en colaboración con José Luis Corral. Este diseño no es el definitivo en cuanto a cotas, que están siendo modificadas debido a la inclusión de piñones para el adecuado giro de la celda en la torre.

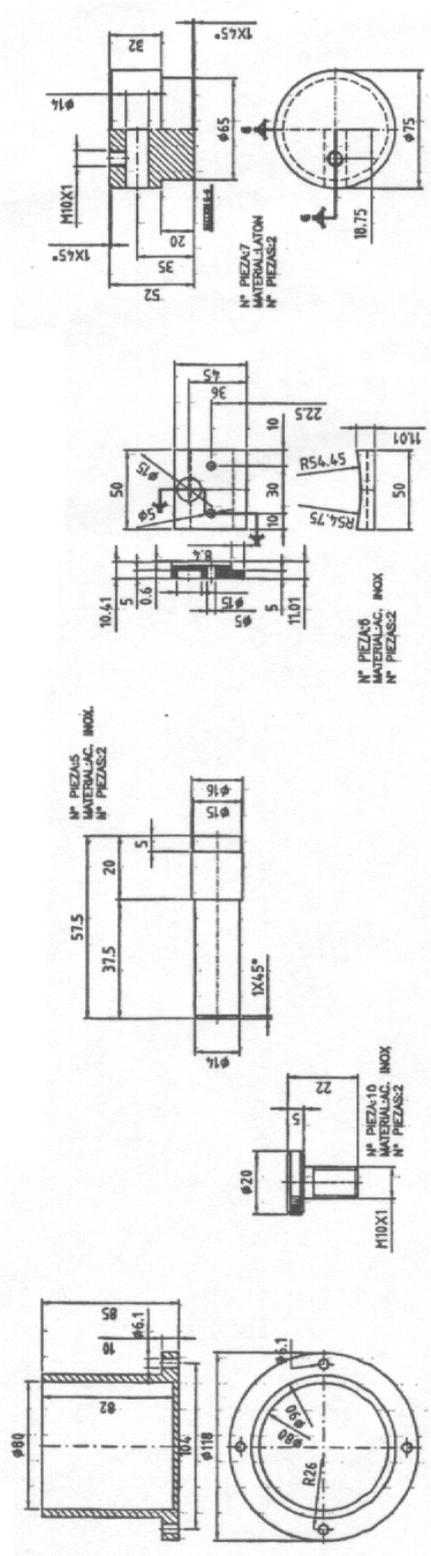


Figura 57. Diseño de piezas de la torre del espejo secundario, realizado en colaboración con José Luis Corral. Este diseño no es el definitivo en cuanto a cotas, que están siendo modificadas debido a la inclusión de piñones para el adecuado giro de la celda en la torre.

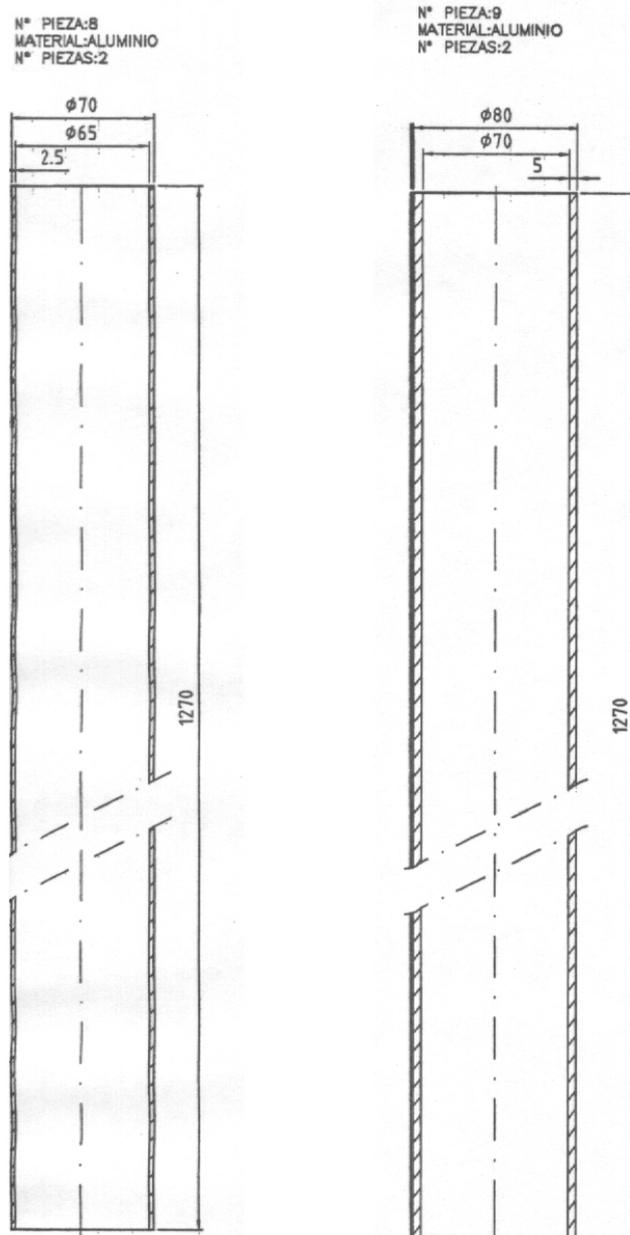


Figura 58. Diseño de las barras telescópicas de la torre del espejo secundario, realizado en colaboración con José Luis Corral. Este diseño no es el definitivo en cuanto a cotas, que están siendo modificadas debido a la inclusión de piñones para el adecuado giro de la celda en la torre.

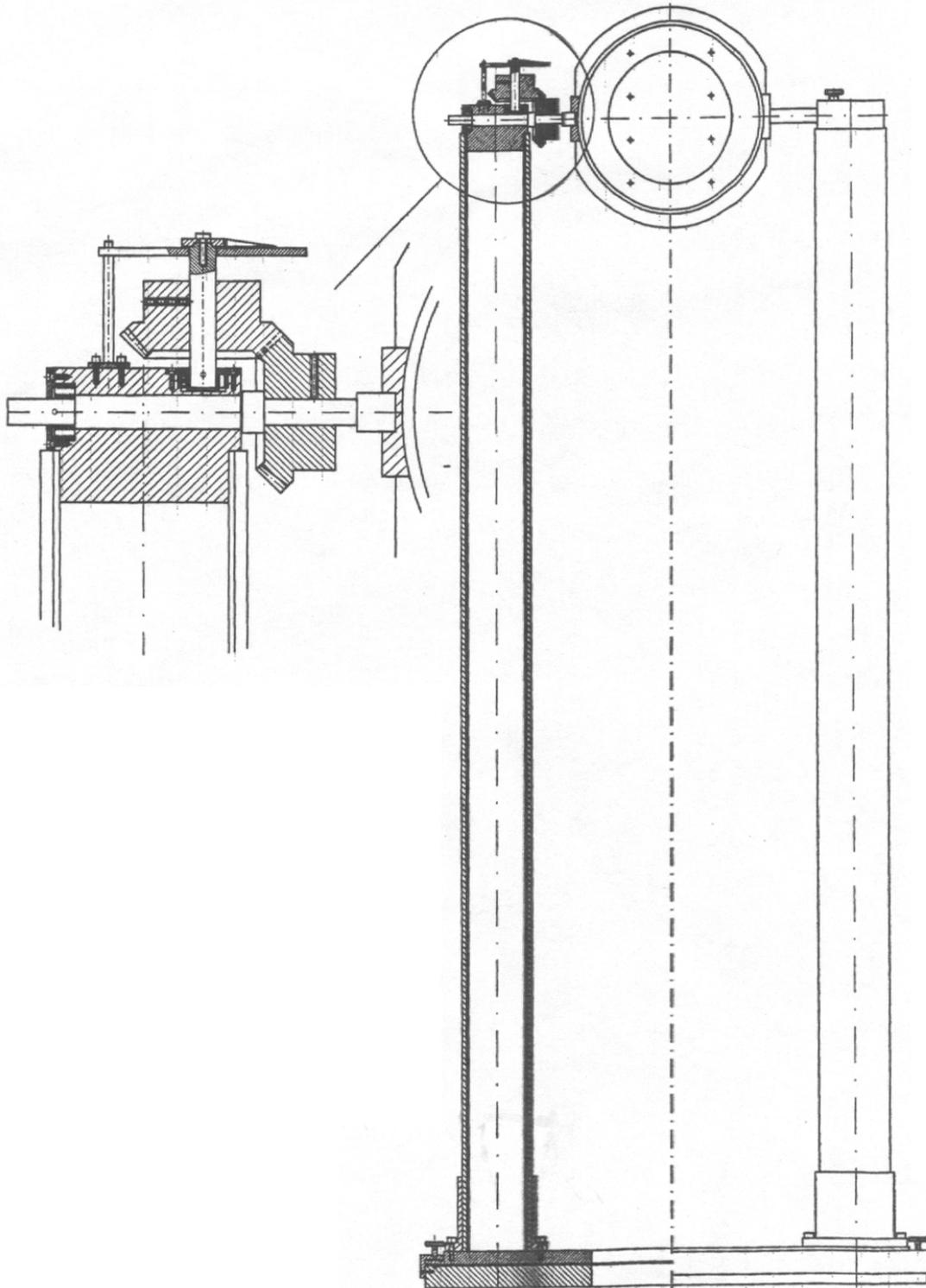


Figura 59. Diseño de la torre del espejo secundario, realizado en colaboración con José Luis Corral. Este diseño no es el definitivo en cuanto a cotas, que están siendo modificadas debido a la inclusión de piñones para el adecuado giro de la celda en la torre, como puede verse en el área ampliada en la figura.

5. Conclusiones

La importancia del proyecto completo del espectroheliógrafo de la U.C.M. es evidente tanto por su contribución a la investigación científica como por su utilización en los programas de asignaturas prácticas para el alumnado de la universidad en la que el proyecto se enclava.

El celostato, como parte de ese proyecto, tiene su relevancia, por varias razones. Una de ellas, aunque no la más importante, es, a mi juicio, interesante, y no se ha expresado con anterioridad en esta memoria: La reutilización de un aparato antiguo, que, de no ser por el proyecto, seguiría probablemente olvidado en algún armario hasta que llegara un uso adecuado para él. Dicha reutilización pasa por la remodelación necesaria del aparato, adaptándose a las necesidades del proyecto en sí.

Por otro lado, el trabajo realizado ha requerido una considerable cantidad de tiempo, y el esfuerzo combinado de gran número de personas. Tal vez, debido a esto, la efectiva construcción del celostato ha resultado imposible en un periodo de tiempo tan corto.

Lamentablemente, el celostato por sí solo no contribuye mucho a la idea para la que fue diseñado, su uso como parte integrada del espectroheliógrafo. Excepto la parte del celostato, dicho proyecto se encuentra parado en la actualidad por diversas razones, y existe la peligrosa posibilidad de su discontinuidad. Creo que esto sería un tremendo error, y que deberían buscarse los medios adecuados para la finalización del proyecto completo, de un modo u otro, a corto o medio plazo, al menos.

Por supuesto, recomiendo la continuación del trabajo desde el comienzo del curso 2002-2003 hasta la finalización del mismo, con la instalación del celostato en la cúpula Oeste del Observatorio U.C.M. Alguna de las tareas asociadas a dicho trabajo, tendrían que ver con los motores y su uso en el celostato con el nuevo diseño. Habría que comprobar si se pueden usar esos motores, debido a que tal vez el peso añadido de la horma de la celda del espejo primario descompense el giro bien sincronizado del motor. Asimismo, podría estudiarse la posibilidad de uso del celostato para fijar correctamente un área de cielo, debido a la pequeña, aunque necesaria, diferencia entre las velocidades del sol y de la esfera celeste. Y, si el proyecto entero llegara a funcionar, podrían plantearse como parte de algún trabajo dirigido la elaboración de prácticas con el espectroheliógrafo.

6. Bibliografía

Para el presente trabajo se realizó una labor de documentación solamente para la introducción, puesto que para el resto del trabajo no se requirió bibliografía alguna. Dicha documentación tuvo lugar en multitud de páginas de internet, destacando entre ellas las siguientes.

[http : //www.auroville.org/thecity/matrimandir/mm_main.htm](http://www.auroville.org/thecity/matrimandir/mm_main.htm)

[http : //www.astro.uchicago.edu/yerkes/virtualmuseum/Heliostat.html](http://www.astro.uchicago.edu/yerkes/virtualmuseum/Heliostat.html)

[http : //www.na.infn.it/Museum_old/Optics_3.html](http://www.na.infn.it/Museum_old/Optics_3.html)

7. Agradecimientos

A lo largo del trabajo realizado, ha habido varias personas a las que estoy agradecido, por diversas razones. En primer lugar, agradezco a Jaime Zamorano su forma de dirigir el trabajo, dándome toda la libertad de acción, horarios e ideas que necesité, así como por su evidente implicación en el mismo.

En segundo lugar, le estoy muy agradecido a Antonio Verdet por su enorme apoyo en el trabajo desde el comienzo, realizando una serie de tareas que propiamente no le correspondían o no eran competencia suya, y por su filosofía en ese sentido, así como por los buenos ratos que pasé con él.

También agradezco la colaboración de Antonio de Ugarte, quien, además de permitirme realizar los diseños en su casa —e invitarme a comer para ello—, ha sido una referencia para el proyecto entero del espectroheliógrafo.

Asímismo, agradezco a José Luis Corral su colaboración en el proyecto, sobre todo por las vistas *renderizadas* que realizó, que no eran, desde luego, obligación suya.

Y por último, aunque no menos importante, les debo un agradecimiento a todas aquellas personas que me apoyaron, contribuyeron o colaboraron, de una u otra forma, a la elaboración de este trabajo.