



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

Trabajo Fin de Grado

Física

Adaptación de un sistema óptico para la medida de la irradiancia lunar

Autor: Daniel Revilla Martínez de Albéniz

Tutor/es: Ángel Máximo de Frutos Baraja

Resumen

A lo largo de este trabajo se ha implementado un sistema óptico colector que se utilizará en un espectrorradiómetro dotándole de la capacidad de tomar espectros lunares. Para ello, se eligió el telescopio como sistema óptico principal, caracterizando y determinando la focal del ocular que mejor se adaptase a la fibra de nuestro espectrorradiómetro. Posteriormente se diseñó, imprimió en 3D y probó un adaptador para acoplar la fibra óptica al ocular obteniendo espectros lunares satisfactorios.

Abstract

Throughout this work it has been implemented a collector optical system which will be used with a spectroradiometer, enabling it to make lunar spectra. For that reason, the telescope was chosen as mean optical system, characterizing and determining the eye piece focal length that best fitted the optical fiber of our spectroradiometer. After that, a 3D adapter was designed, printed and tested to connect the optical fiber and the eye piece, obtaining in this way suitable lunar spectra.

Índice general

1	Introducción	2
1.1	Introducción	2
1.2	Objetivos	2
2	Introducción teórica	3
2.1	Espectrorradiómetro de campo ASD FieldSpec	3
2.2	Sistema óptico elegido: telescopio	4
2.3	Limitación correcta de campo	5
2.4	Ocular elegido. Pupila de salida	10
2.4.1	Diámetro de la P.S.	10
2.4.2	Posición de la P.S.	11
3	Determinación experimental de la pupila de salida	13
3.1	Material utilizado	13
3.2	Montaje experimental	13
4	Desarrollo del adaptador ocular-fibra óptica	17
4.1	Diseño	17
4.2	Impresión en impresora 3D	19
5	Resultados	20
5.1	Resultados de la pupila de salida para los oculares elegidos	20
5.1.1	Posición de la pupila de salida	20
5.1.2	Diámetro de la pupila de salida	21
5.1.3	Adaptador impreso en 3D	22
5.1.4	Prueba de campo: obtención de un espectro lunar	22
5.1.5	Calibración	23
5.2	Conclusiones	24

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Vivimos inmersos en un medio que resulta transparente a nuestros ojos. En él y delante de ellos ocurren constantemente reacciones y procesos físicos imperceptibles por su pequeña escala.

Este medio, el aire, está compuesto por una infinidad de componentes: desde los gases que nos permiten respirar y mantienen caliente nuestra atmósfera como el N₂, O₂, CO₂... hasta los aerosoles que nos brindan bonitos atardeceres rojos o intensos cielos azules. Unos son naturales, otros antropogénicos, pero todos en su cierta medida influyen en la física atmosférica, clima y la vida humana. Por ello, hoy en día disponemos de multitud de instrumentos para medir estos componentes, cuantificar sus efectos y estudiar el comportamiento de la atmósfera.

El grupo de Óptica atmosférica de la UVa (GOA) trabaja principalmente con fotómetros, radiómetros y Lidar, capaces de medir la radiancia, la irradiancia, altura de las nubes y cantidad y naturaleza de partículas en el aire.

Muchos de estos instrumentos miden la luz solar dispersada por las partículas en suspensión, variando la medida en función del tipo y cantidad de partículas que haya en ese momento en la atmósfera. El hecho de usar la luz solar es el principal hándicap de esta instrumentación, puesto que al llegar la noche perdemos nuestra fuente de iluminación y con ello los datos nocturnos de la composición atmosférica.

Esto cobra especial relevancia cuando pretendemos tomar medidas durante las largas noches en regiones polares, llegando a alcanzar los seis meses de duración. Es esencial la determinación de los componentes atmosféricos en estas zonas para poder tener un mejor conocimiento del cambio climático y su impacto en esas áreas.

Las medidas continuadas durante largos periodos son la única herramienta que tenemos para investigar las tendencias climáticas de estas regiones tan críticas y con tanto potencial de influir y ser influidas por el resto del mundo.

Por tanto, resulta de especial interés el desarrollo de instrumentación que nos permitan cubrir ese vacío en los datos dejados por la noche.

1.2 Objetivos

Nuestro objetivo a lo largo de este trabajo será el de implementar un sistema óptico que colecte la luz procedente del disco lunar sobre la fibra óptica de un espectrorradiómetro. Aprovecharemos un espectrorradiómetro cuya finalidad original no era la de tomar medidas lunares, sino de vegetación, pero que tras una adaptación será capaz de realizarlas.

Con ello podremos tomar datos tanto de irradiancia como espectrales en ausencia de luz solar, dando así continuidad a las medidas diurnas.

Capítulo 2

Introducción teórica

2.1 Espectrorradiómetro de campo ASD FieldSpec

El espectrorradiómetro de campo ASD (Analytical Spectral Devices) FieldSpec Pro será el corazón de nuestro equipo.



Figura 2.1: Espectrorradiómetro de campo ASD

Se trata de un espectrorradiómetro portátil ideado para tomar medidas espectrales de vegetación, terrenos, minerales etc. Su rango espectral de operación va de los 350nm hasta los 2500nm, cubriendo desde el espectro visible hasta el infrarrojo medio.

Dispone de dos partes diferenciadas: la fibra óptica, y el espectrorradiómetro. La fibra óptica cuenta con varios cabezales intercambiables de varios campos de visión distintos aunque nosotros no haremos uso de ninguno de ellos. El campo de visión de la fibra desnuda es de 25° , dato a tener en cuenta a la hora de diseñar el sistema óptico que antepongamos a su entrada. Una vez que la luz entra a la fibra, esta la dirige al interior del espectrorradiómetro, proyectándola sobre una red de difracción holográfica móvil donde se descompone en varias longitudes de onda y se refleja en cada uno de los tres sensores optimizados para distintas longitudes de onda. La red de difracción realiza un rápido barrido sobre los tres sensores, generando así tres espectros en intervalos de longitud de onda distintos, que al unirse mediante software, generan el espectro total.

El diámetro de la fibra óptica es de $1,85mm$, y el extremo de la misma viene protegido por un cabezal metálico de las dimensiones indicadas en la Figura 2.2 (b).

Con estas medidas trabajaremos para desarrollar el adaptador que veremos más adelante.

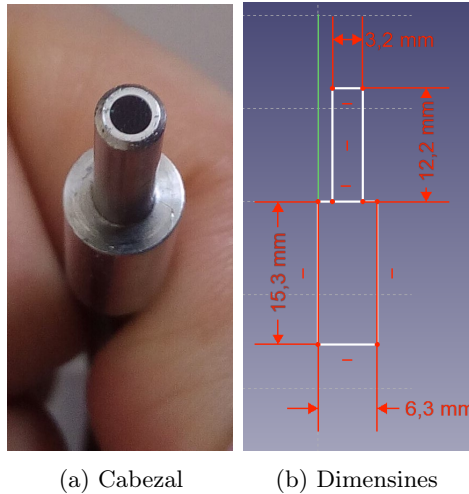


Figura 2.2: Cabezal y sus dimensiones.

2.2 Sistema óptico elegido: telescopio

La pequeña superficie de entrada de la fibra óptica hace imposible que la usemos para analizar la luz de la Luna de la misma forma de la que fue diseñado para usarse en medidas de campo, puesto que si apuntásemos la fibra desnuda a la Luna, apenas recibiríamos señal. Por ello se necesita un sistema óptico que colecte la luz lunar con una gran apertura y la proyecte sobre la fibra.

En un primer momento se pensó en una simple lente convergente de mayor diámetro que el de la fibra, de tal forma que todos los rayos de luz que entrasen por esa superficie convergieran en un punto en la fibra. De la mano de esta idea llegó el primer problema: El sistema motorizado que moverá el sistema óptico y seguirá el movimiento de la Luna para que constantemente esté apuntando a ella no es muy preciso, por lo que presenta vibraciones y movimientos de deriva que podrían causar que la imagen de la Luna se saliese de la superficie de la fibra, causando discontinuidades en las medidas.

A esto se le añadió un segundo problema. La fibra óptica al entrar en el espectrorradiómetro proyecta la luz sobre la red de difracción que luego barre los tres sensores anteriormente mencionados. Si la luz no es uniforme en la fibra óptica, y como en el caso de la lente convergente toda la luz se proyectase en un único punto de la superficie, podría resultar que esa luz no llegase a todos los sensores por igual, creando falsas intensidades en los distintas partes del espectro para una misma intensidad incidente.

Por tanto, queda descartada la idea de formar imagen sobre la fibra óptica.

La solución fue usar el primer sistema óptico compuesto de la historia: el telescopio. A diferencia de la lente convergente que genera una imagen de un objeto en el infinito en su plano focal, el telescopio proyecta el objeto situado en el infinito, en una imagen situada en el infinito. Esto se consigue combinando dos lentes convergentes, foco con foco.

En la Figura 2.3 podemos observar el esquema de los componentes de un telescopio. La clave del funcionamiento del telescopio reside en la coincidencia del plano focal objeto del ocular con el plano focal imagen del objetivo. De esta forma, los rayos paralelos procedentes de la Luna (a efectos prácticos situada en el infinito) al atravesar el objetivo convergen en el plano focal imagen del objetivo, formando una imagen. Ahí entra en juego la superposición del plano focal objeto del ocular en ese mismo punto, puesto que al estar esta imagen intermedia situada en el plano focal, produce su imagen a través del ocular en el infinito, saliendo rayos paralelos.

Habiendo elegido el telescopio como sistema óptico conseguimos recoger mucha más luz que habiendo usado únicamente la fibra óptica desnuda, puesto que tenemos libertad a la hora de

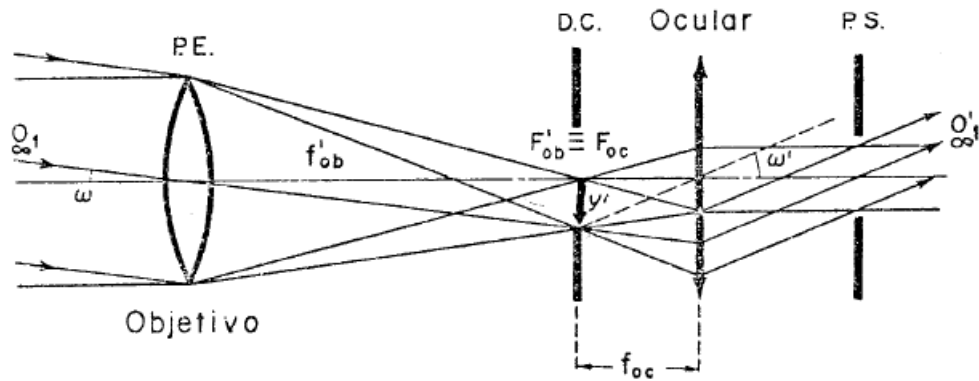


Figura 2.3: Esquema sistema óptico del telescopio

elegir la apertura del telescopio. También nos da la versatilidad de jugar con los aumentos y diámetro del haz emergente como veremos en las próximas líneas.

Aumentos

Los aumentos en un sistema óptico se denominan con la letra griega Γ' , y vienen definidos por la razón de las tangentes de los ángulos bajo los que se ve un objeto tanto con el instrumento como sin él. Particularizando en el caso de la Luna, al verla a simple vista la vemos pequeña, en concreto con un ángulo de medio grado de extensión. En cambio, al verla a través de un telescopio, la imagen es mucho más grande, y el ángulo necesario para cubrirla siendo el vértice nuestro ojo es mucho mayor.

En la Figura 2.3 se representa este ángulo por ω y ω' . Por lo tanto, los aumentos proporcionados por un telescopio son:

$$\Gamma' = \frac{tg\omega'}{tg\omega} \quad (2.1)$$

Que llamando p y p' a los radios de las pupilas de entrada y salida se nos reduce a la ecuación más utilizada:

$$\Gamma' = -\frac{f'_{ob}}{f'_{oc}} = -\frac{p}{p'} \quad (2.2)$$

De este resultado extraemos que los aumentos proporcionados por un telescopio vienen dados tanto por la relación de las distancias focales del objetivo y del ocular como de la relación entre los radios de la pupila de entrada (p) y la pupila de salida (p'). Como el objetivo de un telescopio es fijo pero los oculares intercambiables, estos serán los que nos darán la opción de elegir el aumento más propicio para nuestro desempeño.

2.3 Limitación correcta de campo

Antes de que los rayos de luz entren en un sistema óptico, podemos considerar que viajan libremente, sin sufrir obstaculización alguna. Pero una vez entran en un instrumento, sufren limitaciones debido a los componentes del sistema, como pueden ser las monturas de las lentes o diafragmas. Estos últimos son los que nos permiten limitar a nuestro antojo estos haces de luz, pudiendo así corregir o minimizar aberraciones, variar la intensidad de las imágenes etc.

Atendiendo a esto, existen dos tipos de diafragmas, ambos a tener en cuenta: *diafragma de campo* y *diafragma de apertura*.

Diafragma de apertura

El diafragma de apertura (D.A.) es el orificio que limita la extensión del haz de luz que entra en el sistema por su eje.

Para determinar cual es el diafragma de nuestro sistema, basta con hallar las imágenes de todas

los elementos limitantes (monturas y diafragmas) a través del sistema que les antecede. Una vez tenemos estas imágenes, la que subtienda el menor ángulo desde el objeto será originada por el diafragma de apertura. Esta imagen es la llamada *Pupila de Entrada (P.E.)*

Lo mismo puede realizarse hallando las imágenes del objeto, los diafragmas y monturas a través de la parte del sistema que las precede, trabajando en el espacio imagen. En este caso, la imagen del elemento limitante que subtendiese el menor ángulo desde la imagen del objeto es llamada *Pupila de Salida (P.S.)* y elemento limitante en sí el diafragma de apertura.

Todo esto puede llevarse y repetirse en el espacio de trabajo que se quiera.

Como ejemplo aclaratorio el siguiente esquema.

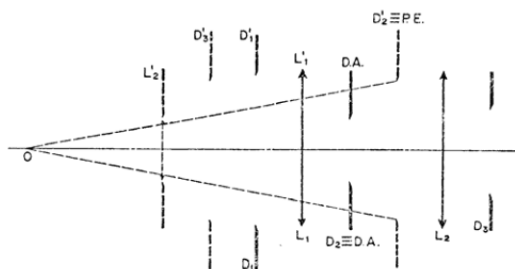


Figura 2.4: Ejemplo diafragmas de apertura

Aquí podemos observar en línea continua dos lentes: L_1 y L_2 y tres diafragmas: D_1 , D_2 y D_3 , mientras que en línea discontinua sus imágenes en el espacio objeto (habiendo construido sus imágenes a través de las lentes que preceden a cada elemento). Las imágenes están indicadas por el símbolo $'$. Observamos que no tienen que trasladarse todas las imágenes a la región anterior a todas las lentes (a la izquierda), ya que puede que alguna imagen sea virtual, como la de D_2' . Desde O miramos cual es el diafragma que menor ángulo subtende, resultando este D_2' , por lo que es el diafragma de apertura.

Diafragma de Campo

Este diafragma es el más crítico. Para ilustrarlo veamos el siguiente sistema.

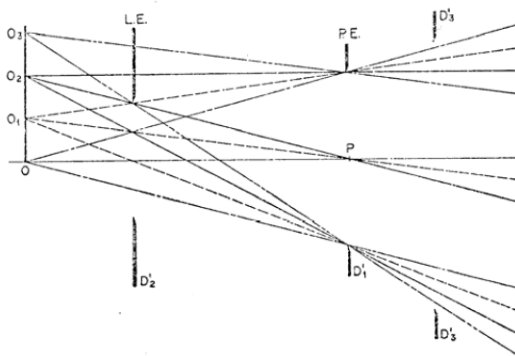


Figura 2.5: Ejemplo diafragmas de campo

Supongamos que las imágenes de todos los diafragmas de un sistema en el espacio objeto son D_1 , D_2 y D_3 . Estando el objeto O situado donde se ilustra, queda claro tras la lectura del apartado anterior que D_1' es la P.E. Si ahora nos desplazamos a lo largo del objeto, vemos que hasta O_1 pasan todos los rayos íntegramente, pero a partir de ese punto comienzan a ser obstaculizados por el diafragma D_2 (más bien por su imagen D_2'). Si siguiésemos desplazándonos por el objeto hasta O_3 , veríamos que solo atraviesa un rayo el sistema y a partir de ahí ninguno.

El primer diafragma que limita el campo: D_2 es el llamado *Diafragma de campo* y su imagen anterior D'_2 a través del sistema se denomina *Lucarna de entrada (L.E.)*. Si hiciésemos su imagen posterior a través del sistema, obtendríamos la *Lucarna de salida (L.S.)*.

La existencia de diafragmas de campo mal situados da lugar a la aparición del *viñeteo*, que en una imagen fotográfica se reconoce por ver negro o atenuado el contorno de la fotografía.

El siguiente esquema lo muestra.

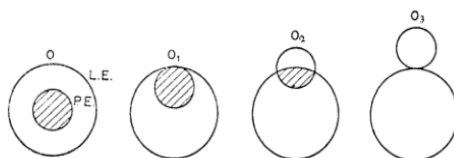


Figura 2.6: Efectos sobre un disco de luz del diafragma de campo

La forma correcta de situar el diafragma de campo la vamos a ilustrar con el caso que nos atañe: el telescopio.

Fijándonos en la Figura 2.7, vemos que la pupila de entrada coincide con el objetivo y que a través de ella entra un haz de luz representado por tres de sus componentes: RS siendo el rayo superior que entra por ese extremo, RI el rayo inferior y RP siendo el rayo principal que pasa por el centro de la pupila.

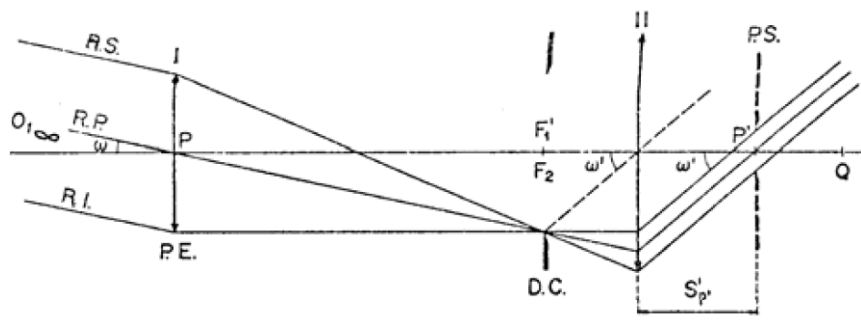


Figura 2.7: Esquema diafragmas del telescopio

La pupila de entrada es la que limita la luz que entra en el sistema, por lo que por ella pueden entrar sin limitación alguna haces que lleguen con cualquier inclinación sobre el eje. Siguiendo el trazado de los rayos, este haz converge en el plano focal del objetivo. Ahí es donde se deberá de colocar el diafragma de campo, consiguiendo una limitación nítida sin presencia de viñeteo en la imagen.

La pupila de salida se situará en P' y por ella saldrán todos los rayos que entren por la pupila de entrada. La posición de la pupila de salida es en la que tendremos que situar nuestro ojo o sistema de medición para conseguir que recoja todos los rayos proporcionados por el objeto observado y observar todo el campo a la vez. En caso contrario, por ejemplo, de situar nuestro ojo o aparato de medida en un punto más lejano o cercano, llamado Q en la Figura 2.7, deberíamos de desplazarnos perpendicularmente al eje del sistema para poder contemplar el campo en su totalidad y tendríamos una imagen con sombras, puesto que no todos los rayos llegan simultáneamente.

Para ilustrar la crucial importancia y lo crítico que es situar el detector sobre la pupila de salida, veremos las consecuencias de no situarlo ahí en un ejemplo práctico de campo y de día. Para ello, primero veremos qué ocurre si nos desplazamos paralelamente al plano de la pupila de salida, es decir, hacia la derecha e izquierda, o hacia arriba y abajo.

Si disponemos un telescopio apuntando a un objeto y colocamos nuestro ojo (en concreto la pupila de nuestro ojo) justo en la posición de la pupila de salida del ocular, observaremos simultáneamente

todos los rayos que entren por el telescopio, formando una imagen ampliada del objeto apuntado. En nuestro caso hemos sustituido el ojo por una cámara fotográfica.

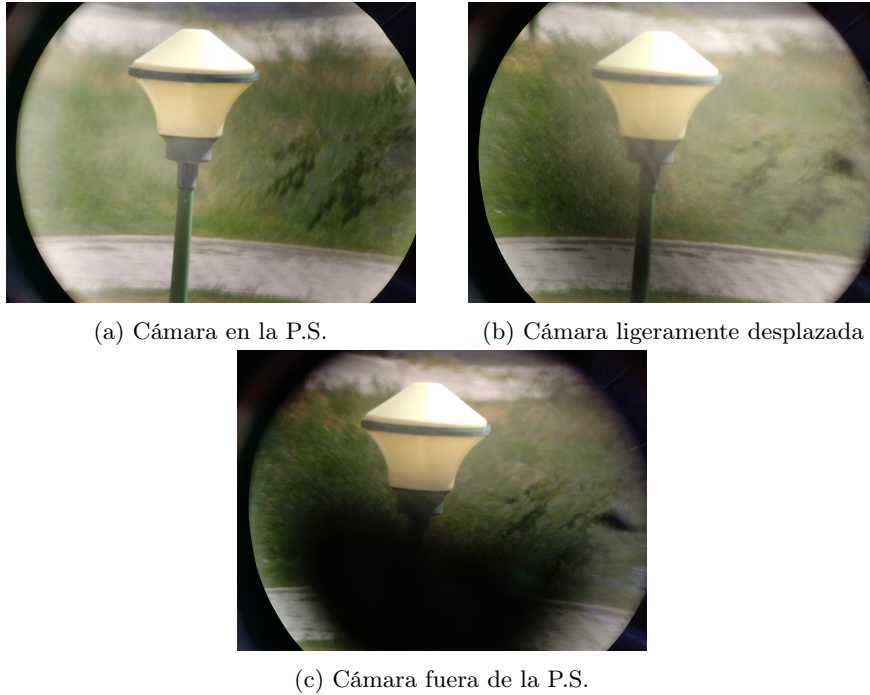


Figura 2.8: Efectos del desplazamiento en el plano de la P.S.

La Figura 2.8 (a) muestra la situación de la que estamos hablando, nuestro ojo en la posición de la pupila de salida observa una imagen nítida del objeto. Prestemos especial atención al borde circular negro que rodea la imagen. Esto no es viñeteo, sino la imagen de la montura del objetivo delimitando nuestro campo, viéndose perfectamente nítida, que es cómo debería de verse si estamos en la pupila de salida.

Si desplazamos nuestro ojo hacia arriba, estaremos saliéndonos de la P.S. y comenzaremos a perder rayos de luz, apareciendo una zona negra en la dirección contraria a la que desplazamos el ojo y el borde difuminado (Figura 2.8 (b)). Si continuamos este desplazamiento llegaremos a una situación como la de la Figura 2.8 (c), en la que la extensión negra ocupa gran parte de la imagen. Cabe mencionar que apenas se movió unos milímetros la cámara respecto a la pupila de salida.

Otro desplazamiento posible es el de realizarlo perpendicularmente respecto a la P.S., hacia dentro o hacia afuera, que sería el punto Q que comentábamos sobre la Figura 2.7. Este movimiento no nos generará zonas negras en medio de la imagen, sino que hará que el contorno negro vaya cerrándose, causando que tengamos que mover el ojo o la cámara para poder ver la imagen entera.

La aparición de este borde negro es lo que se llama *viñeteo* y que podemos contemplar en la Figura 2.9 (a-b-c-d).

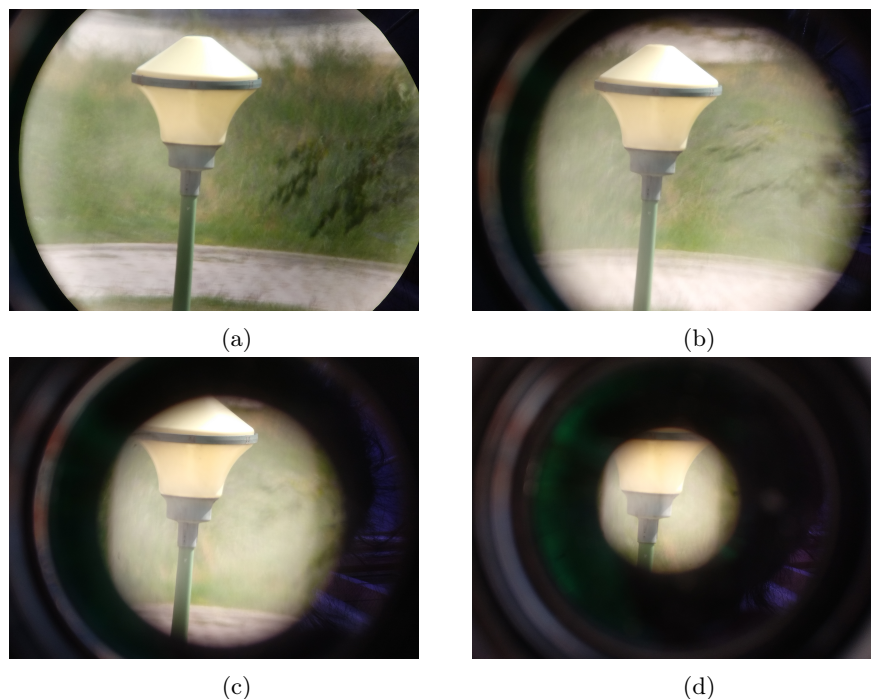


Figura 2.9: Efectos del desplazamiento perpendicular a la P.S.: viñeteo

Si no situamos correctamente la fibra óptica sobre la pupila de salida, aparecerán estos artefactos en nuestro sensor y no aprovecharemos íntegramente la luz procedente de la Luna.

Telescopio empleado

Ante la necesidad de utilizar un telescopio, se planteó la construcción de uno a medida, pudiendo elegir el diámetro y focal de las lentes. Finalmente resultó innecesario su construcción puesto que el GOA disponía de un telescopio astronómico comercial en su inventario que cubría por completo las necesidades requeridas.

El telescopio empleado es el Meade ETX 70/350.



Figura 2.10: Meade ETX 70/350

Se trata de un telescopio refractor de 70mm de apertura y 350mm de distancia focal. Está construido con un doblete por objetivo, estructura común que minimiza aberraciones cromáticas, y un juego de oculares intercambiables. Su precio de mercado ronda los 200 euros, por lo que es un instrumento barato y completo que cualquier grupo de investigación que tenga las mismas necesidades que las que exponemos en este trabajo para con este tipo de espectrómetros, pueda adquirir sin mucho desembolso.

A pesar de que el objetivo sea un doblete, la focal dada de 350mm corresponde al doblete entero,

por lo que no afecta a nuestro estudio.

El telescopio viene montado sobre una montura de tipo horquilla altazimutal motorizada, junto con un mando cuya memoria dispone de un mapa celeste del cielo y las coordenadas de multitud de cuerpos celestes. Esto nos permite seleccionar el objeto que queramos apuntar, y él automáticamente se moverá, lo apuntará, y lo que es más importante, lo seguirá constantemente contrarrestando el giro de la tierra. Esto nos ayudará a tomar medidas prolongadas durante la noche. También nos evita tener que implementar un soporte o sistema de guiado externo, ya que viene integrado en este pequeño telescopio.

Gracias a la elección de este telescopio, hemos solucionado tres problemas, el de la apertura, consiguiendo coleccionar una mayor cantidad de luz que proyectaremos sobre la fibra óptica, el del diafragma de campo, puesto que al ser un telescopio comercial el diafragma ya viene correctamente situado y colateralmente el del seguimiento de la Luna gracias a la montura que viene integrada.

Queda todavía un cuarto punto clave a tratar: el ocular.

2.4 Ocular elegido. Pupila de salida

En anteriores líneas vimos que ante la focal fija de un telescopio, el que determinaba los aumentos con los que trabajamos es el ocular. La elección de un ocular con focal mayor o menor trae otros cambios significativos más allá de los aumentos.

Cualquier persona que haya tenido la oportunidad de observar a través de un telescopio astronómico y jugar con distintos oculares, habrá notado que cuantos más aumentos pongamos (ocular de menor focal), menor será el campo de visión y más difícil resulta encontrar la posición correcta del ojo respecto al ocular para ver bien la imagen. En cambio, con un ocular de focal mayor (menos aumentos) resulta mucho más cómoda la observación, teniendo un campo de visión mucho mayor. Esto es debido a la pupila de salida, que recordemos, es la imagen del diafragma de apertura a través del sistema que le sigue. En nuestro caso, el único elemento que variará la pupila de salida será el ocular, puesto que es el único elemento posterior al objetivo, y por tanto, el único que actúa sobre la formación de la imagen del diafragma de apertura generando la pupila de salida.

2.4.1 Diámetro de la P.S.

A la hora de observar a través de un ocular, la facilidad y comodidad vienen dadas por el diámetro de la pupila de salida y el campo angular que dé el ocular. Los fabricantes de estos instrumentos siempre intentan que la pupila de salida que ofrece un ocular sea lo más grande posible para aprovechar los 7mm de diámetro que tiene la pupila del ojo humano cuando está aclimatado a la oscuridad. Esto no siempre es posible debido a que si se quiere hacer un ocular económico, no puede presentar un sistema óptico muy complejo que subiría el precio. Por ello, en la práctica nos encontramos multitud de tamaños de pupilas de salida. A esto hay que añadirle otros factores que determinan el diámetro de la misma.

Como se comentó anteriormente, la montura que guía el telescopio apuntando constantemente a la Luna no es infalible, por lo que puede presentar vibraciones, derivas o movimientos inesperados haciendo que se salga la Luna del encuadre.

La forma más sencilla de solventar esto es que la pupila de salida abarque más de la extensión del cabezal de la fibra óptica. Dejando este margen nos aseguramos que la luz que incidirá sobre la fibra óptica aunque el seguimiento no sea perfecto.

En la ecuación (2.2) conocemos f'_{ob} y p , coincidiendo este último con el radio del objetivo $p = \frac{70}{2} = 35mm$, ya que en el telescopio la pupila de entrada coincide con el diafragma de apertura. p' es nuestra variable, el radio de la pupila de salida y la que determinará la focal del ocular que tendremos que usar para obtener ese tamaño de pupila de salida.

Si despejamos f'_{oc} de (2.2):

$$f'_{oc} = -\frac{p' * f'_{ob}}{p} \quad (2.3)$$

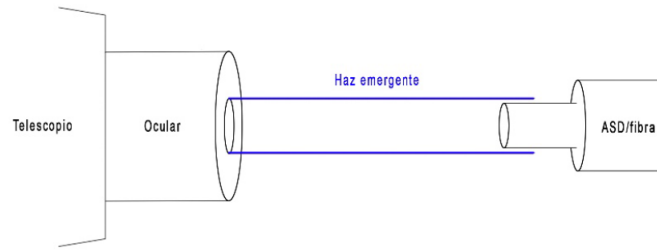


Figura 2.11: Esquema de la pupila de salida abarcando una extensión mayor a la del cabezal de la fibra óptica

La fibra óptica de nuestro espectrorradiómetro tiene un diámetro de 1,85mm, por lo que tendremos que elegir un valor de p' superior a este.

Para asegurarnos de que el haz emergente cubra por completo la entrada de la fibra óptica y tengamos cierto margen de seguridad, tomaremos un valor de, en torno a $p' = 2mm$ (es decir, un diámetro de 4mm), sobrándonos así una corona de aproximadamente 1mm de anchura en torno a la fibra.

Introduciendo este valor de p' en la ecuación (2.3) obtenemos que la focal del ocular a utilizar para obtener un diámetro de 4mm es de $f'_{oc} = 20mm$.

Ahora bien, el juego de oculares que incluye el telescopio que hemos empleado no cuenta con el de 20mm de focal, ya que no es una focal demasiado extendida en el mundo de la astronomía. El ocular incluido con la focal más cercana a este es el de 25mm, por lo que será el que utilizaremos. Aun así, también determinaremos la posición de la pupila de salida del ocular de 12mm para poder intercambiarlos y tener mayor luz con este en caso de que sea necesario.

Usando el de 25mm obtenemos un radio de la P.S. de $p' = 2,5mm$ es decir, un diámetro de 5mm, consiguiendo menos aumentos pero mayor margen de error.

Si usásemos el de 12mm tendríamos un radio de la P.S. de $p' = 1,2mm$, es decir, 2,4mm de diámetro, menos margen que con el ocular anterior pero al tener mayores aumentos (el doble) el área que ocupa la Luna en el campo de visión del ocular será también mayor, y por tanto tendremos más señal en nuestro espectrorradiómetro.

2.4.2 Posición de la P.S.

Otro parámetro a tener en cuenta es la posición de la pupila de salida, que es donde colocaremos la fibra óptica con el fin de no tener viñeteo y de asegurarnos que recibe luz de todos los rayos que entran por el objetivo.

Para determinar su posición partimos de una de las ecuaciones generales utilizadas en óptica para sistemas de lentes delgadas y sumergido en un medio con índices de refracción iguales en sus extremos:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad (2.4)$$

Cuyos términos quedan bien definidos en la Figura 2.12.

Esta expresión nos relaciona la focal de una lente con la distancia de los planos principales de la lente al objeto (a) y a la imagen (a'). Debido a la complejidad de conocer los planos principales de nuestro telescopio, haremos un cálculo en la aproximación de lente delgada, sin tener en cuenta los planos principales. En nuestro caso, el objeto es el objetivo del telescopio y la imagen será la pupila de salida. Al ser el sistema un telescopio, la distancia a es la suma de las focales del objetivo y ocular, por lo que queda perfectamente determinado el valor de la posición de la pupila de salida a' para el ocular elegido de 25mm:

$$-\frac{1}{350 + 25} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{25}$$

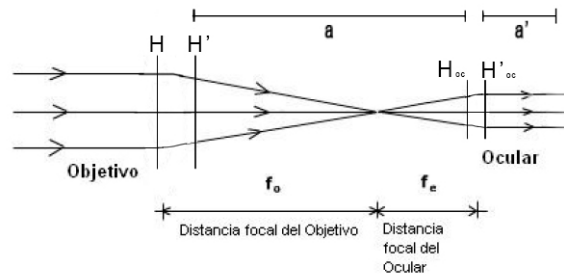


Figura 2.12: Esquema simplificado y aclaratorio de distancias en el telescopio

Despejamos a' y obtenemos el valor teórico de la posición de la pupila de salida $a' = 23,44mm$. Para el ocular de 12mm tendríamos que su pupila de salida estaría teóricamente situada a $a' = 11,6mm$.

Estas posiciones diferirán un poco de las experimentales, puesto que hemos usado la ecuación en la aproximación de lente delgada y los oculares presentan múltiples lentes en su interior.

Oculares elegidos

Como se ha comentado a lo largo de las secciones anteriores, los oculares elegidos, de 25mm y 12mm, son dos de los tres que vienen de serie al comprar el telescopio que adquirió el GOA con otros propósitos. El otro ocular de 4mm, no resultó útil debido a que el diámetro de su pupila de salida es de 0,8mm, dejándonos poco o nulo margen en torno a la fibra óptica.

El diseño de estos oculares es el conocido como Plössl, ideado originariamente por Georg Simon Plössl, por lo que lleva su nombre. Es el diseño más extendido, con una buena relación calidad precio. Consta de dos dobles simétricos, por lo que la aproximación anterior a lente delgada es bastante burda. La solución a este problema se verá en la sección a continuación.

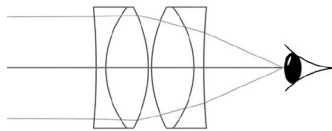


Figura 2.13: Esquema óptico ocular Plössl

Las siguientes figuras muestran unas simulaciones, hechas a través del programa Stellarium, del campo que obtendremos al utilizar estos oculares en telescopio:



(a) Simulación campo visión ocular 25mm (b) Simulación campo visión ocular 12mm

Capítulo 3

Determinación experimental de la pupila de salida

Ante la inviabilidad de aplicar la aproximación paraxial, se planteó la opción de realizar un cálculo teórico aproximado utilizando los planos principales de los oculares. Para ello se contactó con el fabricante con la finalidad de conocer los esquemas ópticos reales de los oculares utilizados, puesto que con uno conceptual como el de la Figura 2.13 no se puede trabajar por carecer de datos como los radios de curvatura, focales, índices de refracción...

La contestación del fabricante no aportó dato alguno sobre el diseño, limitándose a darnos los datos comerciales que ya conocíamos.

Esto propició que tuviésemos que determinar experimentalmente los valores del diámetro y posición de la pupila de salida.

Para ello analizaremos la definición de pupila de salida dada en la sección 2.3, siendo esta *la imagen del diafragma de apertura a través del sistema óptico posterior a él*. El único elemento posterior al diafragma de apertura (objetivo) es el ocular. Por tanto, el ocular formará una imagen real del objetivo. Al ser real la imagen, podremos proyectarla sobre una superficie, y por ende, determinar la posición respecto a la salida del ocular de esta imagen, obteniendo la posición de la pupila de salida.

Si sobre la imagen proyectada medimos su diámetro, obtendremos el diámetro de la pupila de salida.

3.1 Material utilizado

Las medidas se realizaron en los laboratorios de óptica de la planta baja del Aulario de Ciencias de la Universidad de Valladolid. La instrumentación utilizada fue la habitual en un laboratorio de estos: jinetillos, banco óptico milimetrado, un microscopio y por descontado el telescopio Meade ETX 70/350 junto con los oculares de 25mm y 12mm. Este último, el microscopio, puede configurarse con varias combinaciones de ocular y objetivo, dando así una variedad de aumentos.

Estas medidas tomadas se repitieron dos veces con oculares del microscopio distintos, para tener una pequeña muestra de datos y promediar. Por desgracia, los oculares del microscopio no indicaban su focal, por lo que simplemente se les numeró con el fin de diferenciarlos.

3.2 Montaje experimental

La finalidad del montaje fue determinar la posición de la pupila de salida respecto a la lente última del ocular, por lo que el extremo del ocular se situó al comienzo del banco óptico coincidiendo con el origen de la regla milimetrada del mismo. Debido a que el ocular del telescopio está a 90° respecto del telescopio, el tubo del telescopio se situó verticalmente para que el ocular quedase paralelo al banco. También hubo que elevar el telescopio junto con su montura para que estuviesen al mismo nivel que el que proporcionaban los jinetillos al microscopio.

Se optó por situar en la misma vertical el extremo del ocular y el extremo de la plataforma que elevaba el telescopio, siendo así más fácil poner el comienzo del banco en el extremo del soporte.

La siguiente imagen muestra cómo se situó el telescopio en el mismo plano que el soporte usando una superficie plana y juntándolo a ella. Posteriormente, durante las medidas se hizo evidente que al ser medidas relativas no era necesario realizar este ajuste al origen de la regla.



Figura 3.1: Ocular del Telescopio y plataforma situados en la misma vertical

Ver la imagen del diafragma de apertura, que es la lente del objetivo es decir, un cristal transparente, resulta difícil, por lo que situamos un cacho de papel sobre esta lente, marcando así el plano del diafragma de apertura y teniendo un objeto opaco que formará imagen en la pupila de salida de la misma forma que lo haría el cristal si no fuese transparente (Figura 3.2 (a)).



(a) Papel sobre objetivo



(b) Proyección del papel sobre pantalla (pupila de salida)

Figura 3.2: Situación del papel sobre el objetivo

Antes de comenzar a realizar las medidas, comprobamos que la posición de la pupila de salida estuviese en torno a la posición calculada teóricamente en la sección 2.4.2. Bastó con situar una pantalla (papel) por esa posición y ver en qué punto se formaba una imagen nítida del cuadradito de papel situado en el objetivo (Figura 3.2 (b)). Con esto sabremos la zona del espacio en la que se forma la imagen y donde deberemos apuntar con el microscopio.

Las medidas que realizamos son relativas, no absolutas. La medida absoluta es la de la posición de la pantalla sobre el banco cuando se sitúa sobre la pupila de salida y se forma imagen del

objetivo y del trozo de papel. Pero esta medida no es precisa debido a que la imagen del trozo de papel es pequeña y resulta difícil de apreciar si está completamente enfocado o no. Por ello se usa el microscopio y se prescinde de la pantalla.

A simple vista no se aprecia nada en la región del espacio en la que está la pupila de salida y donde convergen los rayos procedentes del diafragma de apertura ya que no hay un medio material en el que pueda formarse la imagen. Por ello usamos el microscopio. Si apuntamos el microscopio sobre la posición en la que está esa imagen, la veremos aumentada. Conociendo la posición del microscopio y sabiendo la *distancia de operación* del mismo (distancia a la que enfoca), restando una de otra obtendremos la posición de la pupila de salida.

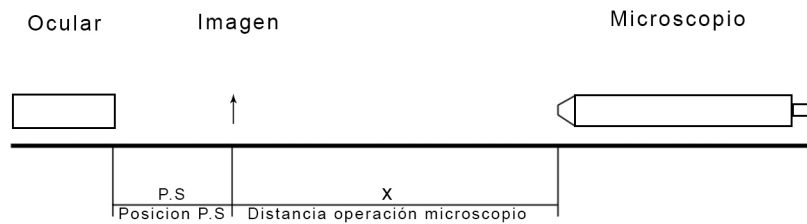


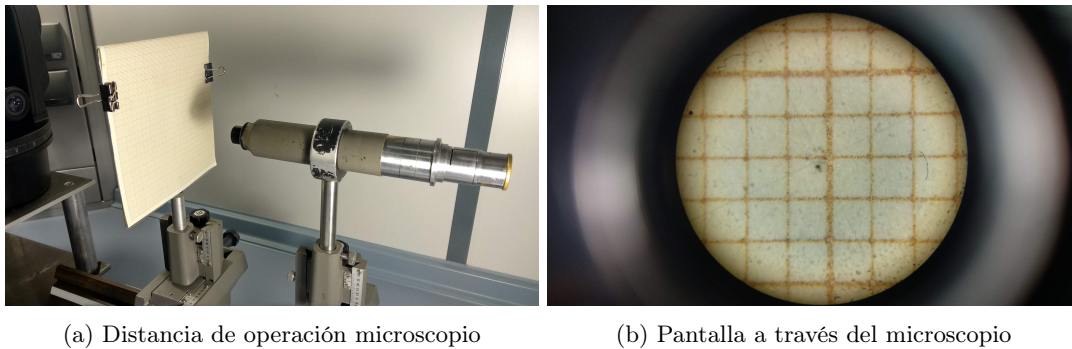
Figura 3.3: Ocular del Telescopio y plataforma situados en la misma vertical

La posición del microscopio la conocemos puesto que nos la indica el jinetillo sobre el banco óptico. La llamaremos $X_{microscopio}$. Si nos fijamos en la Figura 3.3, vemos que

$$X_{microscopio} = X_{P.S} + X_{operacionmicroscopio} \quad (3.1)$$

siendo $X_{P.S}$ la posición de la pupila de salida que queremos conocer y $X_{operacionmicroscopio}$ la distancia de operación del microscopio.

Para conocer $X_{operacionmicroscopio}$ basta con poner una pantalla frente al microscopio y desplazarlo hasta verla nitidamente, y obviamente, aumentada. Restando la posición de la pantalla a la del microscopio conoceremos este valor.



(a) Distancia de operación microscopio

(b) Pantalla a través del microscopio

Figura 3.4: Microscopio en su distancia de operación

Por último, nos queda medir $X_{microscopio}$: la posición del microscopio cuando está apuntando a la imagen situada en la pupila de salida. Como conocemos la posición aproximada de la pupila de salida y la distancia de operación del microscopio, sabemos que debemos hacerlas coincidir para observar la imagen del trozo de papel a través del microscopio y anotar esa posición del microscopio.

Una vez conocemos $X_{operacionmicroscopio}$ y $X_{microscopio}$ despejando $X_{P.S}$ de (3.1) obtenemos la posición de la pupila de salida. Este proceso lo realizamos dos veces.

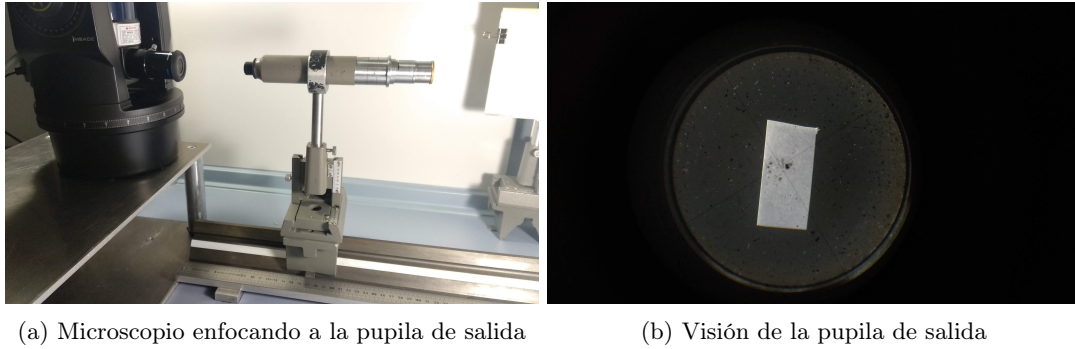


Figura 3.5: Pupila de salida a través del microscopio

Tras haber hecho las medidas, nos percatamos de que al colocar el ocular en el origen de la escala milimetrada del banco óptico (Figura 3.1), lo que realmente situamos en la posición 0mm fue el borde del ocular, pero la lente respecto a la que queríamos medir estaba una distancia h más profunda.

Para determinar precisamente esa diferencia y sumársela a la expresión (3.1) con el fin de tener la posición real de la $X_{P.S.}$, se procedió a enfocar con el microscopio tanto a la superficie de la lente del ocular como al borde más exterior del mismo y a anotar las posiciones del microscopio en ambos casos. La diferencia entre estas dos posiciones es la altura h de diferencia.

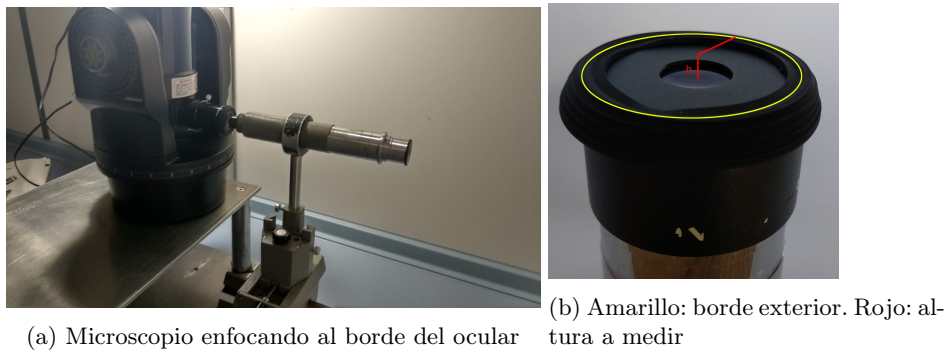


Figura 3.6: Pupila de salida a través del microscopio

Con esto, la ecuación (3.1) quedaría así:

$$X_{P.S.} = (X_{microscopio} - X_{operacionmicroscopio}) + h \quad (3.2)$$

Capítulo 4

Desarrollo del adaptador ocular-fibra óptica

Ahora que conocemos la posición de la pupila de salida respecto al extremo de cada ocular, necesitamos una forma de que el cabezal de la fibra óptica quede completamente fijado en esa posición. Desde el primer instante surgió la idea de diseñar una pieza específicamente para esta tarea puesto que no se comercializa ningún adaptador con esta finalidad. El adaptador debería de ser móvil e independiente, permitiendo así que el telescopio, la fibra y el adaptador pudiesen ser almacenados por separado. A la vez, debería de ser de uso sencillo y que no requiriese calibraciones, sino únicamente juntarlo al ocular y la fibra y que esté listo para tomar medidas.

4.1 Diseño

La idea consistía en un adaptador para cada ocular, de dos orificios, uno por el que se introduciría el ocular y otro por el que se introduciría la fibra óptica. Una vez introducidos hasta hacer tope, el extremo de la fibra óptica debería de quedar localizada justamente en la pupila de salida del ocular. La holgura de las cavidades no debería de ser excesivamente grande, puesto que el telescopio se moverá a lo largo de la noche mientras sigue a la Luna, y el adaptador podría moverse y cambiar la distancia comentada. Por ello también debería de contar con dos tornillos para apretar la fibra óptica y el ocular, manteniéndolos en posición.

Con la idea en mente, el diseño se realizó mediante la aplicación libre de diseño asistido por computadora en tres dimensiones FreeCAD. Requirió unas horas de aprendizaje y familiarización del entorno. Tras ellas, el proceso a seguir para realizar la pieza sería, en primer lugar, crear un esquema en dos dimensiones con las medidas reales de la pieza, para posteriormente, gracias a su simetría cilíndrica, darle las tres dimensiones mediante una herramienta de revolución.

La Figura 4.1 muestra el corte de la pieza del ocular de 25mm en dos dimensiones, tanto con sus medidas como sin ellas. Una vez revolucionado, la pieza queda como ilustra la Figura 4.2, ilustrando seis puntos de vista diferentes para dar una mejor idea. Por último, la Figura 4.3 es como queda tras añadirle las hendiduras que albergarán una tuerca y servirán para poner los tornillos fijadores.

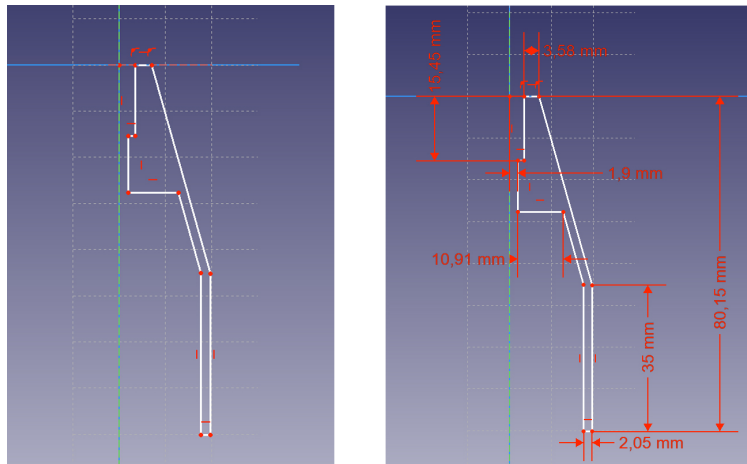


Figura 4.1: Esquema 2D del adaptador

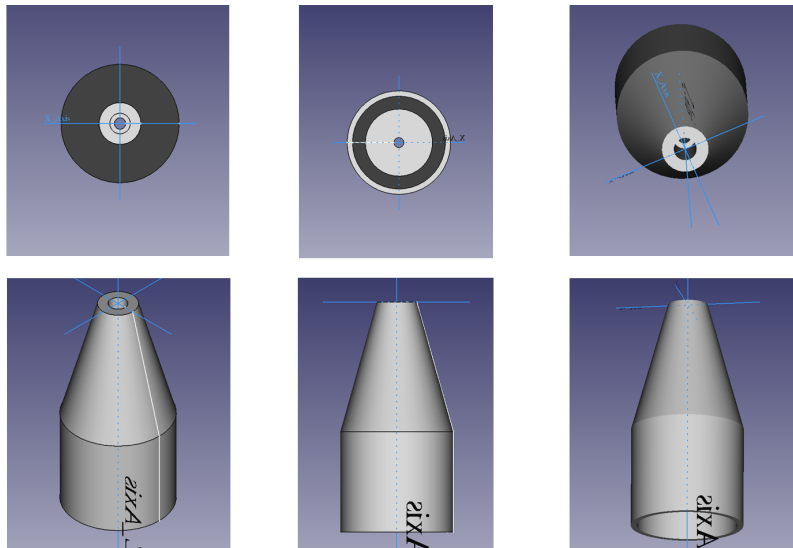


Figura 4.2: Imágenes 3D del adaptador



Figura 4.3: Imágenes 3D del adaptador

4.2 Impresión en impresora 3D

Para materializar el diseño de la pieza se empleó la reciente y cada vez más globalizada tecnología de las impresoras 3D. Su funcionamiento es muy similar al de las impresoras convencionales, resultando incluso más sencillo e intuitivo.

Si queremos imprimir un diseño, debemos convertirlo al formato *.gcode* con un tipo de programa especial genéricamente llamado *slicer* (*fileteador* en castellano) que toma el objeto y lo segmenta en múltiples capas. Una vez tengamos el archivo en la impresora, esta irá fundiendo un filamento de plástico PLA y lo depositará capa por capa, creando así una figura en 3D formada por muchas en 2D.

En nuestro caso, se utilizó una impresora 3D particular, la Anet A8 (Figura 4.4).

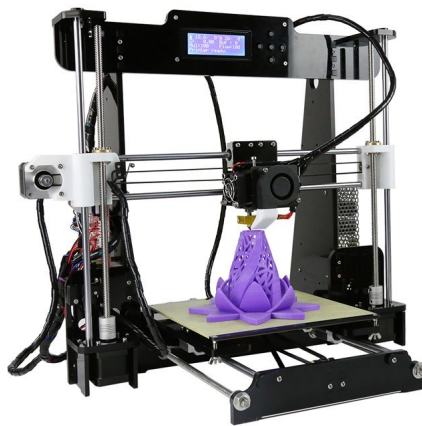


Figura 4.4: Impresora 3D Anet A8

El programa para filetear nuestro modelo es el de libre distribución *Cura*. A mayores de segmentar el modelo, nos permite elegir la temperatura a la que se extruye el plástico, velocidad, altura de capa, densidad del relleno en las partes sólidas y una infinidad de parámetros para adecuarlos a cada impresión. La Figura 4.5 muestra un detalle de la figura segmentada por el programa *Cura*.

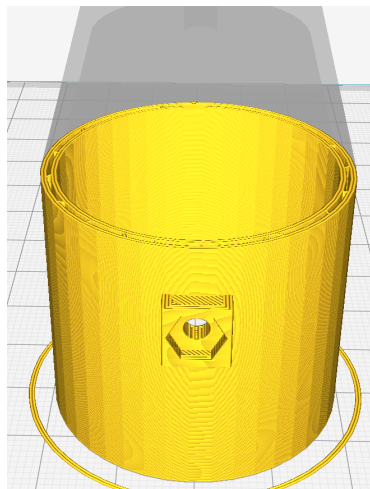


Figura 4.5: Adaptador segmentado

Capítulo 5

Resultados

5.1 Resultados de la pupila de salida para los oculares elegidos

Las medidas se repitieron dos veces con dos oculares de distinta focal en el microscopio aunque sin conocer el valor concreto de la focal de estos. Que fuesen focales diferentes resultó obvio al mirar a través del microscopio y observar que producían distintos aumentos.

Como era de esperar, los resultados de la pupila de salida del ocular eran similares a los proporcionados por el fabricante, pero no exactos, que es lo que nosotros necesitábamos para situar correctamente la fibra óptica en la pupila de salida.

5.1.1 Posición de la pupila de salida

En primer lugar, como hemos desarrollado en la sección del montaje experimental, hicimos el cálculo de la distancia de operación del microscopio.

	Posición microscopio(cm)	Posición pantalla (cm)	Distancia operación (cm)
Ocular 1	36,1	20,5	15,6
Ocular 2	26,15	10,35	15,8

Cuadro 5.1: Distancia de operación del microscopio

Obtuvimos resultados muy parejos para ambos oculares como puede verse.

Antes de calcular la posición de la pupila de salida, tuvimos que ver el valor de h usado en la ecuación (3.2), que era la diferencia entre el final de la montura del ocular y la propia lente del ocular.

Para ello como ya se explicó, apuntamos el microscopio al borde último de la montura del ocular y anotamos su posición $X_{borde} = 15,7cm$. Luego apuntamos a la lente, en concreto a alguna mancha sobre la superficie de la lente para poder verla, situándose el microscopio en la posición $X_{lente} = 15,45cm$. Por último, restando estas dos cantidades obtenemos el valor de h :

$$\begin{aligned} X_{borde} - X_{lente} &= h \\ 15,7cm - 15,45cm &= 0,25cm \end{aligned} \tag{5.1}$$

Esto lo repetimos con el segundo ocular y las posiciones $X'_{borde} = 15,45cm$ y $X'_{lente} = 15,1cm$, obteniendo el mismo resultado que en (5.1), por lo que no hace falta hacer el valor medio.

Una vez obtenido este dato, pasamos a situar el microscopio de tal forma que viésemos la imagen que se forma en la pupila de salida del papel situado sobre la lente del objetivo. Las siguientes

tablas recogen los valores de las posiciones del microscopio para cada ocular del microscopio y la posición final de la pupila de salida para cada ocular del telescopio tras haberla determinado mediante la ecuación (3.2).

Ocular 25mm

	Posición microscopio (cm)	Posición P.S. (cm)
Ocular 1	17,1	1,75
Ocular 2	17,35	1,8

Cuadro 5.2: Posición pupila de salida ocular 25mm

El valor medio de las dos posiciones para el ocular de 25mm queda por tanto $X_{P.S.}^- = 1,78mm$

Ocular 12mm

Cuando posteriormente se realizaron las medidas de este ocular, se evidenció que no era necesario calcular la posición de operación del microscopio ni la altura h de diferencia entre la lente y el marco de la lente, sino que simplemente restando la posición del microscopio apuntando al borde de la montura de la lente del ocular y la posición del microscopio en la que se obtenía la imagen de la P.S. (es decir, viendo la imagen del papelito situado sobre el objetivo del telescopio) ya se conocía la distancia de la P.S. respecto del borde del ocular, y por tanto, la distancia al mismo a la que tendremos que situar la fibra óptica.

$$X_{P.S.} = X_{bordeocular} - X_{papelito} \quad (5.2)$$

	Posición borde ocular (cm)	Posición papelito (cm)	Posición P.S. (cm)
Ocular 1	15,45	16,3	0,85
Ocular 2	15,4	16,22	0,82

Cuadro 5.3: Posición pupila de salida ocular 12mm

Quedando un valor medio de la posición de la P.S. para este ocular de $X_{P.S.}^- = 0,84mm$

5.1.2 Diámetro de la pupila de salida

Durante las medidas que se realizaron a posteriori para determinar la P.S. del ocular de 12mm, se aprovechó y se procedió a comprobar el diámetro real de la pupila de salida.

El procedimiento es sencillo y consiste en medir con el microscopio la anchura de la imagen que se forma en la posición de la P.S.. Esto se consigue gracias a que el jinetillo sobre el que está montado el microscopio dispone de una escala milimetrada para medir el desplazamiento perpendicular al banco óptico.

Se midió la posición lateral del microscopio teniendo centrado en él el lateral izquierdo de la imagen $X_{izq} = 15mm$. Se desplazó el microscopio hasta centrar el lateral derecho $X_{dcha} = 13mm$. Restando estas dos medidas obtenemos el valor del diámetro de la P.S. : $\varnothing = 2mm$.

Como se emplearon dos oculares en el microscopio, también pudimos hacer dos medidas del diámetro, siendo las posiciones laterales del microscopio $X_{izq} = 12mm$ y $X_{dcha} = 9,5mm$ por lo que el diámetro quedaría en $\varnothing = 2,5mm$.

Si calculamos el valor medio nos queda un número muy cercano al teórico calculado: $\varnothing = 2,25mm$.

5.1.3 Adaptador impreso en 3D

Tras el diseño de las piezas hechas con las medidas expuestas a lo largo del trabajo, se procedió a materializar los adaptadores y comprobar si las medidas y la impresión eran correctas.

Finalmente no hizo falta poner un tornillo en la parte superior para sujetar el cabezal de la fibra óptica puesto que la cavidad ajustaba lo suficiente como para que no se cayese. Las posiciones de las pupilas de salida resultaron ser las adecuadas. Lo comprobamos con el ocular de 25mm durante una toma de medidas, viendo la intensidad de la señal y probando a sacar o introducir el ocular y la fibra óptica, obteniendo el pico de mayor intensidad justo en la posición diseñada para que hiciese tope. De no haber sido esa la posición de la pupila de salida, habríamos obtenido una lectura de mayor intensidad en otra posición.



Figura 5.1: Adaptador impreso en 3D

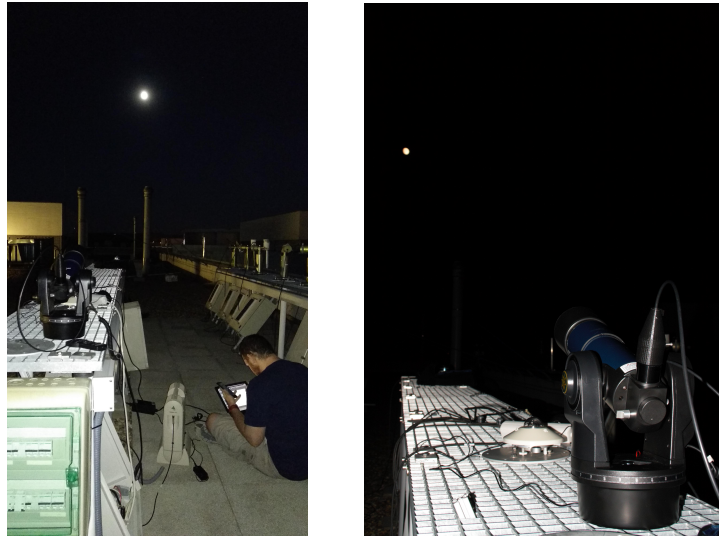
No tuvimos la oportunidad de tomar medidas con el ocular de 12mm, ya que la determinación de su P.S. y la creación de su adaptador se hicieron meses más tarde en invierno y las condiciones meteorológicas no propiciaron noches con Luna despejadas.

5.1.4 Prueba de campo: obtención de un espectro lunar

La finalidad de este trabajo de fin de grado ha sido la de diseñar un adaptador para obtener espectros lunares, meta que ya se ha alcanzado, pero no por ello tiene que quedar ahí. Ante los prometedores adaptadores que se diseñaron, fue inevitable el querer ponerlos a prueba y comprobar si realmente cumplían su finalidad. A la par, queríamos comprobar si el espectrorradiómetro era capaz de obtener los espectros lunares con la poca luz que le llegaba a pesar de contar con un telescopio, puesto que este no tenía una gran apertura.

El miércoles 25 de julio del 2018 subimos a las 22:30h al tejado de la Facultad de Ciencias con el espectrorradiómetro, el telescopio y un portátil dispuestos a probar su funcionamiento. La fase lunar era cuarto creciente, con tres cuartas partes de la Luna iluminada. A esa hora la Luna se elevaba unos 30° por encima del horizonte despejado, por lo que las condiciones eran idóneas.

Se puso el telescopio en estación y el adaptador en su posición, acoplando el ocular de 25mm y la fibra óptica (Figura 5.2).



(a) ASD y telescopio en la terraza (b) Adaptador en telescopio

Figura 5.2: Toma de medidas en la terraza de la Facultad

Las medidas que se van tomando pueden verse en directo, comprobando que el número de cuentas digitales obtenidas no eran tantas como las que se obtienen en medidas diurnas (≈ 10000), pero si las suficientes para poder trabajar con ellas.

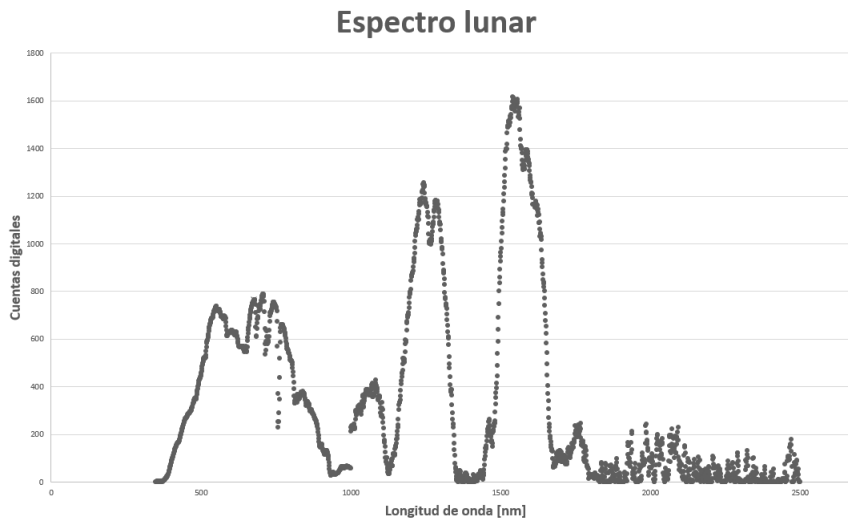


Figura 5.3: Espectro lunar obtenido

En la Figura 5.3 podemos contemplar el espectro lunar resultante sin calibrar. Pueden observarse las diversas bandas de absorción debido a nuestra atmósfera, las llamadas ventanas atmosféricas. En definitiva, un espectro válido para poder trabajar sobre él.

5.1.5 Calibración

Con la finalidad de obtener un espectro cuyas unidades sean magnitudes físicas y plenamente funcional, se procedió a calibrar el sistema completo con ambos oculares. La disposición tuvo que ser la misma que si estuviesen tomando medidas de la Luna, con la salvedad de que se realizó en un entorno controlado y con una fuente de luz de la que conocemos su

radiancia. Esto se consigue con una esfera integradora.

Las medidas de calibración consistieron en cuatro medidas, dos para cada juego de ocular y adaptador, una de ellas con una única lámpara de las cuatro de la esfera integradora encendida y la segunda medida con dos lámparas encendidas para calibrar con intensidades distintas. Por tanto la calibración queda hecha pero queda pendiente el análisis de los datos para validar la esfera.

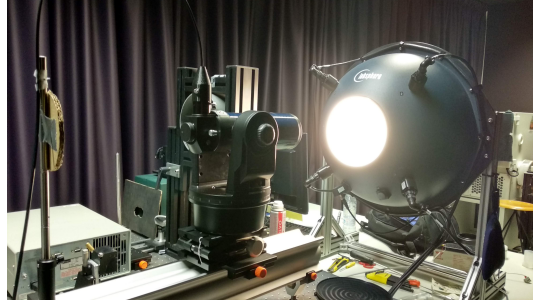


Figura 5.4: Calibración

5.2 Conclusiones

Partiendo de varios instrumentos ideados para distintas tareas, se ha conseguido adaptarlos y finalmente implementar, por un coste casi nulo, un espectrorradiómetro plenamente funcional. Con ello hemos logrado dar un paso más hacia la obtención de un instrumento autónomo capaz de realizar mediciones nocturnas. La accesibilidad de la mayor parte de esta instrumentación (salvo el espectrorradiómetro) hace que cualquier entidad interesada en dar un uso similar a otro sensor del estilo, pueda adquirir fácilmente los materiales y emular el proceso.

Una posible continuación de este trabajo consistiría en el análisis de los datos de la calibración y una buena puesta en estación de la montura motorizada del propio telescopio o instalar el tubo óptico en otra montura más estable, y finalmente, convertirlo en un instrumento de medición fijo.

Bibliografía

- [1] Justiniano Casas. *Optica*, 1985.
- [2] ASD Inc. *Field Spec Pro (User's Guide)*, 2002.

Índice de figuras

2.1	Espectroradiómetro de campo ASD	3
2.2	Cabezal y sus dimensiones.	4
2.3	Esquema sistema óptico del telescopio	5
2.4	Ejemplo diafragmas de apertura	6
2.5	Ejemplo diafragmas de campo	6
2.6	Efectos sobre un disco de luz del diafragma de campo	7
2.7	Esquema diafragmas del telescopio	7
2.8	Efectos del desplazamiento en el plano de la P.S.	8
2.9	Efectos del desplazamiento perpendicular a la P.S.: viñeteo	9
2.10	Meade ETX 70/350	9
2.11	Esquema de la pupila de salida abarcando una extensión mayor a la del cabezal de la fibra óptica	11
2.12	Esquema simplificado y aclaratorio de distancias en el telescopio	12
2.13	Esquema óptico ocular Plössl	12
3.1	Ocular del Telescopio y plataforma situados en la misma vertical	14
3.2	Situación del papel sobre el objetivo	14
3.3	Ocular del Telescopio y plataforma situados en la misma vertical	15
3.4	Microscopio en su distancia de operación	15
3.5	Pupila de salida a través del microscopio	16
3.6	Pupila de salida a través del microscopio	16
4.1	Esquema 2D del adaptador	18
4.2	Imágenes 3D del adaptador	18
4.3	Imágenes 3D del adaptador	18
4.4	Impresora 3D Anet A8	19
4.5	Adaptador segmentado	19
5.1	Adaptador impreso en 3D	22
5.2	Toma de medidas en la terraza de la Facultad	23
5.3	Espectro lunar obtenido	23
5.4	Calibración	24

Índice de cuadros

5.1	Distancia de operación del microscopio	20
5.2	Posición pupila de salida ocular 25mm	21
5.3	Posición pupila de salida ocular 12mm	21