



UNIVERSIDAD **NACIONAL** DE COLOMBIA

Diseño y construcción de una Cámara Heliosférica para Imágenes Espectrales

Jefferson Steven Arias Castro

Universidad Nacional de Colombia
Observatorio Astronómico Nacional
Facultad de Ciencias
Bogotá, Colombia
2023

Diseño y construcción de una Cámara Heliosférica para Imágenes Espectrales.

Jefferson Steven Arias Castro

Tesis de maestría presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Astronomía

Director:

Prof. Benjamín Calvo Mozo

Observatorio Astronómico Nacional

Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ciencias

Codirector:

Ph.D. Juan Carlos Martínez Oliveros

Space Sciences Laboratory, University of California Berkeley

Línea de Investigación:

Astrofísica Solar, GoSA

Grupo de Investigación:

Astronomía, Astrofísica y Cosmología

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia

2023

La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones.

Albert Einstein

Agradecimientos

Al Dr. Juan Carlos Martínez Oliveros, investigador del Space Sciences Laboratory at the University of California, Berkeley, por ser el autor de la idea principal y quien brindó sus recomendaciones y conocimiento en el desarrollo del instrumento, a Benjamín Calvo Mozo, profesor asociado al Observatorio Astronómico Nacional por todo el apoyo y trabajo conjunto durante el desarrollo del IFU y trabajos previos que se desarrollaron. Al profesor Yobani Mejía del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia, por el asesoramiento y colaboración en el diseño óptico del instrumento. A MicroLink S.A.S por la donación de fibras ópticas y acoples, los cuales fueron usados también en versiones previas al IFU obtenido, y finalmente al Observatorio Astronómico Nacional por brindar los equipos necesarios e instalaciones para el desarrollo del trabajo.

Resumen

Diseño y construcción de una Cámara Heliosférica para Imágenes Espectrales.

Las regiones activas en el Sol son zonas de gran interés en la física moderna, dada la gran cantidad de energía que puede ser almacenada y liberada súbitamente, esto nos ha motivado a desarrollar un instrumento con el cual se pueda obtener información espectral de diversas zonas en el disco y corona solar, todo esto tratando de abarcar el mayor área posible y tratar de obtener información de la evolución de las regiones activas. Por esta razón se diseñó, construyó y se probó un espectrógrafo a fibra óptica multimodo, al cual llamamos un IFU, para observaciones entre los 400 y 650 nm, con una resolución espectral del orden de 0,3 nm, haciendo uso de 12 fibras ópticas OM4 con un diámetro de núcleo $50\mu\text{m}$, las cuales se podrán colocar en cualquier arreglo dentro de la imagen focal del telescopio utilizado. Como meta nos propusimos crear este instrumento para obtener información de carácter científico, conservando un bajo presupuesto y alta fiabilidad, para así, en el futuro, según los datos obtenidos, poder hacer las respectivas mejoras al instrumento. Reportamos acá la construcción y prueba del mismo.

Palabras clave: Espectrógrafo, fibras ópticas, espectro solar, regiones activas, Sol, Integrated Fiber Unit.

Abstract

Design and construction of a Heliospheric Chamber for Spectral Imaging.

The active regions are areas on the Sun of great interest in modern physics, given the large amount of energy that can be stored and released suddenly, this has motivated us to develop an instrument with which to obtain spectral information from various areas in the solar disk and Corona, trying to cover the largest possible area and obtain information on the evolution of the active regions. For this reason, a multimode fiber optic spectrograph, that we called an IFU, was designed, built and tested for observations between 400 and 650 nm, with a spectral resolution of the order of 0.3 nm, using 12 optical fibers OM4 with a core diameter of $50\mu\text{m}$, which can be placed in any arrangement within the focal image of the telescope used. As a goal we set out to create this instrument to obtain scientific information, keeping a low budget and high reliability, so that, in a future, according to the data obtained, we can make the respective improvements to the instrument. We report here the construction and testing.

Keywords: Spectrograph, Optical Fiber, Solar Spectrum, Active Regions, Sun, Integrated Fiber Unit.

Objetivos

Objetivo general:

Diseñar, construir, calibrar y probar un espectrógrafo de múltiples fibras ópticas en el visible para capturar imágenes multi-espectrales del Sol.

Objetivos específicos:

- Diseñar y construir un espectrógrafo de 10 fibras ópticas multimodo.
- Calibrar y probar el instrumento en forma integrada.
- Utilización del IFU en modo Raster Scan.
- Generación de los cubos de datos de imágenes espectrales.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Objetivos	XI
1. Introducción	2
1.1. El Sol, nuestra estrella.	2
1.2. Regiones activas.	4
1.3. Fibras ópticas.	5
1.3.1. Propiedades ópticas y tipos de fibras.	6
1.4. Teoría de difracción para las aberturas rectangular y circular.	9
1.4.1. Rendija rectangular.	10
1.4.2. Apertura circular.	11
1.5. Rejilla de difracción.	13
1.6. Unidades integradoras de campo.	15
2. Diseño de una cámara heliosférica para imágenes espectrales.	18
2.1. Diseño óptico	18
2.1.1. Simulaciones previas a la selección de las lentes y rejilla.	19
2.1.2. Elementos ópticos	20
2.1.3. Mesa Óptica	21
2.2. Diseño mecánico	29
2.2.1. Soporte entrada Fibras Ópticas.	30
2.2.2. Soportes Lentes Acromáticas.	30
2.2.3. Soporte Rejilla de Difracción.	32
2.2.4. Soporte Cámara.	32
2.2.5. Placa base.	33
2.2.6. Acople Fibras Ópticas a telescopio.	34
3. Construcción de una cámara heliosférica para imágenes espectrales.	36
3.0.1. Construcción de los soportes y acoples.	36
3.0.2. Ensamble y alineación.	42
4. Calibración y verificación observacional de una cámara heliosférica para imágenes espectrales.	46
4.1. Alineación del adaptador MPO y Cámara.	46

4.2. Calibración rotación rejilla.	47
4.3. Eliminación de Hot Pixels.	49
4.4. Calibración Píxel versus Longitud de Onda.	50
4.5. Control de iluminación.	51
4.6. Obtención del espectro difuso del Sol.	52
4.7. Generación de imágenes espectrales	
Modo Raster Scan.	55
5. Conclusiones y recomendaciones	60
5.1. Conclusiones	60
5.2. Recomendaciones	61
A. Anexo: El espectro solar.	63
Bibliografía	66

1. Introducción

1.1. El Sol, nuestra estrella.

El Sol es una estrella típica ubicada en el brazo de Orión de nuestra galaxia la Vía Láctea, y como tal está clasificada como una estrella de tipo G de la secuencia principal, G2 V, su luminosidad $L_{\odot} = 3,827 \times 10^{26} \text{W}$, masa $M_{\odot} = 1,98 \times 10^{30} \text{kg}$ y radio medio $R_{\odot} = 695700 \text{km}$ reportado a 5000\AA . [Karttunen, 2016]

Se estima que como estrella de la secuencia principal tendría una vida media del orden de 10^{10} años, y en la actualidad se considera que tiene una edad del orden de $4,6 \times 10^9$ años, por lo cual podemos decir que se encuentra en la mitad de su vida en la fase secuencia principal. En su núcleo se generan reacciones nucleares, las cuales contrarrestan la fuerza gravitatoria debido a su masa y permiten a la estrella estar en un equilibrio hidrostático. Su energía se debe mayormente a la cadena protón-protón, en resumen:



en la cual el 0,7% de la masa involucrada se transforma en energía de acuerdo a la equivalencia masa-energía de Einstein. [Karttunen, 2016]

La región más profunda del Sol en donde se produce energía mediante la fusión termonuclear del Hidrógeno en Helio-4, mediada principalmente por la denominada cadena protón-protón, se extiende a lo largo del 25% de su radio interior y que contiene aproximadamente la mitad de su masa, esta región que denominamos el núcleo del Sol, es seguida por una región envolvente en donde el transporte de energía se lleva a cabo mediante el proceso de transporte radiativo, por lo cual la llamamos la capa radiativa, la cual llega hasta el 70% del radio solar. Luego el transporte de energía se lleva a cabo mediante convección por lo cual tenemos la capa convectiva y finalmente tenemos la fotosfera del Sol, de donde proviene la luz que observamos del mismo en donde observamos los gránulos solares, los cuales son el reflejo de la última estructura fina de la convección en el Sol, de unos 100km de espesor, se observan también otros detalles como las manchas solares, fáculas, playas (*plages*) y los puntos magnéticos brillantes entre las estructuras destacadas mostrados en la figura 1-1. Finalmente se tiene la cromósfera, cuyo espesor es del orden de 2000 a 5000 km, extremadamente tenue (densidad muy baja), la cual se encuentra fuera del equilibrio termodinámico local, por lo cual se le observa en emisión de líneas. Encima de la cromósfera existe una región de transición, donde la temperatura crece súbitamente de 6000K a 1MK y se extiende la Corona a partir de allí.

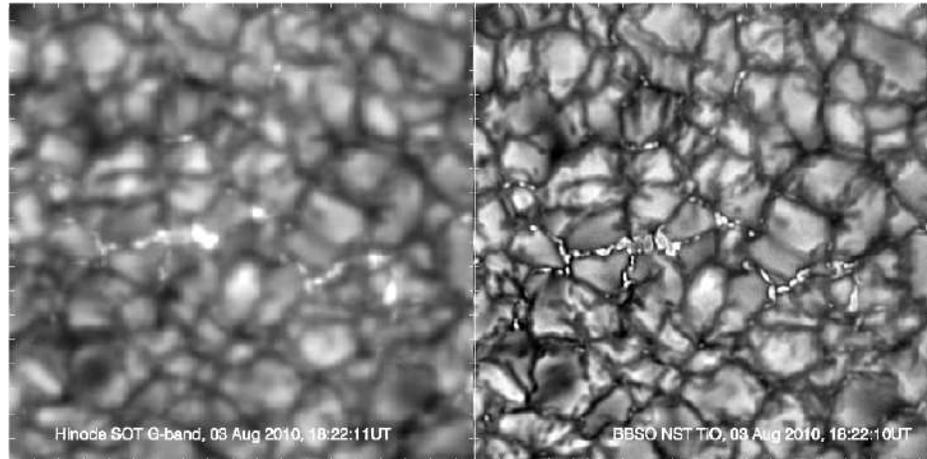


Figura 1-1.: Imagen de 19"x19" Hinode/SOT banda-g (izquierda) y NST TiO (derecha) donde se muestran estructuras complejas en la fotosfera solar. Tomada del Big Bear Solar Observatory <https://www.bbso.njit.edu>.

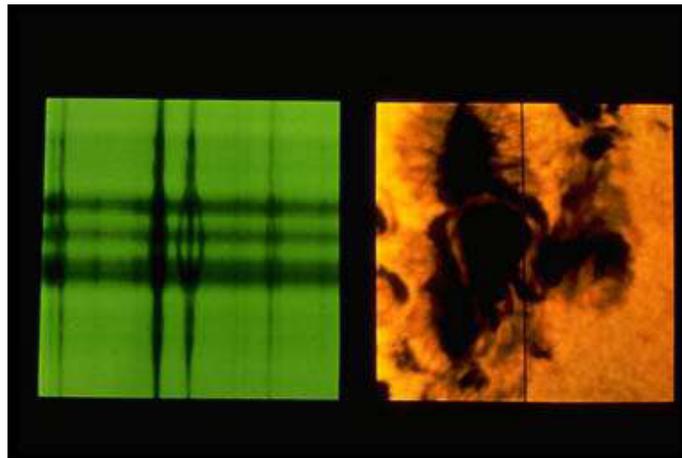


Figura 1-2.: Desdoblamiento de las líneas de absorción en el espectro electromagnético presentes un mancha solar. Imagen tomada del NOAO *National Optical Astronomy Observatories*.

En el siglo XVII **Galileo Galilei** reportó zonas de bajo brillo en la superficie solar, las cuales fueron llamadas **manchas solares** (*sunspots* en inglés), a su vez **Heinrich Schwabe** en 1843 reportó que el número de manchas solares siguen un ciclo cuyo periodo es de aproximadamente 11 años, en el cual se tienen momentos con un número mínimo y máximo de manchas observadas; a esto se le considera el ciclo de la actividad solar. Así, desde que comenzó el conteo nos encontramos al final del ciclo 24 y comienzos del ciclo 25. Hale en 1908 mediante espectroscopia y basado en el efecto Zeeman, usando imágenes como la mostrada en la figura 1-2, descubrió que en las manchas solares existía una gran intensidad del campo magnético, comparable con los miles de Gauss. [Karttunen, 2016].

1.2. Regiones activas.

Denominamos regiones activas, aquellos lugares de la fotosfera solar en donde se presentan fenómenos asociados a la presencia del campo magnético, como lo son las manchas solares, las “plages” (del francés playas), las cuales son zonas brillantes usualmente cercanas a donde se presentan manchas solares. También se suelen encontrar bucles (*loops*), prominencias, etc. todas estas hacen parte de las regiones activas. En los bucles, suele presentarse el arrastre de plasma de la superficie a zonas más altas en la atmósfera solar y retornando al otro pie del bucle. Ahora bien, en las manchas solares la presencia del campo magnético intenso en la región subfotosférica hace que se inhíba la convección, disminuyendo así la temperatura de esta región, por ende viéndose relativamente oscuras; así, su temperatura es levemente menor (4000K) a la de la fotosfera (5777K).

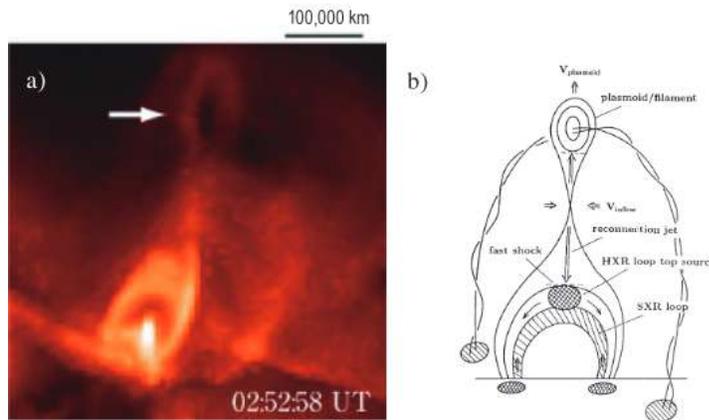


Figura 1-3.: (a) Imagen de un evento de larga duración (LDE) en soft X-ray observado por *Yohkoh*. (b) Esquema del modelo CSHKP descubierto por *Yohkoh* incorporando nuevos cambios. Shibata, K., Masuda, S., Shimojo, M., Hara, H., Yokoyama, T., Tsuneta, S., Kosugi, T. and Ogawara, Y., 1995, “Hot-Plasma Ejections Associated with Compact-Loop Solar Flares”. *Astrophys. J. Lett.* pg 94.

En las regiones de bucles y prominencias, debido a que concentran una gran intensidad de campo magnético confinado, son epicentro de eventos muy energéticos como lo son las **erupciones solares** que ocurren en la cromosfera y las **eyecciones de masa coronal (CME)**. Estos se generan cuando existen las condiciones para que se de el fenómeno llamado **reconexión magnética**, mostrado en la figura 1-3, en el cual las líneas de campo se cruzan, generando una gran liberación de energía que arrastra todo el plasma confinado en el bucle, dependiendo de qué tan energético sea esta, podrá arrojar material hasta ser desprendido del Sol como es el caso de las CME.[Benz, 2016].

Puesto que no se pueden predecir esta clase de eventos, actualmente se estudian con ayuda de satélites y observaciones terrestres en gran parte del espectro electromagnético e incluso en altas energías como los rayos X debido a la fuerte aceleración que pueden sufrir los iones al interior del bucle. [Shibata and Magara, 2011].

1.3. Fibras ópticas.

Las fibras ópticas son elementos ópticos que se basan en un caso especial de interacción de la luz en una interfaz que divide dos medios con diferente permitividad eléctrica y permeabilidad magnética, conocido como **reflexión total**. Este fenómeno sucede cuando el haz incidente es totalmente reflejado con respecto a la interfaz entre los dos medios. De esta manera, la fibra óptica actúa como una guía de ondas para las regiones del espectro infrarrojo (IR), visible (VIS) y ultravioleta (UV). A continuación, desarrollaremos las ecuaciones de continuidad que deben cumplir los campos incidente, reflejado y transmitido en la interfaz entre los dos medios, lo que nos llevará a la **ley de Snell**. [Jackson, 1999].

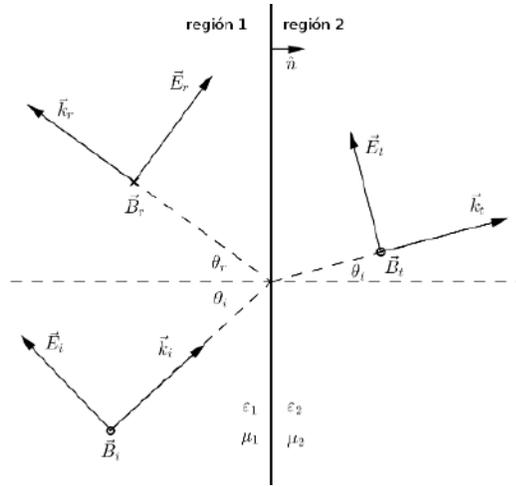


Figura 1-4.: Incidencia oblicua de una onda plana, suponiendo **polarización paralela** para dos medios con ε_1, μ_1 y ε_2, μ_2 respectivamente.

En la figura 1-4 se muestra la signatura y orientación escogida para \vec{E}, \vec{B} y \vec{k} antes y después de interactuar con la interfaz; ahora imponiendo continuidad en las componentes tangenciales y normales a la superficie, tenemos,

$$\hat{n} \times \vec{E}_i = \hat{n} \times \vec{E}_r = \hat{n} \times \vec{E}_t \quad \text{y} \quad \hat{n} \times \vec{H}_i = \hat{n} \times \vec{H}_r = \hat{n} \times \vec{H}_t, \quad (1-2)$$

donde hemos usado $\vec{B} = \mu \vec{H}$.

Una vez impuestas las condiciones de continuidad en (1-2), desarrollamos cada producto cruzado y usando la relación $\vec{B} = \frac{1}{c} \hat{k} \times \vec{E}$ obtenemos

$$k_{i,\parallel} = k_{r,\parallel} = k_{t,\parallel} = k_{\parallel} \quad (1-3)$$

$$k_{\parallel} = k_i \sin \theta_i = k_r \sin \theta_r = k_t \sin \theta_t. \quad (1-4)$$

Usando la relación de dispersión para cada medio $k = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c} \frac{c}{v} = \frac{\omega}{c} n$ donde n, v son el índice de refracción y velocidad de la onda en el medio respectivamente, resultando

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r = n_t \sin \theta_t = cte. \quad (1-5)$$

A esta relación mostrada en 1-5 se le conoce como **ley de Snell**.

Ahora veamos cual es la condición necesaria para que se produzca reflexión total. Para ello usamos la ecuación (1-5), donde imponemos la condición de que el haz sea reflejado al límite de $\theta_t = \pi/2$. Despejando tenemos

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}, \quad (1-6)$$

donde θ_c es el ángulo mínimo de incidencia con $n_2 < n_1$, llamado **ángulo crítico**, puesto que todo haz que incida con un ángulo mayor tendrá componente netamente reflejada.[Hecht, 1998].

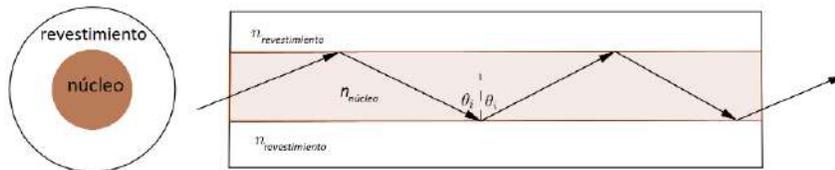


Figura 1-5.: Comportamiento de un haz al interior de una fibra óptica.

En la figura 1-5 se muestra el esquema de una fibra óptica la cual se compone de dos regiones con diferentes índices de refracción llamados núcleo (*core*) y revestimiento (*cladding*) en inglés.

De la relación mostrada en (1-6), tenemos que el dominio de la función arcoseno se encuentra entre -1 y 1, con lo cual el cociente debe cumplir $\frac{n_2}{n_1} < 1$. Con lo cual se obtiene la siguiente relación entre los índices de refracción

$$n_{nucleo} < n_{revestimiento}, \quad (1-7)$$

así todo haz que cumpla las relaciones (1-6) y (1-7) se propagará dentro del núcleo, mientras que para ángulos menores los haces serán absorbidos por el revestimiento.

1.3.1. Propiedades ópticas y tipos de fibras.

Ya entendido el mecanismo de transporte en una fibra óptica entraremos más en detalle a propiedades importantes de éste elemento óptico como lo son la atenuación de la señal y optimización para diferentes longitudes de onda los cuales dependen en gran parte de los procesos de construcción, puesto que para lograr diferentes índices de refracción es necesario dopar los materiales con ciertos elementos. Ahora bien, también existen procesos de fabricación para optimizar la transmisión y disminuir atenuaciones usando diferentes geometrías en la misma. A continuación se mostrarán los tipos de fibras más usuales en la industria, los cuales se encuentran estandarizados por tamaños y tipo de material.[Buck and A., 1995]

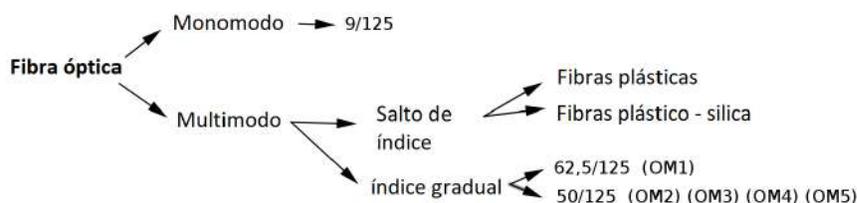


Figura 1-6.: Tipos de fibras ópticas más comunes en el mercado donde se muestran los tamaños de fibras más usados; diámetro núcleo/diámetro revestimiento en μm .

En la figura **1-6** se observan las fibras ópticas comúnmente usadas dentro de las cuales resaltan dos grandes grupos, las fibras monomodo y multimodo. Las fibras monomodo se destacan precisamente por privilegiar un único camino en el cual se propaga la onda, es decir, trabajan en un ancho espectral pequeño con lo cual se reducen efectos de dispersión cromática y dispersión modal la cual se produce por un retraso temporal en la propagación de los haces de luz debida a los múltiples caminos ópticos que puede tomar para una misma longitud de onda. Esto lo logran a partir de la geometría y materiales de la fibra, teniendo usualmente un núcleo alrededor de 9 micras de diámetro y un revestimiento de 125 micras.

Por otro lado las fibras multimodo suelen tener núcleos más grandes, 50 y 62.5 micras de diámetro, permitiendo al haz de luz recorrer distintos caminos ópticos y aumentando el rango espectral de transmisión. Esto hace que se introduzca dispersión modal y cromática. Por esta razón existen fibras multimodo con salto de índice o índice gradual, cada una intentando minimizar estos efectos. En la figura **1-7** se muestran estos tipos de fibras, las fibras de salto de índice ó índice escalonado, que se componen de dos únicos materiales, aumentando la dispersión modal y cromática (dichas fibras dadas sus limitaciones pero fácil construcción son usadas para enlaces cortos de comunicación, alrededor de 100m). Ahora las fibras con gradiente de índice se construyen a partir de pequeños saltos de índice siguiendo una distribución parabólica de manera discreta puesto que por cuestiones de fabricación no es posible variar el índice de manera continua, dicha disposición contribuye a la reducción de la dispersión modal y dispersión cromática en función de la longitud de onda de la fuente disminuyendo la atenuación. [Keiser and Gerd, 2000]

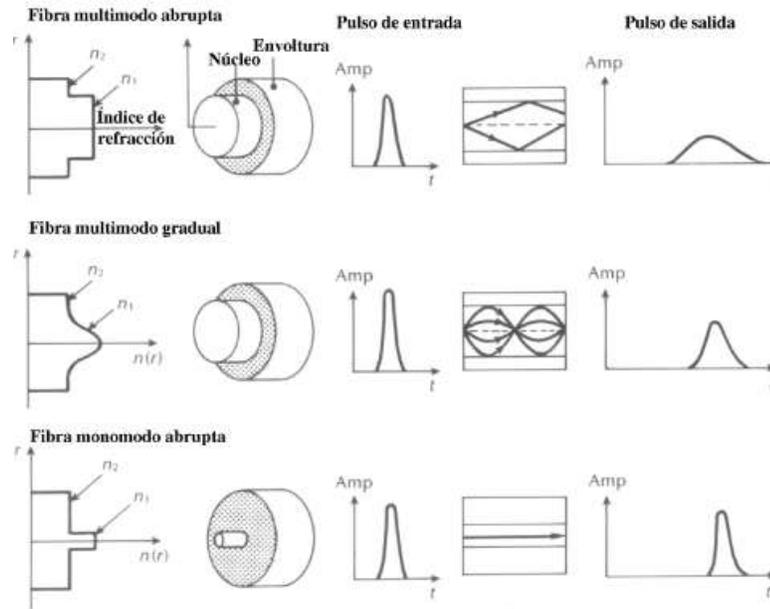


Figura 1-7.: Tipos de fabricación tanto en escala-tamaño como en variación de n en función del radio. Tomado de Universidad de las Palmas Gran Canaria <http://www.iuma.ulpgc.es/users/jrsendra/Docencia>.

Puesto que los procesos de fabricación no son perfectos pueden presentarse pérdidas de intensidad de la onda por dispersión o absorción propia del material, dentro de la dispersión se tienen varias contribuciones como ya se ha mencionado la dispersión cromática y modal, pero además se cuenta con un *Scattering* o dispersión de Rayleigh el cual se produce por la interacción de la luz con microscópicas irregularidades o estrés en el material producidas durante la fabricación del mismo, esto hace que la luz se disperse en otras direcciones incluso superando el ángulo crítico siendo absorbida en el revestimiento. [Yeh and Chai, 1990]

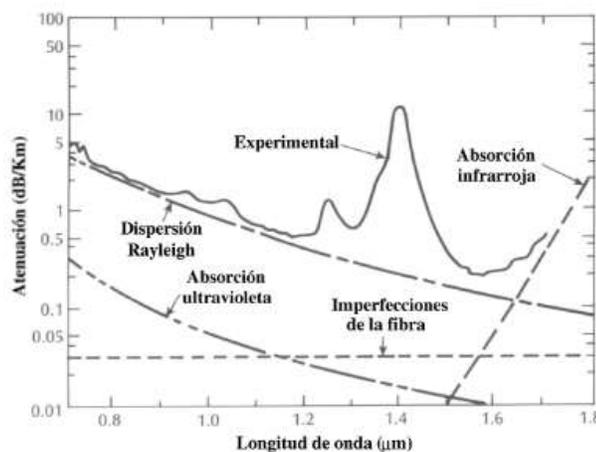


Figura 1-8.: Contribuciones en la atenuación de la onda en una fibra óptica en función de la longitud de onda de la fuente. Tomado de Universidad de las palmas gran Canaria <http://www.iuma.ulpgc.es/users/jrsendra/Docencia>.

En la figura 1-8 se observan los efectos anteriormente descritos, los cuales producen atenuación de la señal en función de la longitud de onda según la región de operación de la fibra óptica. En la figura vemos que existen picos de absorción, causados por la interacción de la luz con iones OH^+ , estos usualmente usados para dopar el material y lograr el índice de refracción deseado. Estos picos para las fibras comerciales, comúnmente se encuentran en los 1000, 1400 y 1600 nm creando lo que se conoce como “ventanas”, zonas donde la atenuación es mínima, y donde es óptima la transmisión de información. [Buck and A., 1995]

1.4. Teoría de difracción para las aberturas rectangular y circular.

En esta sección se explicará la teoría básica de la abertura rectangular o *Slit* en inglés, y la abertura circular, los cuales son elementos ópticos importantes en el funcionamiento de cualquier espectrógrafo convencional. La teoría que presentamos acá está basada en la aproximación de Fraunhofer, es decir, el ancho de la abertura es mucho menor a la distancia entre el plano que contiene la abertura y el plano donde mediremos el patrón de difracción producido, esto es

$$N = \left[\frac{(x + y)^2}{2d} \right] \frac{2}{\lambda} \ll 1, \quad (1-8)$$

donde N es el número de zonas de Fresnel, (x,y) describen la abertura y d la distancia entre los planos.[M. and E., 1999]

Para calcular el patrón de difracción producido por los orificios usaremos la integral de difracción de Fraunhofer, la cual es una aproximación generada de la integral de difracción de Fresnel aplicando

la ecuación (1-8), esto puede ser visto como el número de zonas de Fresnel que caben en la apertura con $N \ll 1$, dicha expresión está escrita de la siguiente manera:

$$I(x', y') = I(u\lambda d, v\lambda d) = \frac{1}{\lambda^2 d^2} |\mathcal{F}\{E(x, y)\}|^2, \quad (1-9)$$

en la cual las variables primadas (x', y') se ubican en un plano paralelo separado una distancia d al plano donde se encuentra la apertura con variables (x, y) , y \mathcal{F} indica la transformada de Fourier. Dicho esto veamos cómo se procede a calcular la irradiancia para las aperturas de interés. [M. and E., 1999].

1.4.1. Rendija rectangular.

Dada la simetría de la apertura rectangular, utilizaremos coordenadas cartesianas para expresar el campo eléctrico en el plano de la apertura. Haciendo uso de la función rectángulo, que denotamos como $\text{rect}(x)$, obtenemos lo siguiente:

$$E(x, y) = E_0 \text{rect}(x/a) \text{rect}(y/b), \quad \text{donde} \quad \text{rect}(x/a) = \begin{cases} 1 & \text{si } |x| \leq a/2 \\ 0 & \text{si } |x| > a/2 \end{cases} \quad (1-10)$$

siendo E_0 la magnitud del campo eléctrico en la apertura.

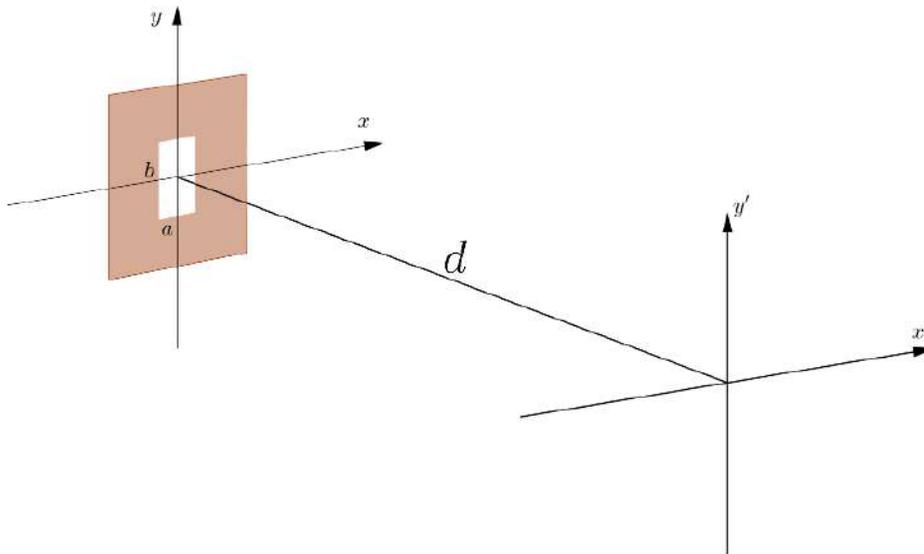


Figura 1-9.: Esquema apertura rectangular aproximación de Fraunhofer.

En la figura **1-9** se muestra la situación planteada, con lo cual una vez expresado el campo E procedemos a hallar la irradiancia I usando la ecuación (1-10) en (1-9) de la siguiente manera

$$I(x', y') = \frac{1}{\lambda^2 d^2} \left| \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} E_0 e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \right|^2 \quad (1-11)$$

$$= \frac{E_0^2}{\lambda^2 d^2} \left| \int_{-a/2}^{a/2} e^{-2\pi iux} dx \int_{-b/2}^{b/2} e^{-2\pi ivy} dy \right|^2, \quad (1-12)$$

calculando la integral en x (de manera similar para y)

$$\int_{-a/2}^{a/2} e^{-2\pi iux} dx = \frac{-1}{2\pi iu} e^{-2\pi iux} \Big|_{-a/2}^{a/2} = \frac{-i}{2\pi u} [-e^{-\pi iua} + e^{\pi iua}] \quad (1-13)$$

$$= \frac{-i(2i)}{2\pi u} \sin(\pi ua) \frac{a}{a} = a \operatorname{sinc}(\pi x' a / \lambda d), \quad (1-14)$$

con lo cual finalmente se obtiene la expresión

$$I(x', y') = I_0 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi x' a}{\lambda d}\right) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\pi y' b}{\lambda d}\right) \quad \text{con} \quad I_0 = \frac{E_0^2 a^2 b^2}{\lambda^2 d^2}, \quad (1-15)$$

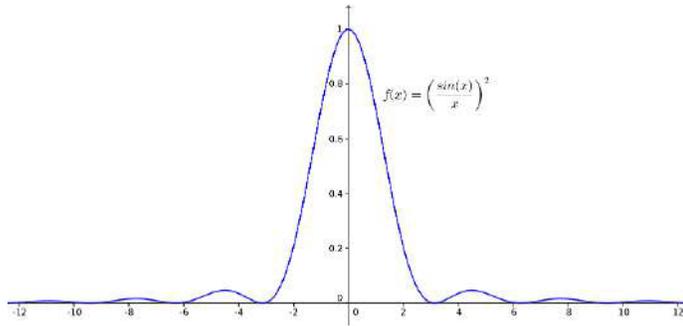


Figura 1-10.: Gráfica de la función $\operatorname{sinc}^2(x)$.

la ecuación (1-15) nos muestra el patrón de difracción generado por la abertura, donde se observan máximos y mínimos de radiación modulados por una función seno en cada eje.

Entre más pequeños sean los valores de a o b , más notorio será el efecto difractivo. Como ejemplo se tiene a la rendija, o como se denota en inglés “**slit**”. Esta abertura puede tener el orden de pocos centímetros de altura y un orden de micras de ancho, es decir, se observa con mayor claridad un patrón en una dirección que en otra. la figura **1-10** describe el comportamiento de la función $\operatorname{sinc}^2(x)$ la cual tiene un máximo de irradiancia en el origen y máximos de diferentes órdenes, los cuales van disminuyendo de intensidad conforme nos alejemos del origen. [M. and E., 1999, Hecht, 1998].

1.4.2. Abertura circular.

De manera similar al caso de la abertura rectangular desarrollaremos el cálculo para hallar la irradiancia producida por un orificio circular usando nuevamente la aproximación de Fraunhofer y

haciendo uso de la función círculo, que denotamos como $\text{circ}(x)$.

E_0 nuevamente es la magnitud del campo eléctrico en la apertura. Dicho esto el campo E en el plano (x, y) será

$$E(x, y) = E_0 \text{circ} \left(\frac{(x^2 + y^2)^{1/2}}{a} \right), \text{ donde: } \text{circ} \left(\frac{(x^2 + y^2)^{1/2}}{a} \right) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x^2 + y^2)^{1/2} \leq a \\ 0 & \text{si } (x^2 + y^2)^{1/2} > a \end{cases} \quad (1-16)$$

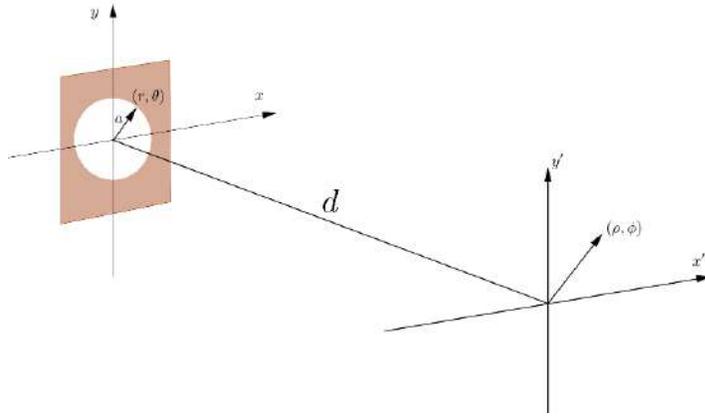


Figura 1-11.: Esquema apertura circular aproximación de Fraunhofer.

En la figura 1-11 se observa la simetría del problema en cuestión. Como se ha visto la geometría de la abertura influye en el desarrollo de los cálculos por lo cual será más conveniente usar un sistema de coordenadas adecuado, en este caso coordenadas polares. Realizando un cambio de variables de la forma

$$x = r \cos \theta \quad u = \rho \cos \phi \quad \rho = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{\lambda^2 d^2}} \quad (1-17)$$

$$y = r \sin \theta \quad v = \rho \sin \phi. \quad (1-18)$$

Así pues,

$$E(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} E_0 \text{circ} \left(\frac{(x^2 + y^2)^{1/2}}{a} \right) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \quad (1-19)$$

$$E(\rho, \phi) = \int_0^a \int_0^{2\pi} E_0 e^{-2\pi i(\rho r \cos \phi \cos \theta + \rho r \sin \phi \sin \theta)} r dr d\theta \quad (1-20)$$

$$E(\rho, \phi) = E_0 \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-2\pi i \rho r \cos(\phi - \theta)} r dr d\theta. \quad (1-21)$$

Usando la expresión de la función de Bessel de orden cero

$$J_0(u) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{iu \cos v} dv, \quad (1-22)$$

entonces la expresión para el campo queda

$$E(\rho, \phi) = E_0 \frac{2\pi}{\lambda d} \int_0^a J_0(2\pi\rho r) r dr. \quad (1-23)$$

Ahora usando la relación de recurrencia para las funciones de Bessel

$$\frac{d}{du} [u^m J_m(u)] = u^m J_{m-1}(u) \quad \text{para } m=1 \quad \frac{d}{du} [u J_1(u)] = u J_0(u), \quad (1-24)$$

con lo cual usando (1-24) en la ecuación (1-23) solo queda evaluar la integral entre 0 y a quedando

$$E(\rho, \phi) = E_0 \frac{2\pi}{\lambda d} a^2 J_1(2\pi\rho a) \frac{1}{2\pi\rho a} \rightarrow E(\rho) = \left[\frac{\pi a^2 E_0}{\lambda d} \right] \frac{2J_1(2\pi\rho a)}{2\pi\rho a}, \quad (1-25)$$

con lo cual finalmente hallando el modulo al cuadrado para hallar la irradiancia tenemos

$$I(\rho) = I_0 \left[\frac{2J_1(2\pi\rho a)}{2\pi\rho a} \right]^2 \xrightarrow{\rho=r/\lambda d} I(r) = I_0 \left[\frac{2J_1(\pi a r / \lambda d)}{(\pi a r / \lambda d)} \right]^2, \quad (1-26)$$

la ecuación (1-26) nos muestra la irradiancia donde se observa una simetría en ϕ , es decir, el patrón generado serán anillos concéntricos. De ésta misma ecuación al igualar el primer cero de J_1 con su argumento, nos encontramos con la relación $r_a = 1,22\lambda d/a$, donde r_a es llamado **radio de Airy** y es precisamente la primera región de difracción para la abertura circular.

De lo anterior nace el **criterio de Rayleigt** en el cual se indica que dos fuentes puntuales son resueltas por un observador si los centros de sus anillos de Airy están separados una distancia mayor a r_a . [M. and E., 1999, Hecht, 1998].

1.5. Rejilla de difracción.

Las rejillas de difracción son un elemento óptico clave en cualquier instrumento de espectrometría, ya que con ella podemos descomponer la luz incidente en todas sus longitudes de onda constituyentes. Existen diversos tipos de rejillas con diferentes geometrías y materiales con lo cuales se obtiene una optimización en un rango del espectro electromagnético de interés. A continuación observaremos cuál es el principio teórico de manera muy similar a las aberturas circular y rectangular.

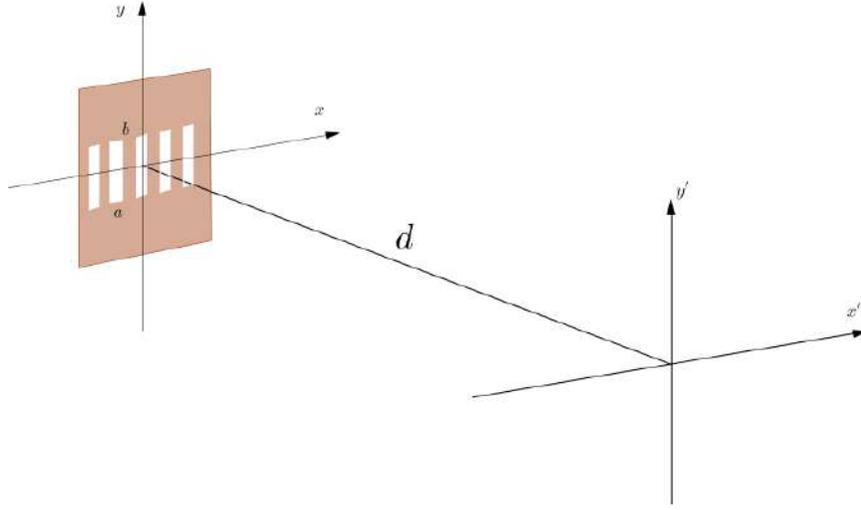


Figura 1-12.: Esquema para la rendija múltiple.

Como se observa en la figura **1-12**, la rejilla se compone de N rendijas rectangulares de ancho a separadas una distancia b ; con esta idea y usando la aproximación de Fraunhofer podemos superponer la solución ya encontrada para la apertura rectangular, con lo cual definimos la función rectángulo de la siguiente manera

$$\text{rect}\left(\frac{x}{x_0}\right) = \begin{cases} 1 & \text{si } |x| \leq x_0/2 \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (1-27)$$

Puesto que las aberturas se encuentran organizadas a lo largo del eje x , calcularemos la irradiancia que se produce a lo largo de este eje; de esta forma el campo E en la dirección x será el producto de la función rectángulo para una abertura desplazada N veces, es decir, la convolución

$$E(x) = E_0 \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) * \sum_{n=0}^{N-1} \delta(x - nb), \quad (1-28)$$

donde N es el número de aberturas, a el ancho y b la separación entre los centros de las mismas. Ahora aplicando la transformada de Fourier al campo y usando las propiedades de la convolución tenemos

$$\mathcal{F}\{E(x)\} = \mathcal{F}\left\{\text{rect}\left(\frac{x}{a}\right)\right\} \mathcal{F}\left\{\sum_{n=0}^{N-1} \delta(x - nb)\right\} \quad (1-29)$$

$$= a \text{sinc}(\pi x' a) \left[\sum_{n=0}^{N-1} e^{-2\pi i n b x'} \right]. \quad (1-30)$$

Ahora calculando la suma mediante la resta de series tenemos

$$S = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-2\pi i n b x'} \quad S e^{-2\pi i b x'} = \sum_{n=1}^N e^{-2\pi i n b x'}, \quad (1-31)$$

con lo cual restando las series se obtiene

$$S \left(1 - e^{-2\pi i b x'}\right) = 1 - e^{-2\pi i N b x'} \quad (1-32)$$

$$S = \frac{1 - e^{-2\pi i N b x'}}{1 - e^{-2\pi i b x'}} = \frac{e^{-\pi i N b x'} \left(e^{\pi i N b x'} - e^{-\pi i N b x'} \right)}{e^{-\pi i b x'} \left(e^{\pi i b x'} - e^{-\pi i b x'} \right)} \quad (1-33)$$

$$S = e^{-\pi i (N-1) b x'} \left[\frac{\sin(\pi N b x')}{\sin(\pi b x')} \right], \quad (1-34)$$

asi retomando la ecuación (1-29) y hallando el módulo al cuadrado obtenemos

$$I(x') = I_0 \operatorname{sinc}^2(\pi x' a) e^{-2\pi(N-1) b x'} \left[\frac{\sin(\pi N b x')}{\sin(\pi b x')} \right]^2 \quad \text{con} \quad I_0 = \frac{E_0^2 a^2}{\lambda^2 d^2}, \quad (1-35)$$

si suponemos muchas aberturas, $N \rightarrow \infty$

$$I(x') = I_0 \operatorname{sinc}^2(\pi x' a) \left[\frac{\sin(\pi N b x')}{\sin(\pi b x')} \right]^2, \quad (1-36)$$

finalmete la ecuación (1-36) nos describe el patrón de difracción para la rejilla constituida por múltiples aberturas, esta ecuación nos muestra por un lado el valor máximo I_0 que puede tomar la función, otro término que expresa la irradiancia generada a partir de una única abertura y un término final correspondiente a la interferencia generada por las N aberturas. [Hecht, 1998]

1.6. Unidades integradoras de campo.

Las unidades integradoras de campo, comúnmente conocidas como IFUs, acrónimo en inglés correspondiente a *Integrated Fiber Units*, son dispositivos tanto de imagen como espectrógrafos, usados para obtener información espectral de objetos extendidos. Este tipo de instrumentos discretizan el plano imagen del telescopio, ya sea con arreglo de fibras ópticas, espejos o máscaras, para posteriormente obtener el espectro de cada punto y generar un cubo de imágenes en diferentes longitudes de onda.

Un ejemplo de estos es el instrumentos **SINFONI** *Spectrometer for Infrared Faint Field Imaging* de la ESO, el cual usa multiples slits para obtener una imagen espectral, más adelante se explicará el funcionamiento de éstos tipos de IFU'S.[Okamoto, 1991]

Además de SINFONI se encuentran en desarrollo e incluso en construcción diversos instrumentos los cuales desean obtener información espectroscópica de algún objeto astronómico en un mismo instante de tiempo para diferentes regiones espaciales del astro bajo estudio, en nuestro caso el objeto de interés es el Sol el cual nos lleva a superar diversos retos puesto que es una fuente de gran intensidad. Superando éstos desafíos a la hora de obtener información del Sol se expondrán 3 proyectos IFU's con cualidades ópticas diferentes **multi Slit**, **multi fibra** y **multi lentes**, los cuales proponen construir imágenes del Sol con gran resolución espacial y espectral en un amplio rango de longitudes de onda (hacia el IR cercano), éstos instrumentos están diseñados para telescopios terrestres.

El primer instrumento **multi Slit** llamado **MuSiCa** *Multi Slit Image Slicer on collimator Camera* del IAC diseñado para el telescopio terrestre Gregor de 1,5m se compone de una máscara dividida en 2 segmentos, con lo cual cada segmento de la imagen es dirigido con ayuda de espejos con máscara de 4 rendijas, nuevamente cada rendija es redirigido por los espejos a una disposición vertical donde finalmente la luz es dispersada por una rejilla de reflexión cóncava esférica y registrada con un detector igualmente cóncavo esférico. Así se obtiene una imagen compuesta por 8 rendijas con un ancho de $100 \mu\text{m}$ y altura 1,8 mm. El hecho de que la luz no atraviesa ningún elemento óptico disminuye los efectos de aberración generando una mayor calidad de la imagen espectroscópica. El segundo instrumento **multi fibra** es diseñado para el telescopio de 4m DKIST, en este caso se cuentan con diversos proyectos con longitudes de onda en el rango visible e IR cercano y lejano. Pero en especial hablaremos del **DL-NIRSP** "Diffraction-Limited-Near-Infrared SP" del NSO. [Elmore, 2014]. [Rimmele, 2020].

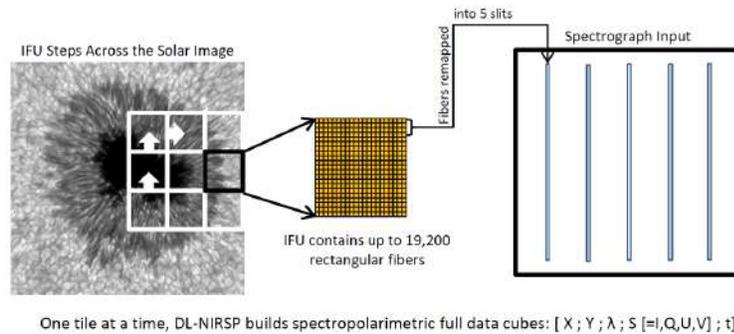


Figura 1-13.: Esquema del funcionamiento para el instrumento DL-NIRSP del NSO. Tomado de <https://www.nso.edu/telescopes/dkist/instruments/dl-nirsp/>

Como se observa en la figura **1-13** el instrumento cuenta con un arreglo de fibras cuadradas (19200) con las cuales se mapea la región del Sol en interés (9 zonas), después las fibras son organizadas en un arreglo lineal de 5 rendijas donde posteriormente se descompone la luz con ayuda de una rejilla de reflexión cóncava que finalmente será registrada por el detector. Dicha disposición logra que el instrumento tenga un campo de visión de 120×120 arcsec y una resolución espectral $R250000$ analizando estados Full de polarización de las líneas espectrales en la rango 900-2500 nm con una cadencia temporal menor a 100 ms, dado éste rango de operación el instrumento estudia la cromosfera Solar en regiones activas donde pueden producirse Flares. [Tritschler, 2007].

Por último el instrumento **multi lentes** denominado **Mihi** del MPS el cual se compone de un arreglo de fibras ópticas que a su vez cuentan con microlentes los cuales reducen el tamaño del píxel al capturar mayor información en el plano imagen del telescopio.

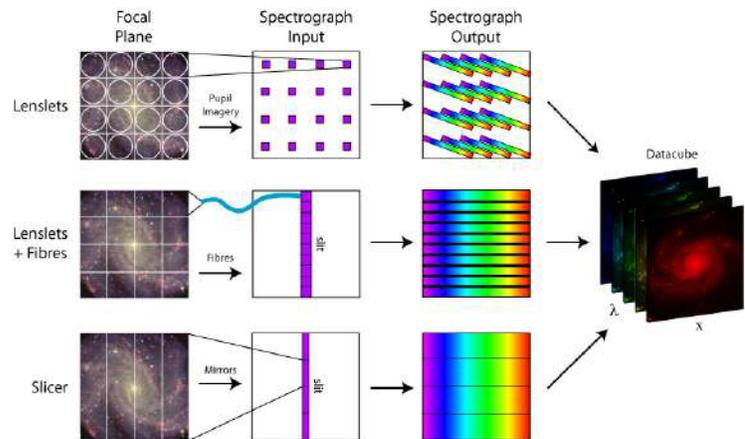


Figura 1-14.: Diferencias en el diseño para la obtención de datos en los diferentes IFU's. M. Westmoquette, adapted from Allington-Smith et al. 1998. Imagen extraída de <http://ifs.wikidot.com>.

El funcionamiento en este caso es muy similar al DL-NIRSP como se muestra en la figura **1-14**, con la diferencia que se añaden microlentes para capturar más información, el transporte de la información también se da por fibra óptica al igual que el uso de una rejilla de reflexión y detector cóncavos. Al introducir microlentes se añade una dispersión espectral como se ejemplifica en la figura **1-14** lo cual hace que se tengan que usar nuevos algoritmos para la obtención final de datos.

2. Diseño de una cámara heliosférica para imágenes espectrales.

La necesidad de construir un instrumento que estudie de manera integral nuestra estrella el Sol surge de completar información que no se obtiene con los instrumentos convencionales. Por ejemplo, existen instrumentos que toman imágenes completas del Sol haciendo uso de filtros, como lo es el caso de **AIA** de la misión **SDO Solar Dynamics Observatory**, ó instrumentos como los espectrógrafos que obtienen gran resolución espectral pero poca resolución espacial. Dicho esto, hemos decidido diseñar un instrumento con el cual podamos observar regiones específicas del Sol y obtener información espectral de las mismas en la región visible, de 400 a 700nm. Esto usando fibras ópticas con las cuales se podrá obtener información espectral simultánea de diferentes regiones espaciales del disco solar. En el presente capítulo explicaremos a detalle el diseño óptico y mecánico implementado en la creación de una cámara heliosférica para imágenes espectrales.

2.1. Diseño óptico

Como se ha mencionado anteriormente este tipo de instrumentos que obtienen información integral de un astro implican desafíos en la construcción de nueva óptica y nuevos materiales para obtener cada vez mayor precisión en los datos, por lo cual requieren de un gran presupuesto tanto en diseño como construcción. En nuestro caso el diseño del instrumento tiene que ajustarse a nuestras necesidades científicas, las cuales son poder obtener información espectral en diferentes regiones espaciales del Sol de forma simultanea. Ahora bien, también debe ajustarse a los elementos ópticos con los cuales disponemos, como lo son las fibras ópticas convencionales que se usan para enlaces de internet, sensores CMOS de cámaras usadas para registrar imágenes en el visible, lentes reutilizados de binoculares u otros instrumentos y rejillas de difracción que puedan ser usadas en otros espectrógrafos.

Todo esto genera limitantes al instrumento, en particular al no poder tener todos los elementos ópticos optimizados en una misma región espectral, por ejemplo, las fibras ópticas suelen tener un amplio rango de trabajo en el IR cercano, donde las perdidas son mínimas, creando ventanas donde la atenuación es constante en función de la longitud de onda. Mientras que la cámara y rejilla están optimizadas para trabajar en la región visible.

Una vez dicho esto se debe elegir el tipo de rejilla que se usará para el instrumento, y características de las lentes. Todo esto teniendo en cuenta que se busca trabajar con fibras OM3/OM4 y sensor CMOS, por lo cual estos dos últimos elementos están sujetos a lo que se disponga.

2.1.1. Simulaciones previas a la selección de las lentes y rejilla.

Para determinar las características apropiadas de las lentes y rejilla, en primera instancia se procedió a simular el arreglo óptico haciendo uso de una librería en *Python* llamada **diffractio** “Python Diffraction and interference”. Esta librería permite hacer simulaciones de diversos elementos ópticos, como lo son las fibras ópticas, lentes y rejillas en cuestión.

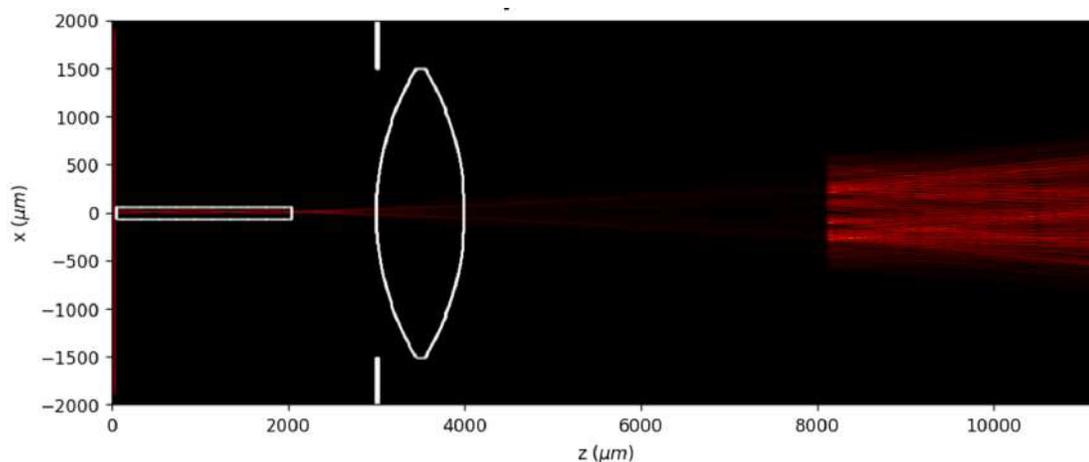


Figura 2-1.: Simulación usando diffractio. Para esta simulación se usó una fibra óptica con núcleo de $50\mu\text{m}$, una lente convergente con 3mm de diámetro y una rejilla con 1000 surcos/ mm . Todo usando un frente monocromático de $0,5\mu\text{m}$.

En la figura 2-1 se observa el resultado de la simulación, en la cuál un frente de onda plano y monocromático pasa a través de una fibra óptica, posteriormente a una lente convergente situada a una distancia similar a la distancia focal de la lente, y finalmente se agrega una rejilla de difracción construida a partir de surcos, la cual vendría siendo equivalente a una rejilla holográfica. Véase [Hecht, 1998].

Analizando esta herramienta vemos que las dimensiones en que trabaja se encuentran en μm , lo cual constituye un problema al re-escalar el tipo de montaje que se desea hacer (del orden de las decenas de cm), puesto que la longitud de onda en las que se trabaja es del orden de $0,5\mu\text{m}$, y este tipo de rutinas lo que hacen es resolver las integrales de Fraunhofer o Fresnel, que dependen a su vez de esta longitud de onda que usemos. Todo esto implica que el programa va a tener que discretizar el espacio haciendo uso de una grilla con demasiados puntos, del orden de la longitud de onda que usemos, lo cual se traduce en gastos de memoria de maquina y tiempo de procesamiento. En esta parte de diseño se simulaban conjuntos de fibras ópticas, lentes con diferentes radios de curvatura, y rejillas únicamente de transmisión, puesto que la herramienta no dispone de rejillas de reflexión. Así pues, en este paso se descartaron varias ideas como usar fibras ópticas con un mayor diámetro, o usar la salida de las fibras sin lente colimador, esto último se descartó dadas cuestiones técnicas, puesto que en las fibras ópticas el haz sale dispersado, lo cual hace que al ir aumentando la distancia, si se cuenta con más fibras, este haz puede solaparse con otros haces.

Una vez concluidas las simulaciones y vistos los resultados, se decidió hacer uso de una mesa óptica. Esto para poder ir testeando y seleccionando los elementos ópticos de manera directa, y así

determinar de forma rápida la configuración final del instrumento.

2.1.2. Elementos ópticos

En esta etapa se fijaron las características de las lentes y rejilla, puesto que en la etapa de simulaciones no se obtuvieron grandes avances ni resultados claros, por lo que se decidió hacer uso de elementos que fuesen fáciles de conseguir y que posteriormente se les pudiese dar un uso en el desarrollo de otros instrumentos.

Dicho esto hasta este punto del proceso en el diseño del instrumento se han fijado todos los elementos ópticos a usar en el mismo, por lo que a continuación se describirán brevemente las características de cada uno, antes de seguir con el diseño óptico, diseño mecánico y posteriores etapas.

■ Fibras ópticas OM4.

Como hemos visto en la sección 1.3.1 las fibras ópticas multimodo se caracterizan por permitir la propagación de un espectro amplio de longitudes de onda, con lo cual se podrá observar todo el rango del espectro visible, ahora también hemos visto que dependiendo de la fabricación de la fibra y en especial de su perfil de índice n , se pueden disminuir dispersiones modales, por lo cual se ha decidido el uso de las fibras de tipo OM4 las cuales cuentan con un núcleo $50\mu\text{m}$ y revestimiento $125\mu\text{m}$ con una pérdida de 3dB/km . Lo interesante de éste tipo de fibras es que pueden venir en grupos de varias fibras como es el caso de las MPO las cuales, como se observa en la figura 2-2 pueden venir en un arreglo lineal de 12 fibras o dos de 12 fibras cada uno, cada fibra estará separada $200\mu\text{m}$ respecto a sus bordes.



Figura 2-2.: Tipos de conectores MPO para fibras OM4 en las cuales se observan los arreglos lineales de 12 y 24 fibras. Imagen tomada de <https://www.samm.com>.

Este tipo de conectores nos será de gran ayuda puesto al poder tener un arreglo vertical de 12 fibras podemos simular perfectamente una rendija lineal como se mostró en la figura 2-3, además de esto presenta una gran ventaja ya que al otro extremo de la fibra se pueden ubicar en posiciones de nuestra preferencia en el plano imagen del telescopio formando un arreglo lineal, cuadrangular o cualquier forma concorde a nuestras necesidades.

- **Rejilla de difracción (1200 líneas/mm).**

Se decantó por el uso de una rejilla de reflexión tipo réplica (Reflective Ruled Diffraction Grating) de 1200 líneas por milímetro, dada su alta eficiencia en gran parte del espectro (NUV-VIS-NIR), esta rejilla cuenta con una eficiencia máxima del 85% alrededor de los 500nm (Blaze Wavelength), ángulo Blaze de $17,45^\circ$ y un área efectiva de $50 \times 50 \pm 0.5$ mm (más información en <https://www.edmundoptics.com>).

Estas características nos ayuda al posterior aprovechamiento de esta rejilla para el desarrollo de futuros espectrógrafos en dicha región.

- **Lentes acromáticas.**

En cuanto a los lentes, decidimos hacer uso de unos binoculares, ya que estos cuentan con lentes acromáticos, con un diámetro promedio de 50mm y longitud focal entre 150-200mm, además que se obtienen por un bajo costo. El hecho de usar estos lentes nos impide obtener un aumento de imagen deseado, por lo cual se debe testear el aumento final de forma experimental dadas las lentes y tamaño del sensor CCD.

- **Sensor CMOS.**

El sensor CMOS que se usará es de una cámara planetaria QHY monocromática ultra rápida. Esta cámara cuenta con un chip Sony IMX174 de 1920×1200 pixeles, y una tasa máxima de cuadros de 490fps. Esto ultimo hace que podamos usar exposiciones muy cortas, de hasta 10ms con una alta ganancia.

2.1.3. Mesa Óptica

Una vez dicho esto se realizó un esquema de la configuración de todos los elementos ópticos.

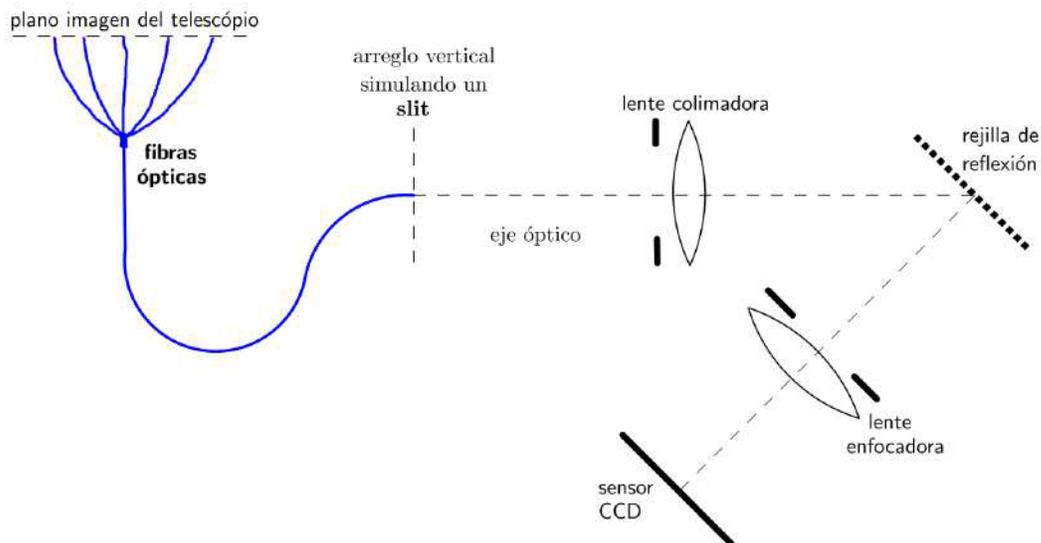


Figura 2-3.: Diseño óptico del IFU implementado en la región visible.

En la figura **2-3** se muestra la disposición de los elementos ópticos anteriormente mencionados los cuales conforman la Cámara Heliosférica para Imágenes Espectrales. En esta figura se observa en la parte superior izquierda el plano imagen del telescopio, donde justamente se sitúa la entrada de luz a las fibras ópticas. La salida de las fibras se dispone formando un arreglo vertical, simulando un *slit*, dicho arreglo se sitúa en lo que sería la entrada de un espectrógrafo convencional. Posteriormente nos encontramos con la lente colimadora a la distancia focal de la misma, esto para que los haces de luz salgan paralelos (colimados) hacia la rejilla, quien los difracta para posteriormente ser enfocados por una lente de iguales características y finalmente registrados en un sensor CCD.

Una vez adquiridos los elementos ópticos, se realizó el montaje de los mismos en una mesa óptica del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia, en colaboración con el profesor Yobani Mejía del grupo de óptica aplicada.

Como primer paso se alineó el sistema haciendo uso de un Láser de Helio-Neón y una apertura circular (*pin hole* en inglés) de $10\mu\text{m}$, este último nos simula la salida de una fibra óptica, ya que actúa como una fuente casi puntual. [Hecht, 1998].

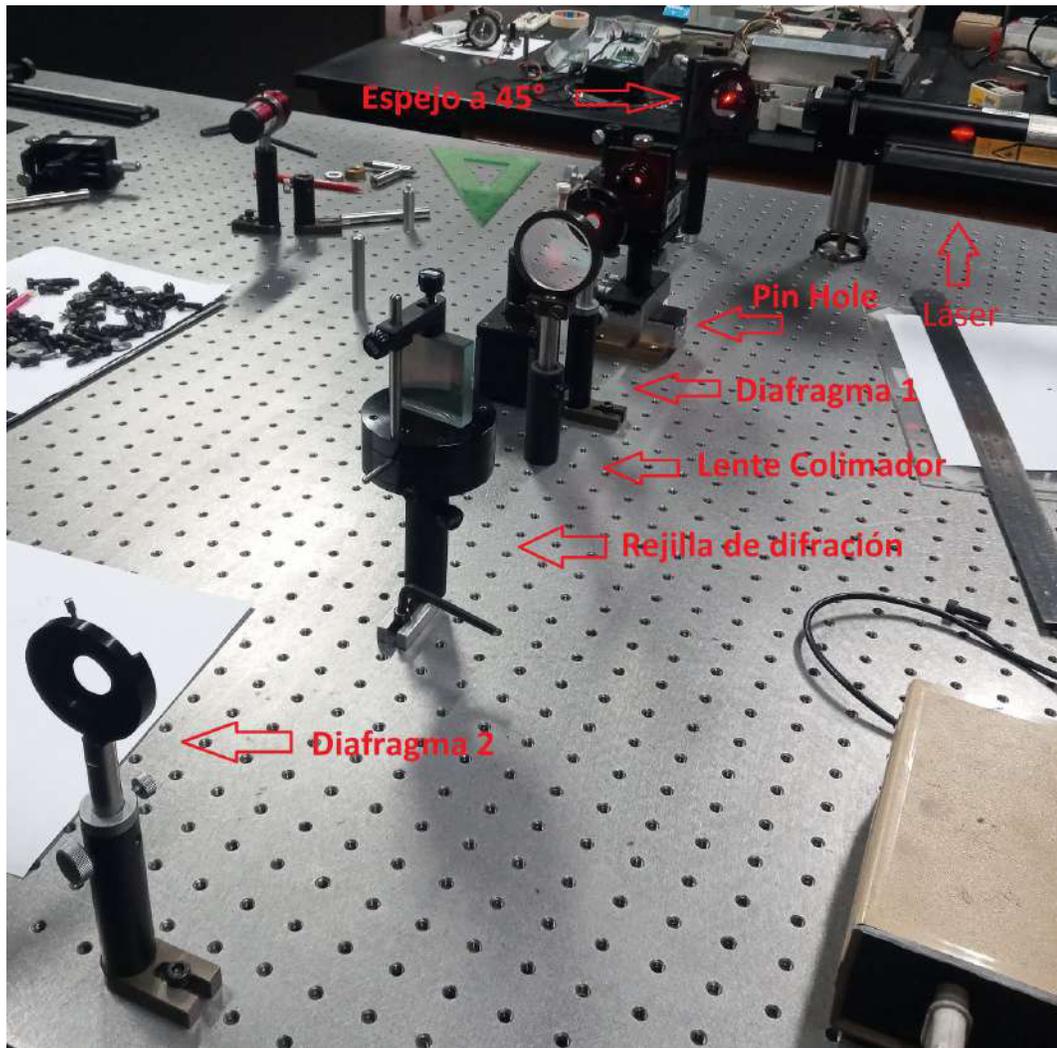


Figura 2-4.: Alineación de la lente colimadora.

En la figura 2-4 se muestra el montaje en la mesa óptica, que se usó para enfocar y alinear la lente colimadora, el cual corresponde al arreglo conceptual de los elementos ópticos mostrados en la figura 2-3. En este paso se usó una apertura circular como fuente puntual sobre un carro, el cual nos permitía desplazarnos sobre el eje óptico para así situarnos justo en el foco de la lente y que el haz saliera colimado. Para determinar que el haz estuviese colimado se usaron dos diafragmas y una pantalla (véase la figura 2-5), la idea consistía en que el diafragma 1 (mostrado en la imagen) controlaba el flujo de luz reduciendo la sección transversal del haz, posteriormente se ubicó el diafragma 2 (en este paso no se coloca la rejilla), y a un metro de distancia se ubicaba una pared la cual nos servía de pantalla. Dicho esto cuando el tamaño de la sección transversal del haz medido en la pared coincidía con la apertura del diafragma 2, se podía concluir que el haz estaba colimado, por ende la fuente se encontraba en el foco de la lente.

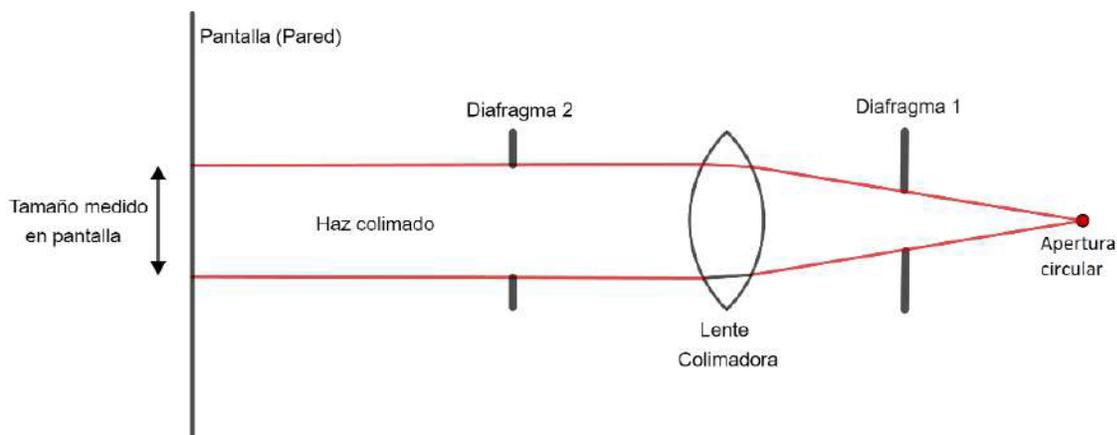


Figura 2-5.: Esquema alineación de la lente colimadora.

Para asegurar que el plano de la lente fuese perpendicular al eje óptico, se observaron las reflexiones producidas por la superficie de la misma. Así pues, cuando las reflexiones están en el eje óptico, se asegura que la lente está correctamente alineada.

Una vez colimado el haz, se determinó que la distancia focal de la lente era de 200mm, luego se ubicó la rejilla de difracción a aproximadamente la misma distancia. En este caso, puesto que el haz ya está colimado, la distancia a la que se ubique la rejilla solo va a depender de cuestiones técnicas, propias del tamaño de los elementos ópticos y soportes que se usarán posteriormente.

Colocada la rejilla se observó y midió el ángulo correspondiente con el primer orden de difracción ($m = 1$) usando el mismo láser de Helio-Neón. Ya que la rejilla de difracción está optimizada para maximizar la radiación en $m = 1$, se corroboró experimentalmente cada uno de los órdenes visibles ($m = -1, 0, 1$), obteniendo que el ángulo adecuado para colocar el segundo eje óptico es de aproximadamente 39 grados. Este ángulo es cercano a dos veces el ángulo Blaze de la rejilla $\theta_B = 17,45^\circ$, pero hay que tener en cuenta que la rejilla está optimizada, ó su longitud de onda Blaze es 500nm.

Una vez fijado el ángulo, se colocó la lente enfocadora a aproximadamente la misma distancia lente colimadora - rejilla, esto con el fin de que el montaje sea lo más simétrico posible.

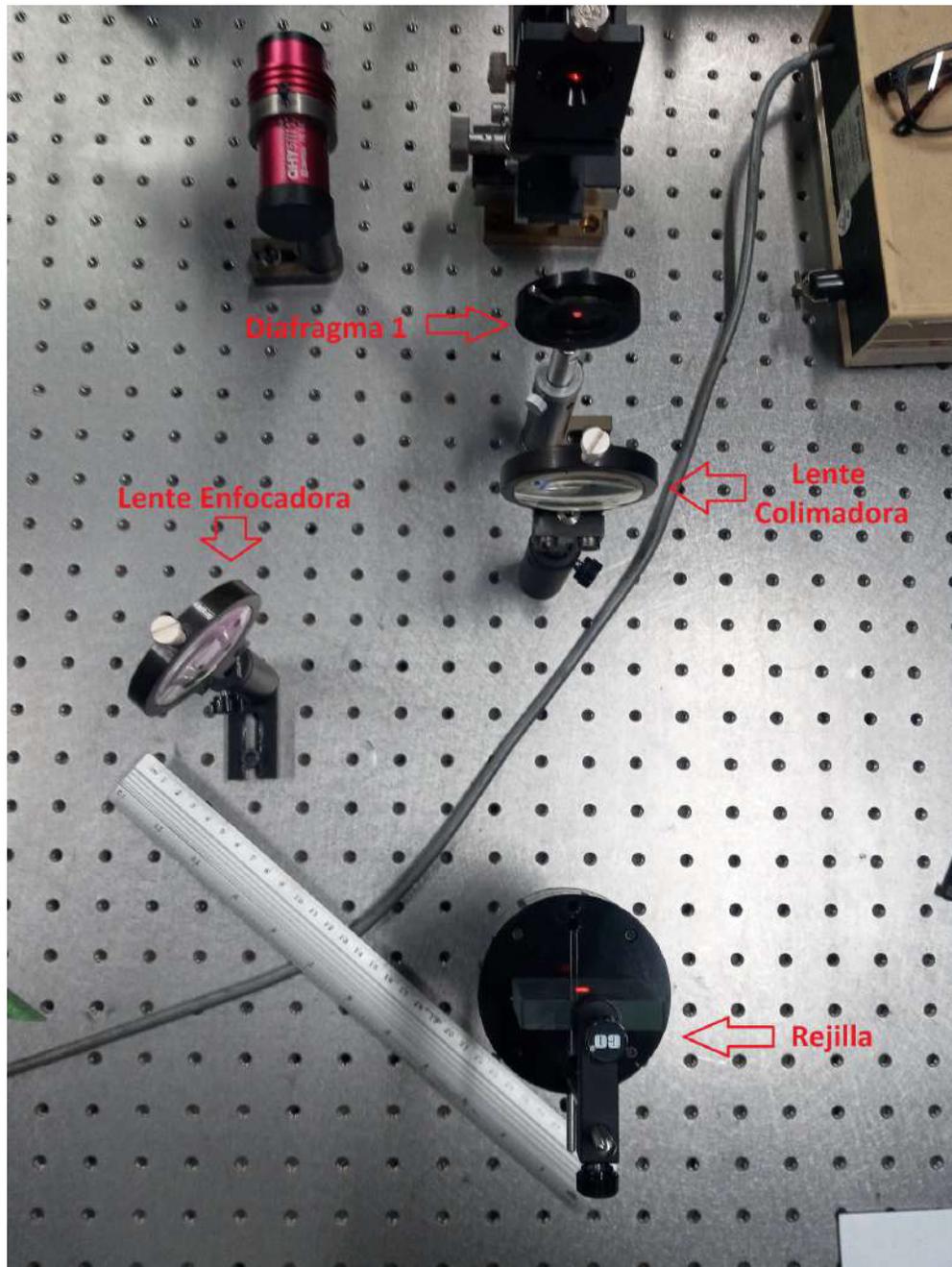


Figura 2-6.: Alineación de la lente enfocadora.

En la figura 2-6 se observa ya ubicada la lente enfocadora en el montaje. en este paso no solo se colocó la lente al ángulo con respecto a la rejilla y distancia adecuada, también se alineó con respecto al eje óptico. Para esto se usó la misma técnica de hacer que las reflexiones fuesen a través del eje óptico. Puesto que ya existen varios elementos en el montaje, estas reflexiones cada vez son más debiles, por lo que toca oscurecer el lugar en el que se está llevando a cabo el montaje. Una vez alineadas las lentes, lo único que queda es fijar la distancia a la cual irá el sensor CCD con respecto

a la lente enfocadora, esta distancia debe corresponder justamente con la distancia focal de la lente. Para corroborar esto, se hizo uso de una pantalla, en la cual se observó el cambio de tamaño que hay en la imagen generada por el láser y Pin Hole, en medida que se desplaza la pantalla sobre el eje óptico. Una vez corroborada la distancia a la cual se genera la imagen enfocada, se procedió a colocar el sensor CCD como se muestra a continuación.

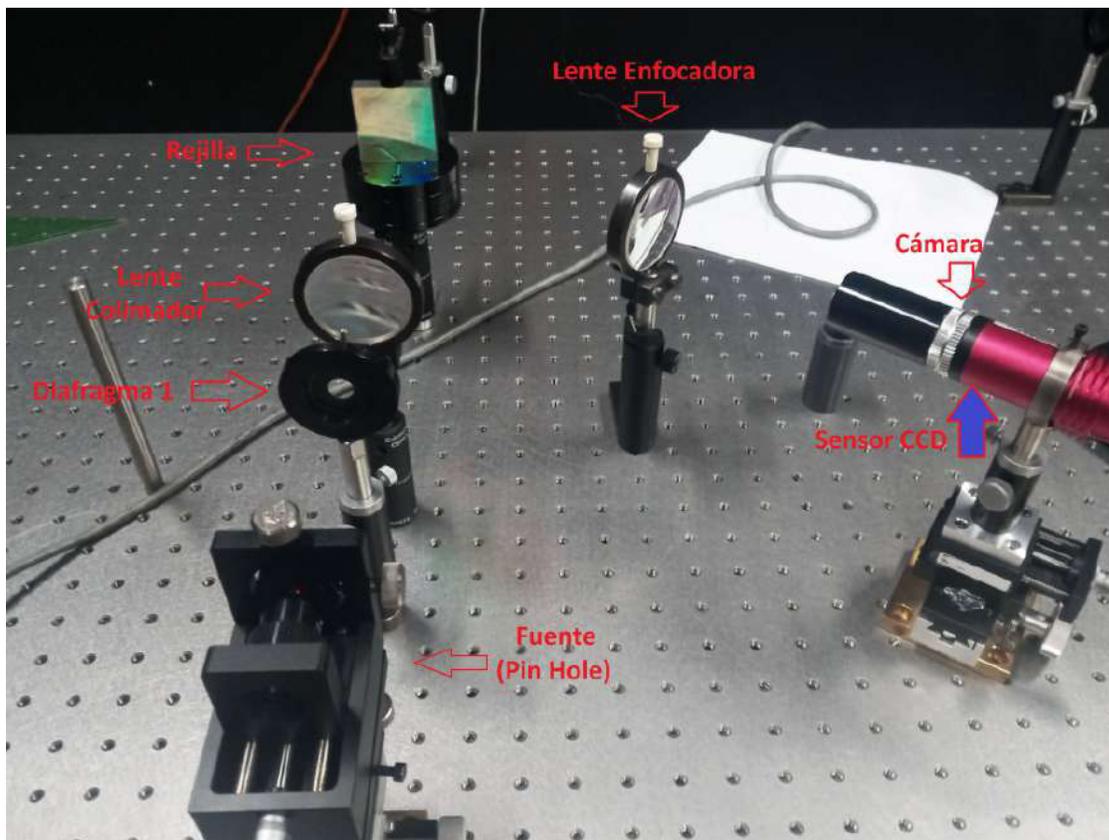


Figura 2-7.: Ubicación del sensor CCD.

En la figura 2-7 se muestra la cámara usada, dónde la flecha azul señala la posición del sensor CCD dentro de la misma. Para realizar posteriormente un ajuste fino y poder enfocar correctamente con el computador, se montó la cámara sobre 2 carros, uno que le permite desplazarse sobre el eje óptico, y otro que permite moverse en dirección perpendicular. Esto último con el fin de centrar la imagen en el sensor CCD.

Una vez ya hecho este montaje, nos queda ver las imágenes suministradas por el sensor CCD desde el computador. Antes de esto es muy importante limitar la intensidad de la fuente, puesto que se están realizando en primera instancia pruebas con un láser. Para esto se añadieron al montaje 2 polarizadores antes del Pin Hole, con los cuales se podrá controlar fácilmente la intensidad del haz incidente.

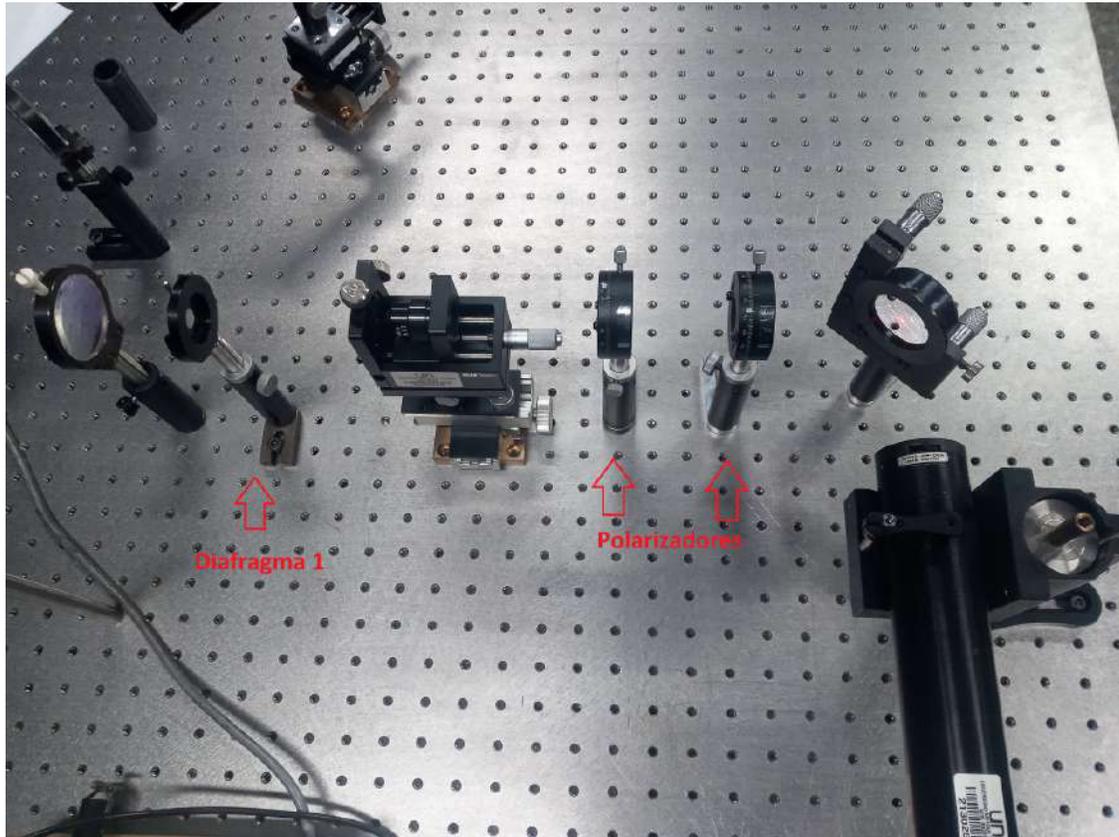


Figura 2-8.: Control de intensidad.

Los polarizadores y diafragma 1 mostrados en la figura 2-8 nos ayudan a controlar el flujo de luz. Estos polarizadores solo se usan en esta etapa de diseño del instrumento, puesto que las pruebas se realizan con un láser, el cual tiene un haz bastante intenso y puede ocasionar daños en el sensor CCD. Ahora bien, con el diafragma 1 podemos controlar también un poco la iluminación, ayudándonos a trabajar cerca al eje óptico, lo cual nos disminuye aberraciones y posibles detecciones de luz parásita.

Una vez dicho esto se fijó la intensidad al mínimo, y así aumentarla posteriormente de ser necesario. Ya con esto se observó la imagen generada del Pin Hole y difractada por la rejilla, a la cual se le realizaron unos ajustes finos de enfoque y centrado con ayuda de los dos carritos. Ahora finalmente, ya fijada la distancia de enfoque y centrado el sensor CCD, nos queda reemplazar el Pin Hole por las fibras ópticas, para lo cual necesitamos una fuente de iluminación homogénea sobre la entrada al conjunto de fibras.

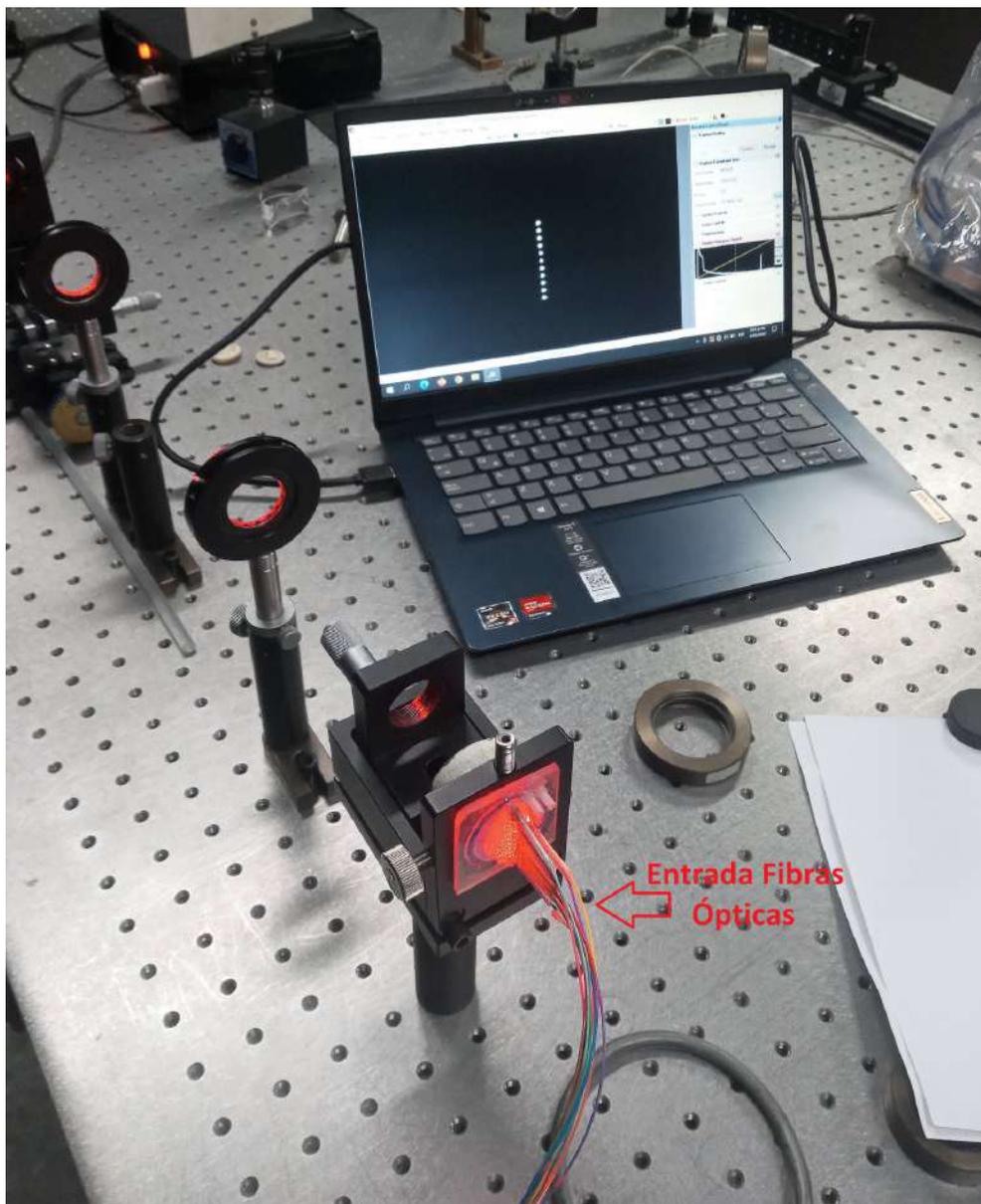


Figura 2-9.: Detección fibras ópticas.

En la figura 2-9 se muestra en la parte izquierda la iluminación que se usó a la entrada de las fibras ópticas, la cual se construyó con un láser de Helio-Neón, generando un haz colimado que incide sobre las fibras. En la parte derecha vemos la imagen generada del conjunto de fibras, la cual se enfocó finamente ajustando la distancia de la salida de las fibras y el lente colimador. En la figura observamos que las fibras se ven como puntos, esto sucede ya que aunque estamos observando el primer orden de difracción, el ancho espectral del láser es bastante fino, del orden de unos pocos ángstrom.

Echo esto, se ha completado el diseño óptico del instrumento, paso seguido nos queda tomar todas las medidas obtenidas en este proceso y continuar con el diseño mecánico y soportes para todos los

2.2.1. Soporte entrada Fibras Ópticas.

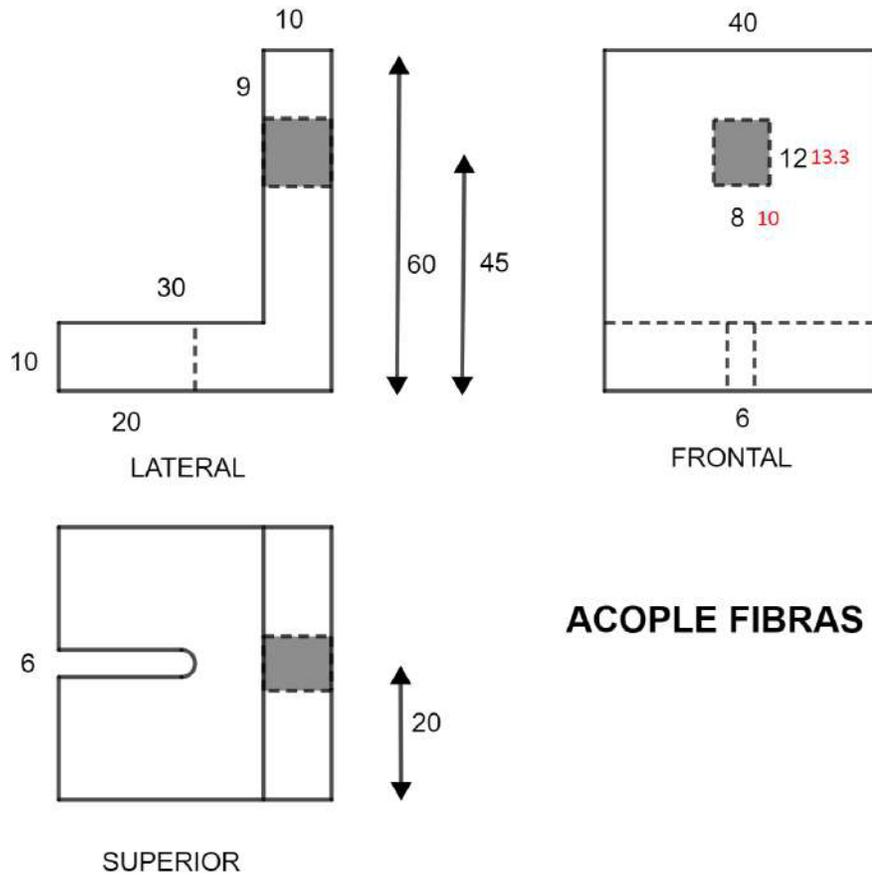


Figura 2-10.: Dimensiones y vistas para el soporte de la entrada a las fibras ópticas en mm (incertidumbre $\pm 0,5$ mm).

En la figura **2-10** se muestra el acople de las fibras ópticas, en el cual se conecta el adaptador MPO que contiene el arreglo vertical de 12 fibras. El acople consiste de una “L” la cuál en su base tiene una cuña en forma de U para poder realizar movimientos finos a lo largo del eje óptico, y poder calibrar finamente la distancia de la salida de las fibras a la lente colimadora. En la imagen se observan las dimensiones en mm, siendo el rectángulo de la mitad el lugar dónde irá el adaptador MPO, el cuál es una pieza plástica que entra a presión en la pieza, dicha pieza tiene dimensiones 8×12 mm internas y $10 \times 13,3$ mm externas.

2.2.2. Soportes Lentes Acromáticas.

El diseño de los soportes para las lentes colimadora y enfocadora son los mismos, puesto que son lentes acromáticas de igual distancia focal.

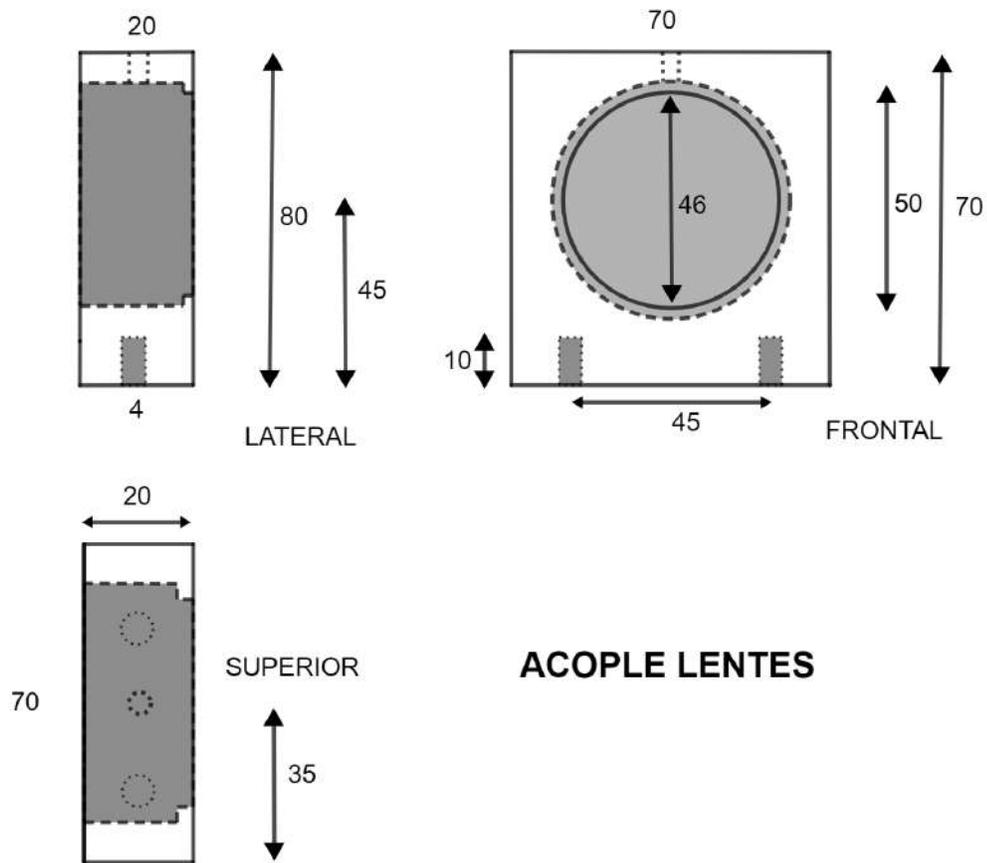


Figura 2-11.: Dimensiones y vistas para los soportes de las lentes ópticas en mm (incertidumbre $\pm 0,5$ mm).

La figura 2-11 nos muestra el acople de las lentes, el cuál es un bloque que irá fijo en la placa, es decir, a diferencia del acople para las fibras visto anteriormente, este soporte no tiene cuñas para moverlo finamente, ya que la distancia entre las lentes y la rejilla de difracción no es relevante una vez que el haz esté colimado. Las lentes tienen un diámetro de 50mm, por lo cual se añade una cuña circular de 46mm de diámetro interno para que la lente repose sobre la misma y de total perpendicularidad con respecto al eje óptico. Adicionalmente se añadieron dos tornillos que asegurarán el soporte a la placa asegurando de igual forma perpendicularidad sobre el eje óptico, y se introdujo un tercer tornillo en la parte superior para con un tornillo de plástico asegurar la lente y que esta quede fija.

2.2.3. Soporte Rejilla de Difracción.

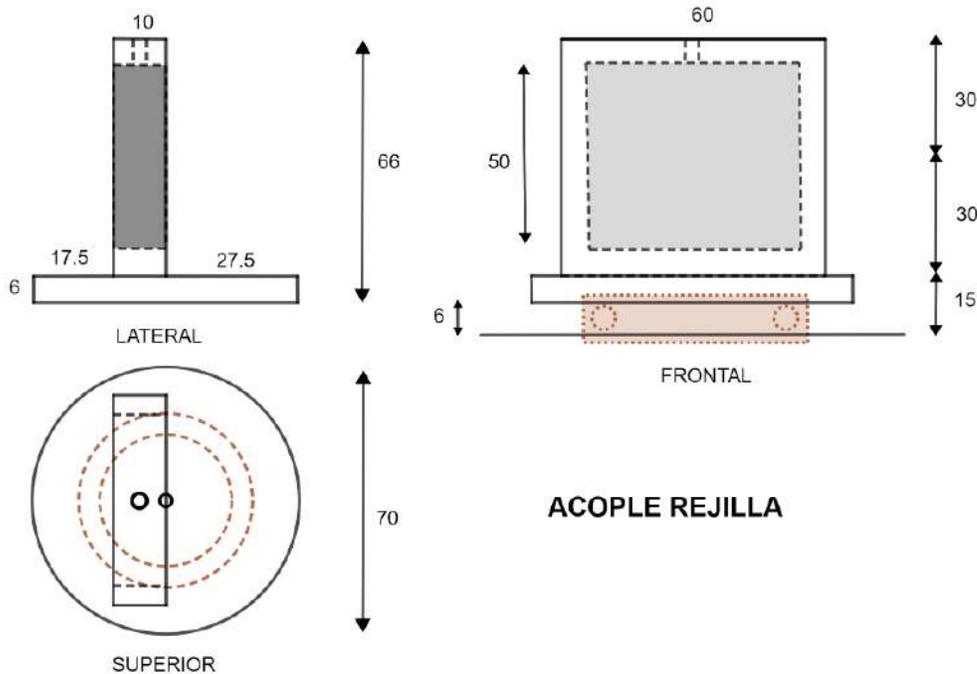


Figura 2-12.: Dimensiones y vistas del soporte para la rejilla de difracción en mm (incertidumbre $\pm 0,5$ mm).

En la figura **2-12** vemos el soporte de la rejilla de difracción, el cuál fue un reto, ya que en este caso se debe construir un soporte que nos permita fijar la rejilla sobre una base perpendicular al eje óptico y que además rote para poder barrer todo el espectro visible. Para esto se hizo una pieza compuesta de tres partes, una rodamiento axial, el cuál va apoyado sobre una cuña cilíndrica en la placa base, una base circular la cuál lleva otra cuña cilíndrica que asegura rigidez y perpendicularidad en el sistema, y por último un marco cuadrado en el cual irá fija la rejilla de difracción usando un tornillo plástico. Este último, es un marco que se encuentra fuera del eje de simetría del sistema, ya que la idea es que sea la superficie de la rejilla quede justo en el eje de rotación de la pieza, y así asegurar simetría para cualquier ángulo de rotación. Estas tres piezas van sujetas por medio de tornillos, dos entre la base circular y el marco cuadrado, y uno entre la base circular y la placa base. En esta parte del diseño no se añadieron las dimensiones del rodamiento, ni de las cuñas sobre las cuales se soportará, ya que esto dependía de las dimensiones del rodamiento que se pudiese conseguir en el mercado, una vez obtenido, esto se arreglaría fácilmente en el maquinado de las piezas.

2.2.4. Soporte Cámara.

En cuanto al diseño del soporte para la cámara, es similar al soporte del adaptador MPO para las fibras ópticas, puesto que este también debe contar con un sistema para poder recorrer cierta distancia a través del eje óptico y así enfocar la imagen sobre el sensor CMOS.

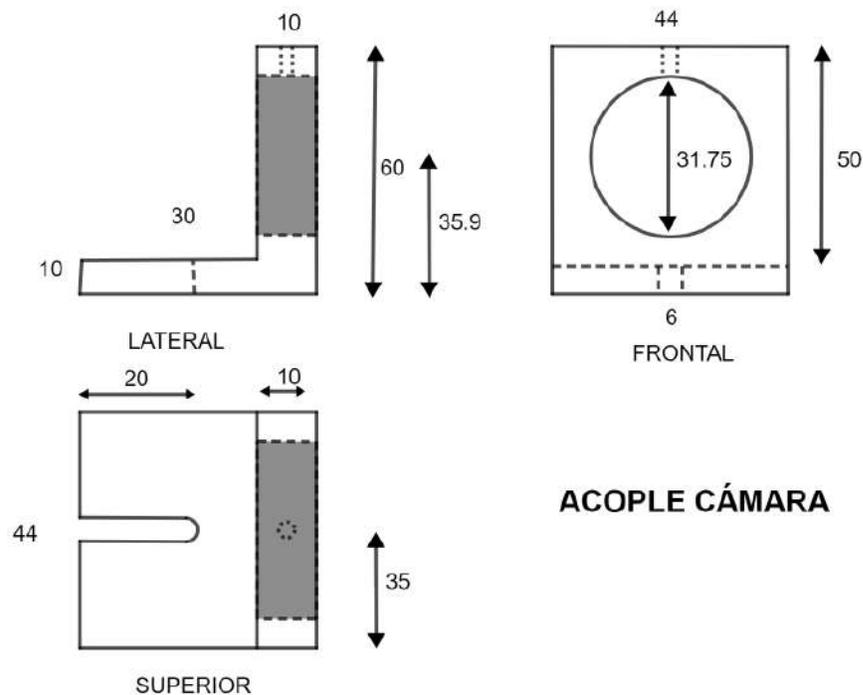


Figura 2-13.: Dimensiones y vistas del soporte para la Cámara en mm (incertidumbre $\pm 0,5$ mm).

En la figura **2-13** vemos que también se usó un soporte en forma de “L” con una cuña que aportará al menos un rango de movimiento de 30mm a lo largo del eje óptico. En la parte frontal vemos un agujero de 31.75mm, lo cual equivale a 1.25 pulgadas, que es una medida estándar usada en cámaras planetarias o con adaptador a porta oculares de telescopio. En la parte superior se muestra un agujero en el cual va un tornillo que fija la cámara una vez esté en la posición correcta.

2.2.5. Placa base.

Una vez descritos todos los soportes de los elementos ópticos, queda montar estos sobre una placa totalmente plana y rígida, en la cuál se dispondrán los soportes a las distancias adecuadas y sobre el eje óptico que conforma el sistema.

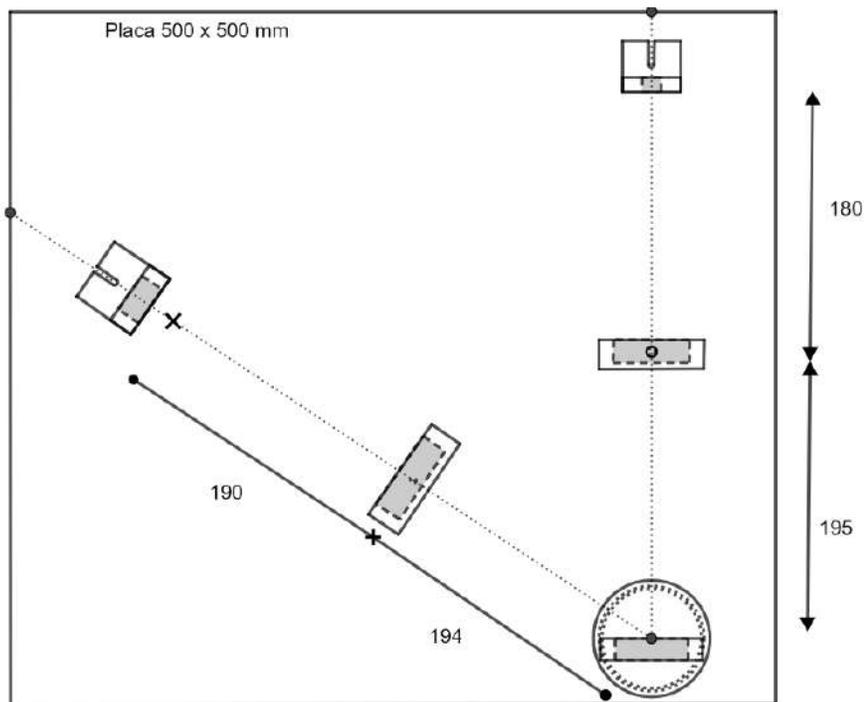


Figura 2-14.: Dimensiones y vista superior de los soportes sobre la placa base en mm (incertidumbre $\pm 0,5$ mm).

En la figura **2-14** se observa la disposición de los elementos ópticos, comenzando desde la parte superior derecha con el soporte del adaptador MPO, seguido del soporte de la lente colimadora, en la parte inferior derecha se ubica el soporte rotativo de la rejilla, y hacia el lado izquierdo de la imagen los soportes para la lente enfocadora y cámara respectivamente. Todos estos están ubicados sobre una placa de 500x500 mm.

En la figura se observa en línea punteada el eje óptico, el cual como se indicó anteriormente fue diseñado usando un Láser de Helio-Neón, obteniendo un ángulo de aproximadamente dos veces el ángulo Blazed de la rejilla. En la imagen también se observa una **x** cerca al soporte de la cámara, el cual muestra la posición a la que debe ir el sensor CMOS con respecto a la lente enfocadora.

2.2.6. Acople Fibras Ópticas a telescopio.

Una vez diseñados todos los soportes para los elementos ópticos del instrumento, queda diseñar el acople que irá al telescopio justamente dónde se forma el plano imagen del mismo, el cuál contendrá las fibras ópticas individuales que recolectarán información de diferentes zonas en el plano imagen.

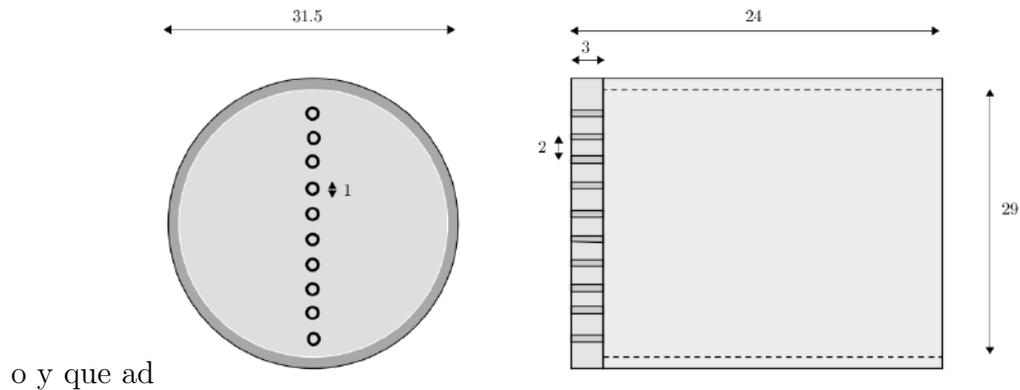


Figura 2-15.: Dimensiones y vistas del acople para la salida del Telescopio, medidas en mm (incertidumbre $\pm 0,5$ mm).

En la figura **2-15** se observa el diseño del porta fibras, el cual básicamente es un cilindro con una tapa frontal semitransparente, en donde se soportan las fibras creando un arreglo vertical de 10 fibras, siendo las otras 2 fibras restantes usadas para calibraciones con lámparas de descarga. La idea de que la tapa del acople sea semi transparente, consiste en que se pueda ver a través de ella una imagen del astro observado, dándonos una idea de que región estamos observando y si la imagen se encuentra enfocada.

Por lo dicho anteriormente este soporte no puede ser metálico, por lo que será plástico con una tapa en acrílico y un cuerpo en otro material. El cuerpo debe tener un diámetro aproximado de 1,25 pulgadas para poder ser usado con cualquier porta ocular de telescopio.

3. Construcción de una cámara heliosférica para imágenes espectrales.

3.0.1. Construcción de los soportes y acoples.

Una vez diseñados todos los soportes y acoples, se procedió a la construcción, que como ya se mencionó se pensó en Duraluminio, excepto por un acople al telescopio que será en plástico. El proceso de cortado y maquinado se llevó a cabo en el taller de mecánica fina dentro del edificio de Matemáticas, Física y Estadística de la Facultad de Ciencias en la Universidad Nacional de Colombia.

A continuación se muestran algunas imágenes durante el proceso de maquinado y ensamble de toda la soporteria, comentando cambios que se realizaron o mejoras que se incluyeron a medida que se iban construyendo las piezas.



Figura 3-1.: Imagen previa del soporte al adaptador MPO.

En la imagen **3-1** se observa el soporte del adaptador MPO, el cuál se observa de color aguamarina en la parte derecha. También se observa una mejora que se introdujo al diseño mecánico de esta pieza, y es el colocar el adaptador MPO en una pieza cilíndrica, esto tiene como fin el poder alinear finamente las fibras y que el arreglo quede perfectamente vertical.

En cuanto al soporte, se observa que la construcción se da en dos partes, una que es la base, en la cual se usa una lámina de Duraluminio un poco más delgada, y otra que es la pieza vertical, la cuál es un poco más gruesa para dar mayor rigidez. Estas piezas se unen por medio de tornillos avellanados M6 desde la parte inferior. La construcción se tuvo que llevar de esta forma ya que los costes del Duraluminio son elevados, por lo cual hacer una sola pieza requiere un gasto excesivo de material, en cambio al realizar las piezas de esta forma se minimiza la perdida de material y por ende se ahorra costes de construcción.



Figura 3-2.: Imagen previa de la construcción del soporte de la rejilla de difracción.

En la imagen **3-2** se observa el proceso de construcción para el soporte de la rejilla, donde se observa en la parte izquierda el proceso de construcción del marco cuadrado, el cual tuvo como mejora la construcción de una pequeña muesca para que la rejilla se apoyara y quedara perfectamente paralela a la cara del marco.

Ahora, en la parte superior derecha vemos la base cilíndrica, la cuál tuvo como mejora el uso de un rodamiento para evitar fricción al momento de sujetar todas las piezas en conjunto con un tornillo pasante. En esta imagen también se observan los dos agujeros por los cuales pasan los tornillos avellanados que conectan con el marco cuadrado.

En la parte inferior derecha se observa la parte inferior de la base cilíndrica, en la cual se muestra el rodamiento axial con una de sus pistas incrustada sobre la base.



Figura 3-3.: Imagen previa del soporte de las lentes acromáticas.

En la imagen **3-3** vemos el soporte para la lente, el cual no tuvo ninguna mejora en su estructura. El único cambio que se introdujo fue que solo se usará un tornillo para sujetarlo a la placa base, dicho tornillo va paralelo al eje óptico, lo cual permitirá rotar la lente en este eje y calibrar posteriormente la colimación de forma precisa.



Figura 3-4.: Imagen previa del soporte de la cámara.

Por último en la parte de soporte mecanizados tenemos el soporte de la cámara mostrado en la imagen **3-4**, donde se observa que al igual que para el adaptador MPO, se realizó la construcción en dos piezas (base y pieza vertical). En esta pieza se buscaba que el agujero del soporte coincidiera justo con el diámetro de la cámara, esto para asegurar que el sensor quede lo más perpendicular posible al eje óptico.



Figura 3-5.: Imagen previa de la disposición de los soportes en la placa base.

Una vez hechos los soportes, y rectificada la placa (es decir, que fuese totalmente plana), se hicieron los respectivos agujeros con las distancias adecuadas y se montaron los soportes para su posterior verificación. En la imagen **3-5** se observa la disposición de todos los soportes. En este punto se determinó que era necesario añadir una pequeña muesca en el agujero del tornillo que sujeta el soporte de la rejilla, esto para poder mover el soporte y que quede justo en la intersección de los ejes ópticos entre la lente colimadora y enfocadora. Dicho esto se vio que no era necesario realizar una cuña para el rodamiento de la rejilla en la placa, ya que también realizar esta cuña era complicado dadas las dimensiones de la placa.

En la imagen también se observa un pequeño motor, y una correa. Esta idea vino como solución posterior al diseño, puesto que originalmente se pensaba con la ayuda de un tornillo micrométrico

externo o algún piñón mover la rejilla, pero todas estas ideas resultaban muy complicadas. Por esta razón se usó un motor paso a paso y una correa, ya que gracias a que el cilindro base de la rejilla es lo suficientemente grande, basta con realizar una muesca y templar un poco la correa para que por fricción y usando el motor, se pueda mover sin problema todo el soporte de la rejilla.

Dicho esto, solo quedaba asegurar el motor en la posición correcta, realizar la muesca al cilindro base de la rejilla y pintar todas las piezas de color negro mate para eliminar cualquier reflejo de luz parásita, para posteriormente ser ensamblado y calibrado usando nuevamente el láser de Helio-Neón mostrado en la sección diseño óptico.

3.0.2. Ensamble y alineación.

Ya pintadas todas las piezas, y hechas las mejoras en el sistema que rota la rejilla, se montaron todos los soportes y elementos ópticos, además se adecuó un montaje en la mesa óptica para con ayuda del láser de Helio-Neón alinear y enfocar correctamente el sistema.

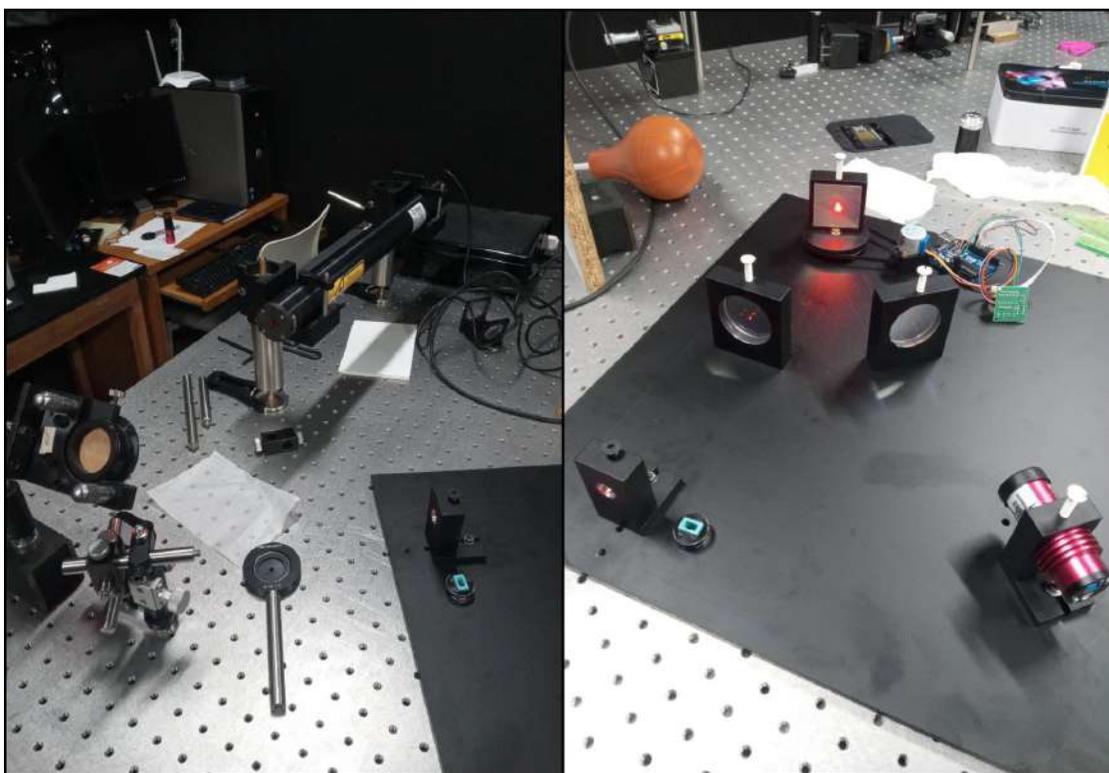


Figura 3-6.: Montaje final dispuesto para alineación con el Láser.

En la figura 3-6 se observa en la parte izquierda el montaje para dirigir el láser a la entrada del instrumento, este montaje es esencialmente el mismo que se usó en el diseño óptico visto anteriormente. A la derecha de la imagen tenemos el instrumento, en donde se observan todos los elementos ópticos en sus respectivos soportes. A un lado se observa el acople MPO, ya que este no es usado

puesto que el láser en esta prueba solo se usa con efectos de alineación.

En la parte derecha de la imagen también se observa la primer prueba de movimiento de la rejilla usando un microcontrolador, para poder mover con precisión el motor y poder realizar posteriormente la equivalencia entre el número de pasos del motor y el ángulo de rotación en el soporte de la rejilla.

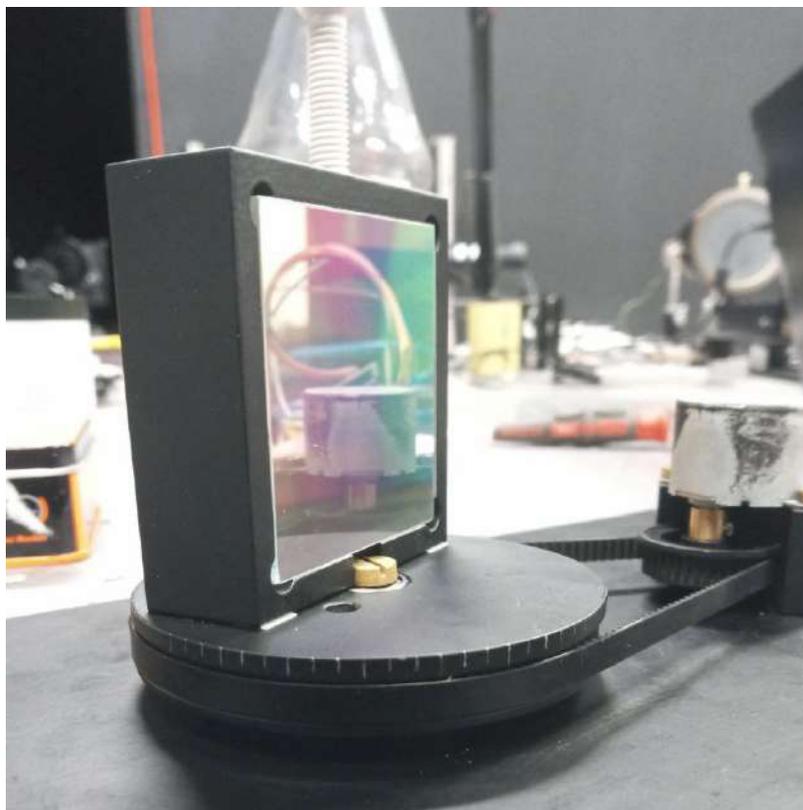


Figura 3-7.: Sistema de rotación para el soporte de la rejilla usando un motor paso a paso.

En la figura 3-7 se muestra una vista más detallada del sistema de rotación para la rejilla, el cual se conforma del soporte, una correa y el motor paso a paso. Usando los pasos y tiempos adecuados podemos variar la velocidad de rotación en la rejilla, por lo que en este primer ensayo de alineación se vio que esta velocidad de rotación entre más pequeña, ayudaría a que el haz recorriera menor distancia en el sensor de la cámara en un mayor tiempo. Esto tiene la ventaja de aumentar la precisión en el ángulo que se puede girar el soporte de la rejilla. Para solucionar esto bastó con cambiar el piñón del motor al más pequeño posible, aumentando así el torque entre el piñón y el soporte de la rejilla, y disminuyendo la velocidad angular del mismo.

Ya montados los elementos, se alinea el instrumento en su eje óptico, buscando foco en la salida de las fibras, es decir, asegurando que el haz salga colimado una vez pase por la primer lente. Ahora, la alineación también se debe realizar para la segunda lente, al igual que para el sensor y salida MPO de las fibras, puesto que estas deben quedar totalmente verticales con referencia al plano que

describe el eje óptico. Esta parte de alineación usando el sensor de la cámara será mostrado en el siguiente capítulo, puesto que ya no se usa un Láser, debido a que por cuestiones de montaje no se pudo regular su intensidad, por lo cuál la calibración de estos elementos se llevó a cabo con una lámpara de descarga.

Ahora, por último en esta etapa de fabricación se construyó una caja que servirá como "cuarto oscuro" del instrumento, y permitirá que se puedan hacer las mediciones de una forma mucho más cómoda en cualquier lugar.

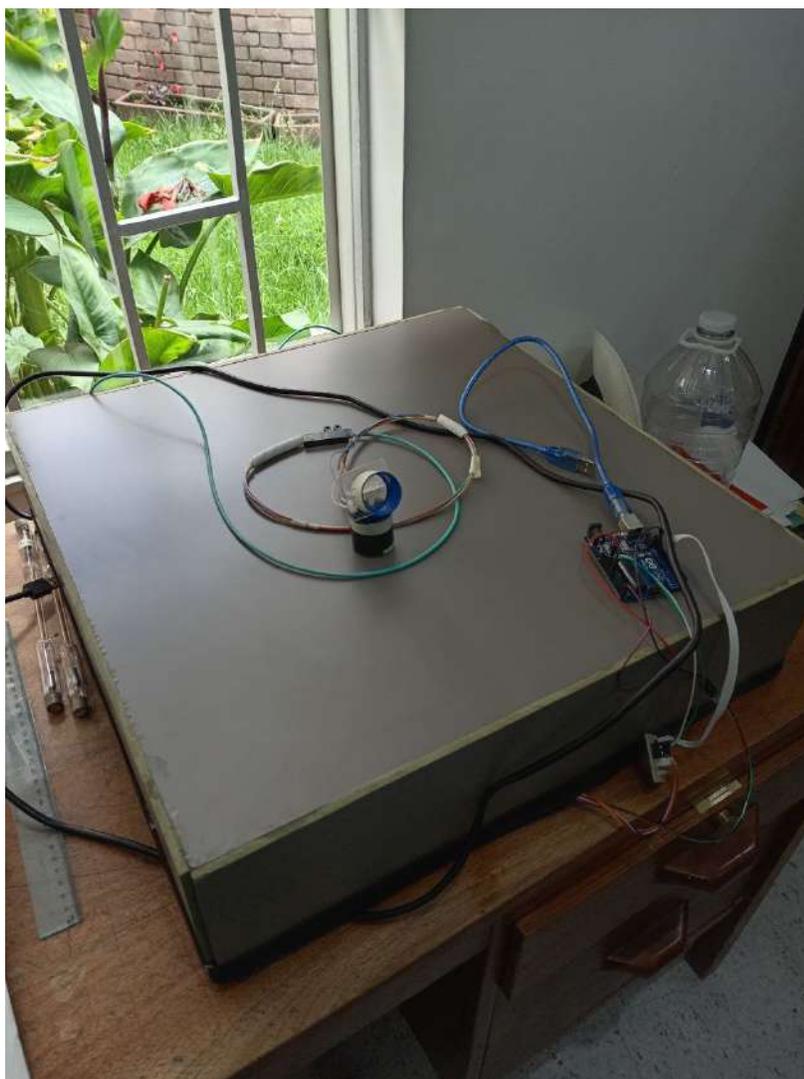


Figura 3-8.: Caja para proteger el instrumento de luz externa.

En la figura **3-8** se observa como queda ubicado el instrumento en un escritorio dentro de las instalaciones del Observatorio Astronómico Nacional, en el se muestran el conjunto de fibras ópticas (cable aguamarina) que va a la entrada del telescopio, junto con la caja que actúa de cuarto oscuro protegiendo el instrumento de luz externa que pueda afectar los datos obtenidos.

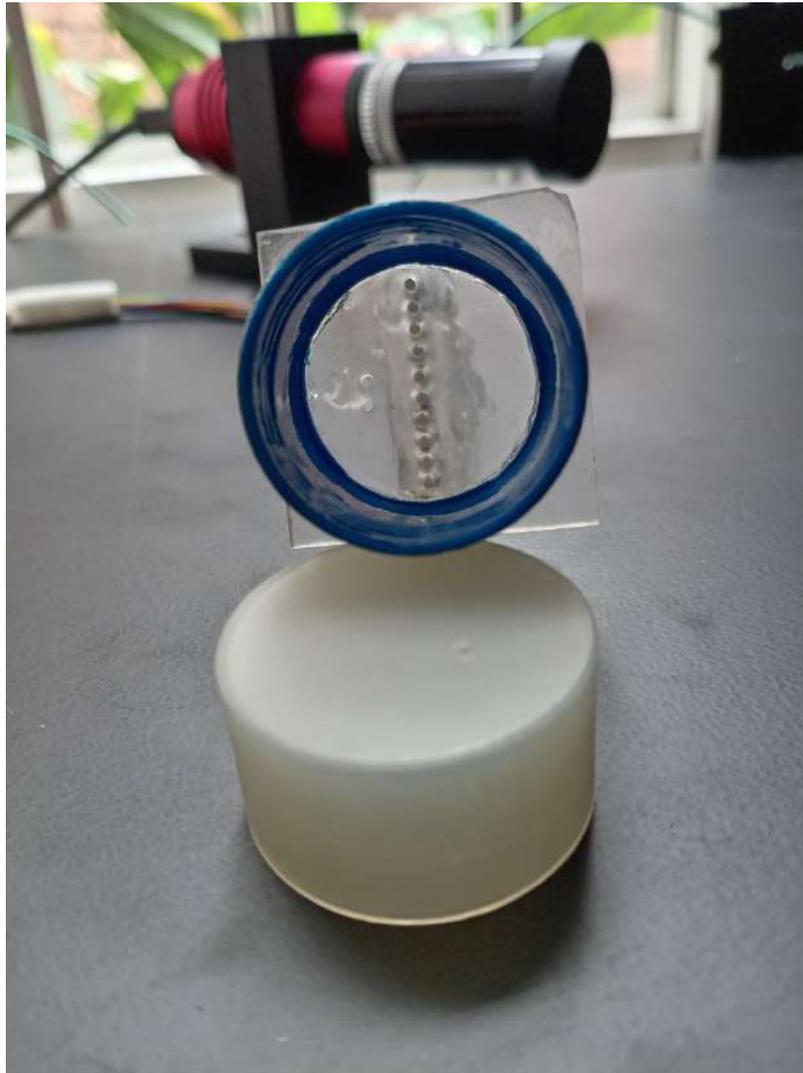


Figura 3-9.: Acople de las fibras ópticas al telescopio.

Por otra parte tenemos el acople de 1,25 pulgadas mencionado en el diseño mecánico, el cual es mostrado en la figura **3-9**, en el vemos un arreglo lineal de 10 fibras y otras dos fuera que pueden ser retiradas para usarlas con una lámpara de calibración simultáneamente o ser usadas simplemente en otros puntos. Se destaca el uso de un material semi transparente en la tapa del acople, en este caso es acrílico, el cual fue esmerilado en su lado interior, esto con el fin de poder obtener una imagen del astro en estudio en tiempo real y así poder ubicar las fibras en la posición deseada.

Una vez construido el prototipo procedemos a realizar la calibración y primeras observaciones, las cuales se efectuaron con un telescopio reflector cassegrain con la metodología que se explicará en el siguiente capítulo.

4. Calibración y verificación observacional de una cámara heliosférica para imágenes espectrales.

Una vez alineado el instrumento usando el Láser de Helio-Neón, junto con la mesa óptica, se realizan las primeras pruebas usando una lámpara de descarga y el espectro solar. Estas pruebas tienen como objetivo calibrar la rotación de la rejilla, alineación y enfoque de la cámara, alineación del adaptador MPO, calibración de píxeles en función de la longitud de onda, tiempos de exposición, control de iluminación, apertura del telescopio, entre otros, los cuales serán explicados a continuación de forma detallada.

4.1. Alineación del adaptador MPO y Cámara.

Para realizar la respectiva alineación del adaptador MPO y el sensor de la cámara, se usó una lámpara de descarga, ya que con ellas se observan varias líneas a excepción del Láser. En este caso se usó un tubo de descarga con Helio, ya que dicho elemento presenta pocas líneas pero con gran intensidad en brillo, es decir, son fáciles de distinguir.

El procedimiento consiste en alinear primero el adaptador MPO de manera vertical, y ubicar el sensor de forma horizontal a “ojo”, ya que posteriormente se realizará un ajuste fino usando el sensor CMOS de la cámara. Una vez hecha esta alineación a groso modo, se procede a enfocar la cámara, para lo cual se mueve la rejilla hasta encontrar una línea de emisión, y usar esta como referencia para el enfoque de igual manera como se hizo en el diseño óptico usando el Láser de Helio-Neón.

Ya enfocada la cámara se alinea primero el adaptador MPO, para esto se usan varias líneas espectrales, rotando el adaptador hasta que el arreglo de las 12 fibras quede ortogonal al eje de longitudes de onda como se muestra a continuación.

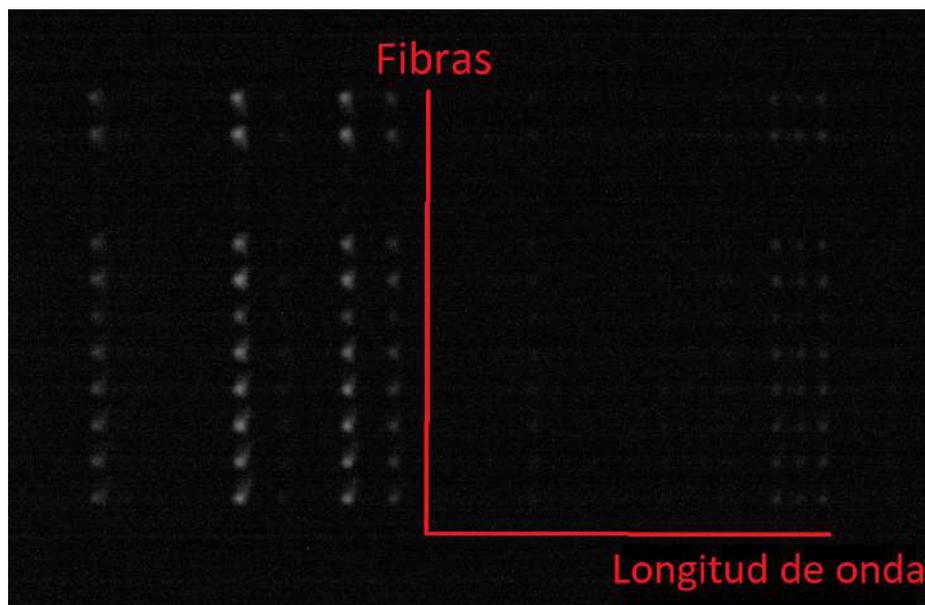


Figura 4-1.: Líneas de emisión de Argón, usando 200ms de exposición y una ganancia del 50 %

En la figura 4-1 se observa una región del espectro de emisión del Argón, dónde se muestran los ejes que corresponden al arreglo vertical de fibras ópticas y la dirección de difracción, siendo estos perpendiculares cuando el adaptador MPO es perfectamente vertical, es decir está alineado.

Una vez alineado el adaptador, se orienta correctamente el sensor de la cámara, para lo cual basta con hacer coincidir alguna línea de emisión con un borde vertical en el sensor, de esta manera el sensor quedará perfectamente alineado, mostrando en el *eje x* la dirección de difracción y en el *eje y* la dirección de las fibras como se muestra en la figura 4-1.

4.2. Calibración rotación rejilla.

En esta sección se hizo una prueba de calibración para el sistema de rotación de la rejilla de difracción, el cuál consistía de manera empírica, en buscar los valores adecuados de pasos y velocidad que permitieran realizar una función entre los pasos del motor y el rango espectral visto en el sensor de la Cámara. Para esto era necesario introducir un cero de referencia en el número de pasos y sentido de rotación, lo cual se solucionó fijando el cero de pasos justamente en el orden cero de la rejilla de difracción. Ahora, para determinar esta posición se usó un foto sensor, de tal manera que cuando la rejilla estuviese en esta posición de orden cero, el foto sensor mostrara una señal digital con la cual trabajar.

Realizando las respectivas mediciones se determinó que son necesarios 17.000 pasos para dar una vuelta completa a la rejilla, por lo tanto ya que los pasos son homogéneos, se tiene que para cada paso la rejilla rota alrededor de $0,0212^\circ$ o lo que es equivalente 76.3 segundos de arco.

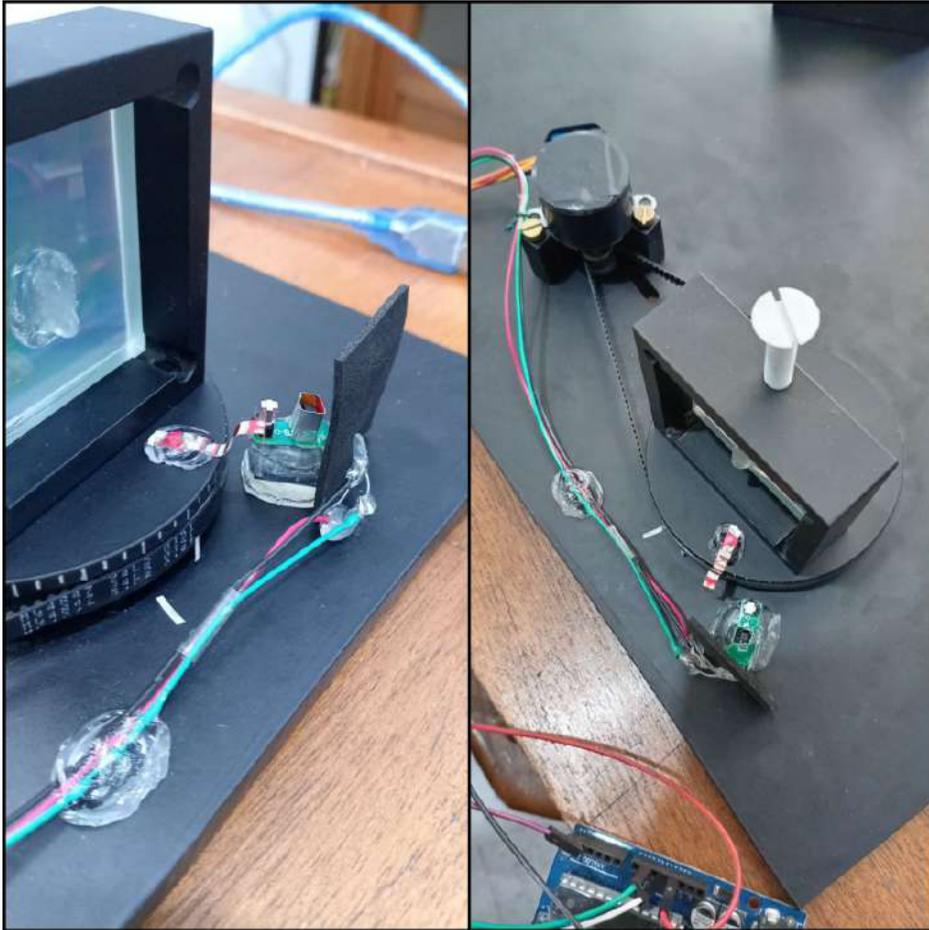


Figura 4-2.: Sensor de barrera, usado para determinar el orden cero de difracción.

En la figura **4-2** se muestra el foto sensor o sensor de barrera, el cual manda una señal digital al microcontrolador cuando la rejilla se encuentra en posición cero. Una vez puesto el sensor y teniendo un cero de referencia, se puede hallar una relación entre la cantidad de pasos que avanza el motor y la función de onda observada, para lo cual se usa nuevamente una lámpara de calibración con líneas fáciles de identificar, por ejemplo elementos como el Hidrógeno y Helio.

En la figura **4-3** se muestra la relación entre la longitud de onda observada en nm y los pasos asociados a estas, mostrando una tendencia lineal, lo cual nos permite usar los pasos como una primera calibración.

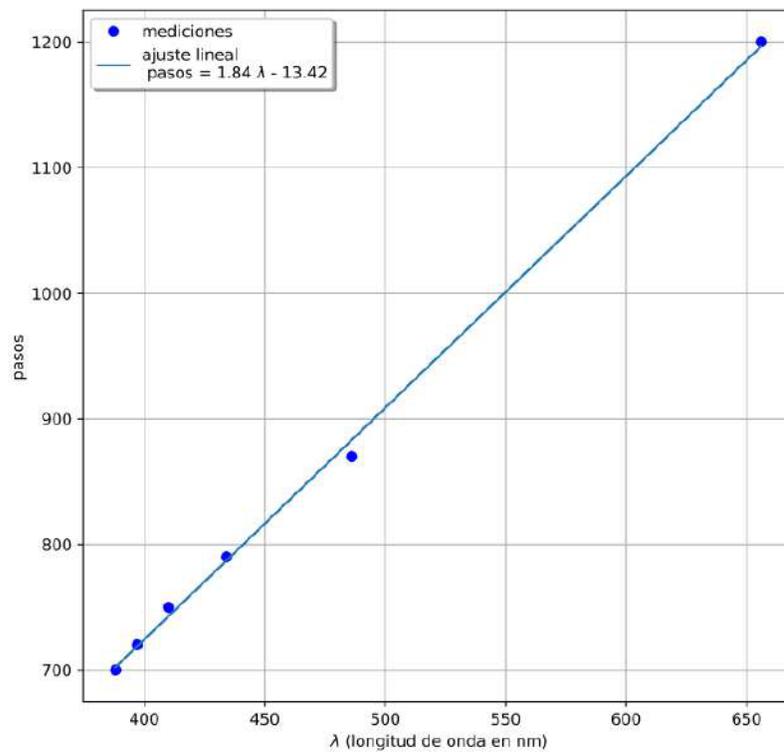


Figura 4-3.: Relación entre la longitud de onda y los pasos del motor.

Ya con esto, se realizó una rutina usando el microcontrolador Arduino, la cual siempre que este sea conectado hace que la rejilla se gire hasta el orden cero o “Home”, ya estando en el Home, a partir de los pasos y usando la relación longitud de onda versus pasos, podemos situarnos en una región bastante aproximada a la que queremos estudiar, ya con esto después se podrá calibrar finamente el píxel del sensor de la cámara en función de la longitud de onda como se mostrará posteriormente.

4.3. Eliminación de Hot Pixels.

Antes de realizar la respectiva calibración de píxel versus longitud de onda, se debe hacer un tratamiento a las imágenes, ya que estas presentan píxeles calientes, debido a que píxeles en el sensor CMOS de la cámara se encuentren dañados o no obtengan una respuesta apropiada.

Para eliminar esto se hace una captura con la cámara tapada, para que el sensor no reciba luz y se obtenga información propia. En esta captura se toma un tiempo de exposición grande, de alrededor de 5 segundos, y una ganancia del 90 %, obteniendo así una imagen donde salen los píxeles saturados o que muestran un valor elevado de intensidad ya que están quemados.

Ya obtenida esta imagen, usamos esta matriz de datos para sustraer los píxeles calientes a las demás imágenes, realizando una rutina en Python la cual ubica los píxeles calientes en la imagen y cambia el valor de intensidad de estos usando el promedio de los píxeles vecinos.

4.4. Calibración Píxel versus Longitud de Onda.

El siguiente paso es poder calibrar los espectros obtenidos en función de la longitud de onda, ya que estos se capturan como una matriz conformada por píxeles. Para poder realizar esta calibración, se debe buscar una relación entre una fila de píxeles en la imagen y un intervalo de valores asociados a longitudes de onda. Esto se realiza usando una lámpara de calibración con varias líneas de emisión previamente identificadas (la asignación a cada línea de emisión se realizó usando los datos de referencia de NIST), y asociamos a cada píxel donde se encuentra dicha línea el valor correspondiente de λ . Dicho esto, entre más líneas tengamos, más precisa va a ser la función que logremos obtener. Ahora bien, el tener más líneas, implica identificarlas, lo cual no suele ser fácil en algunos espectros, dada la probabilidad de transición que estas puedan tener y la intensidad de cada una.

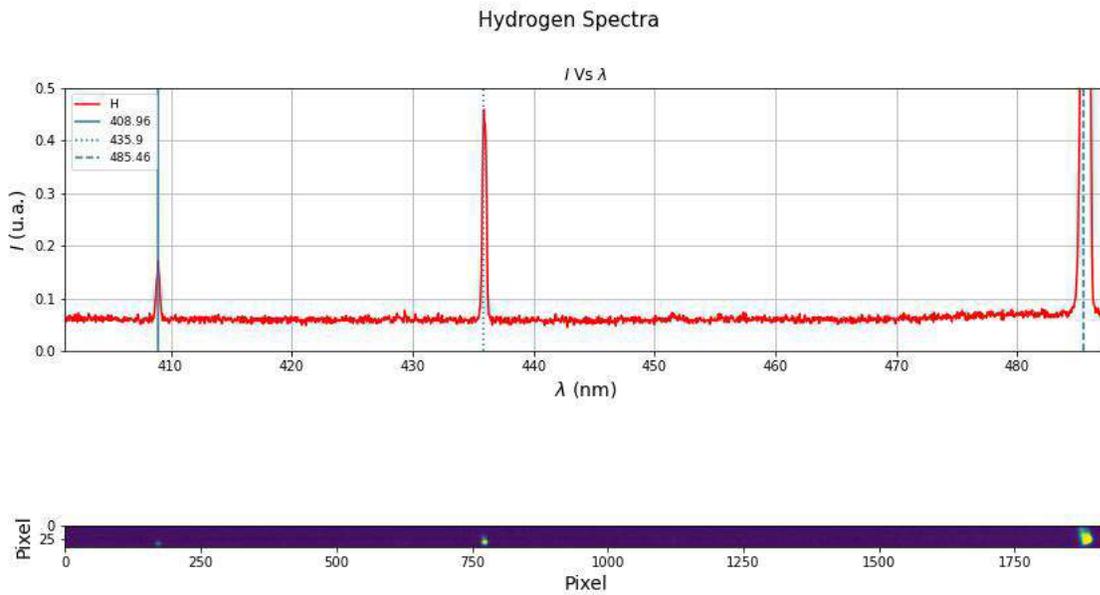


Figura 4-4.: Relación píxel - longitud de onda usando el espectro de emisión del Hidrógeno neutro.

En la figura 4-4 se muestra una calibración usando el espectro del Hidrógeno neutro usando las líneas $H\delta$, $H\gamma$ y $H\beta$ respectivamente, donde en la parte inferior se muestra un recorte asociado a una fibra cualquiera, y en la imagen superior un análisis de intensidad usando una rutina en Python. En la imagen inferior se observa la matriz de píxeles y la intensidad asociada a cada uno, la cual suele tener un rango de 0 a 250 para describir dicha intensidad, dicho esto se realiza una rutina la cual identifica los valores máximos asociado a cada línea de emisión, de tal manera que podemos asociar el valor de longitud de onda y el píxel donde se sitúa. Ya identificados estos puntos se usa una función de Python la cual los ajusta a la función que mejor se acomode. En este ejemplo de calibración se evidencia que entre más líneas se identifiquen, mejor será la función que relacione los píxeles con la longitud de onda.

Una vez obtenida la función, se modifica el arreglo de píxeles horizontales y se pasan a sus respec-

tivos valores de longitud de onda en nm como se observa en la parte superior de la figura.

Ahora bien, ya llegados a este punto tenemos información de la resolución espectral del instrumento, la cual en el análisis de imagen es de 0.047 nm/píxel, pero debido a difracción en las fibras ópticas entre otros, esta disminuye a aproximadamente 0.1 nm, con lo cual tenemos una resolución espectral medida experimentalmente de 1\AA

4.5. Control de iluminación.

Hasta este punto los espectros capturados han sido obtenidos debido a emisión de elementos usando la lámpara de descarga, esto hace que se usen tiempos de exposición de alrededor de 200 a 400 ms. Ahora bien, los espectros de astros luminosos suelen ser mucho más brillantes, por lo que en el instrumento se debe controlar la cantidad de luz que entra al sistema, y que no solo se dependa de los límites de exposición que brinda la cámara. Para esto se introducen diafragmas de apertura en la lente colimadora y lente enfocadora.

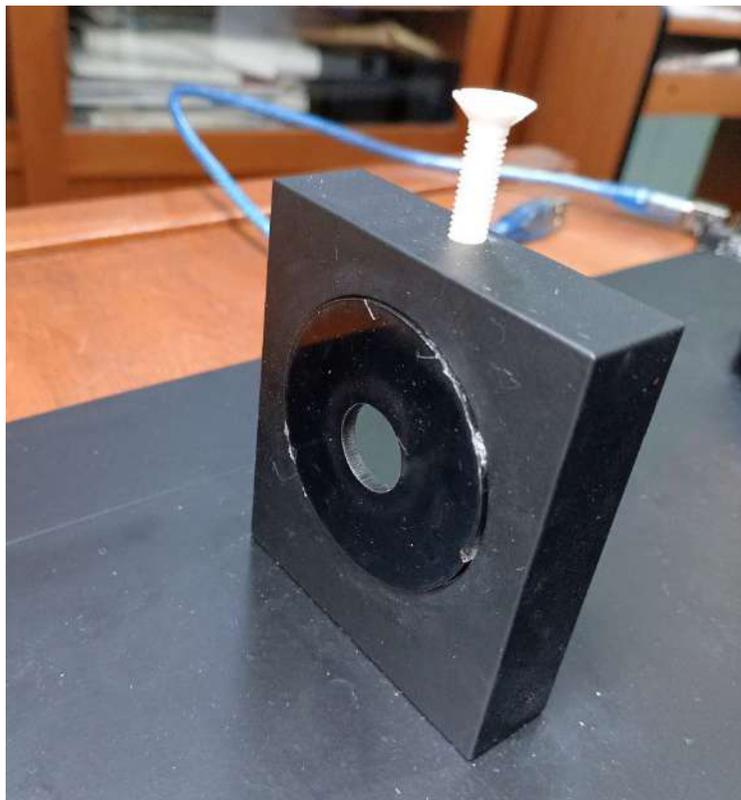


Figura 4-5.: Diafragma de apertura en la lente colimadora.

Estos diafragmas consisten en cilindros deacrílico oscuro de diferentes aperturas, 10, 15,20 y 25 mm, cortados de forma precisa usando una cortadora láser, los cuales se ajustan al soporte de la lente y pueden ser cambiados según sea el caso para mejorar la nitidez de las imágenes obtenidas. en

la figura 4-5 se muestra como va ubicado el diafragma en el soporte de la lente, permitiendo montar y desmontar de manera fácil cuando sea necesario cambiar este valor de apertura. Es importante resaltar que para realizar las siguientes pruebas se montó un diafragma de 20 mm de apertura en la lente colimadora, mientras que la lente enfocadora se dejó con full apertura.

4.6. Obtención del espectro difuso del Sol.

Ya hecha la calibración píxel versus longitud de onda, se procede a tomar una imagen del espectro difuso del Sol, es decir, de luz proveniente del Sol pero que no forma ninguna imagen. Para esto basta con colocar el arreglo de fibras apuntando a una dirección cercana a donde se encuentra el Sol.

En este caso la intensidad es mucho más alta que la registrada con las lámparas de descarga, por lo cual se usa una exposición menor, de alrededor de 30ms y una ganancia del 25 %.

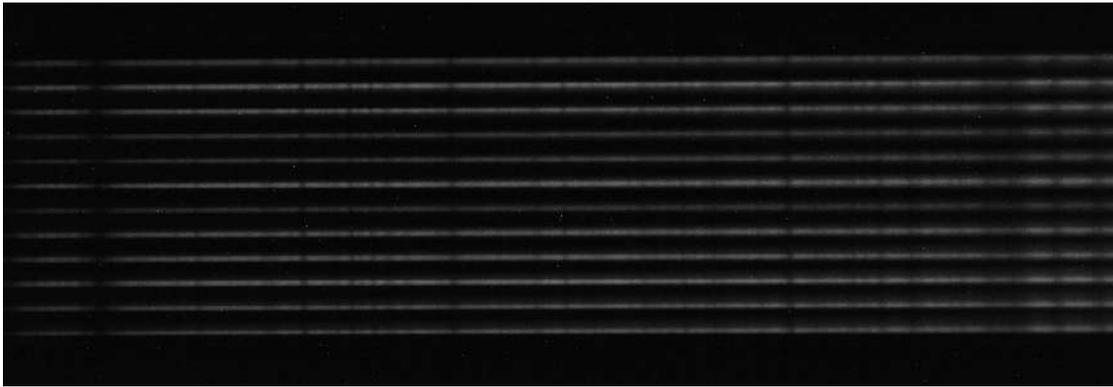


Figura 4-6.: Espectro de absorción proveniente de la luz difusa del Sol.

La figura 4-6 se muestra el espectro de absorción registrado por la cámara, en donde se observan las líneas de absorción presentes en el espectro solar (líneas verticales oscuras) y las 12 fibras ópticas (líneas horizontales).

Una vez obtenida la imagen se eliminan los píxeles calientes usando la rutina anteriormente descrita, para posteriormente realizar el análisis de intensidades y asociar a cada píxel su respectivo valor de longitud de onda.

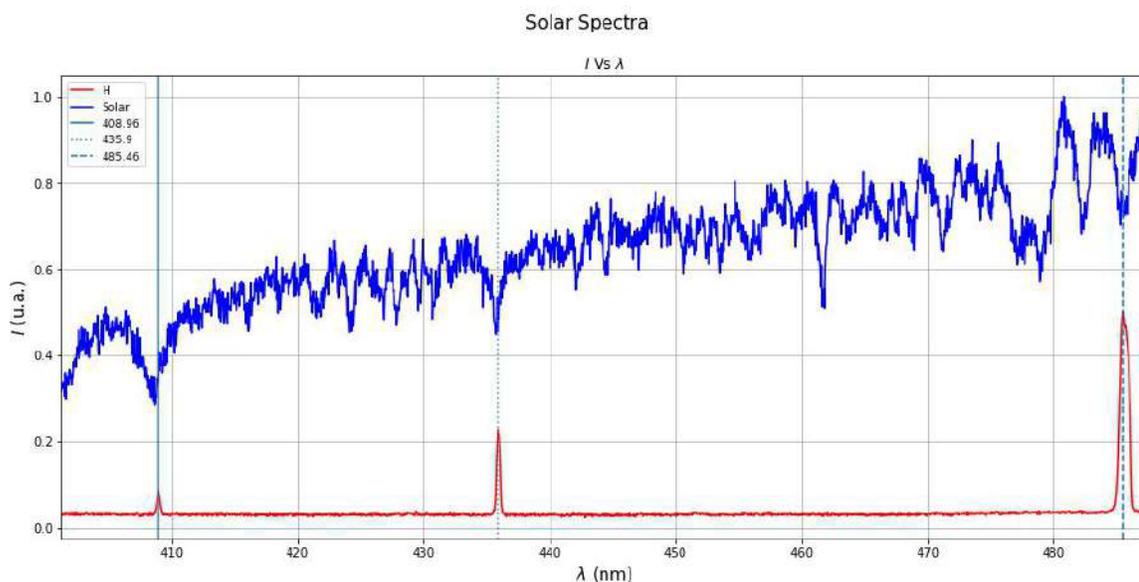


Figura 4-7.: Análisis del espectro de absorción debido a luz difusa del Sol, referenciado con el espectro de emisión del Hidrógeno neutro.

En la figura 4-7 se muestra una superposición del espectro Solar y las líneas $H\delta$, $H\gamma$ y $H\beta$, ajustados a una intensidad normalizada, en dónde se observa el rango espectral de la captura, entre 400 nm y 490 nm y las líneas de absorción presentes, destacando la correspondencia de las líneas del Hidrógeno.

En la siguiente tabla se muestran las líneas observables a simple vista que corresponden a las líneas de Fraunhofer entre los 400 y 650 nm, la cual es nuestra ventana de observación, dada por la exposición y el tipo de sensor que estamos usando. En la tabla se resaltan las líneas entre 400 nm y 490 nm que corresponden al rango espectral de la figura 4-7 mostrada anteriormente. Adicionalmente se observan algunos de los elementos neutros que contribuyen, como lo son el Hierro, Magnesio, Sodio e Hidrógeno; para el caso de los elementos pesados se tiene una basta presencia de líneas de absorción, encontrando tripletes y dobletes, todo esto debido a su gran cantidad de electrones y posibles transiciones que puede realizar este. Para entender mejor veamos el ejemplo del Hidrógeno, en el cual vemos las líneas de absorción relacionadas con la **serie de Balmer** $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ y $H\delta$.

Designación	λ (nm)	Elemento
C	656.281	$H\alpha$
D1	589.592	Na
D2	588.995	Na
D3	587.561	He
E	527.039	Fe
b1	518.362	Mg
b2	517.270	Mg
b3	516.891	Fe
b4	516.733	Mg
c	495.761	Fe
F	486.134	$H\beta$
d	466.814	Fe
e	438.355	Fe
G	434.047	$H\gamma$
G	430.790	Fe
G	430.774	Ca
h	410.175	$H\delta$

Tabla 4-1.: Principales líneas de absorción del espectro Solar, catalogadas como líneas de Fraunhofer.

Designación		λ (nm)	Transición n	$A(s^{-1})$
Fraunhofer	Balmer			
C	H α	656.281	$2 \rightarrow 3$	4.41×10^7
F	H β	486.134	$2 \rightarrow 4$	8.41×10^6
G	H γ	434.047	$2 \rightarrow 5$	2.53×10^6
h	H δ	410.175	$2 \rightarrow 6$	9.73×10^5

Tabla 4-2.: Líneas de absorción en el espectro solar debidas a Hidrógeno, correspondientes a las cuatro primeras líneas de la serie Balmer.

En la tabla 4.6 vemos la designación, transición y probabilidad A para las líneas observadas correspondientes al Hidrógeno, donde se describe el término de transición (en este caso solo se tiene un cambio del número cuántico n) y A corresponde a la probabilidad de transición de Einstein (transición dipolar permitida), la cual satisface las reglas de selección ó reglas de oro de Fermi. En la designación vemos la conocida nomenclatura para las líneas de la serie de Balmer, las cuales corresponden a transiciones de un nivel de energía $n > 2$ al nivel $n = 2$, con lo cual estaríamos hablando de líneas de emisión, para el caso de un salto de $n = 2$ a un nivel con $n > 2$ tenemos

lineas de absorción.[Eisberg, 1985].

4.7. Generación de imágenes espectrales Modo Raster Scan.

Una vez calibrado el instrumento procedemos a realizar cubos de datos haciendo uso de un telescopio. Para esto se decidió usar un telescopio Celestron tipo Catadióptrico Schmidt-Cassegrain de 235 mm de apertura, distancia focal 2350 mm y $f/10$, esto con el fin de que la imagen generada en el plano imagen del telescopio fuese lo más magnificada posible.

Una vez seleccionado el telescopio se construyó una máscara para disminuir la apertura del mismo, ya que estamos observando el Sol, el astro más luminoso, y observar con full apertura puede causar daños irreparables en el equipo. Así pues se redujo la apertura a 15mm, como prueba inicial.

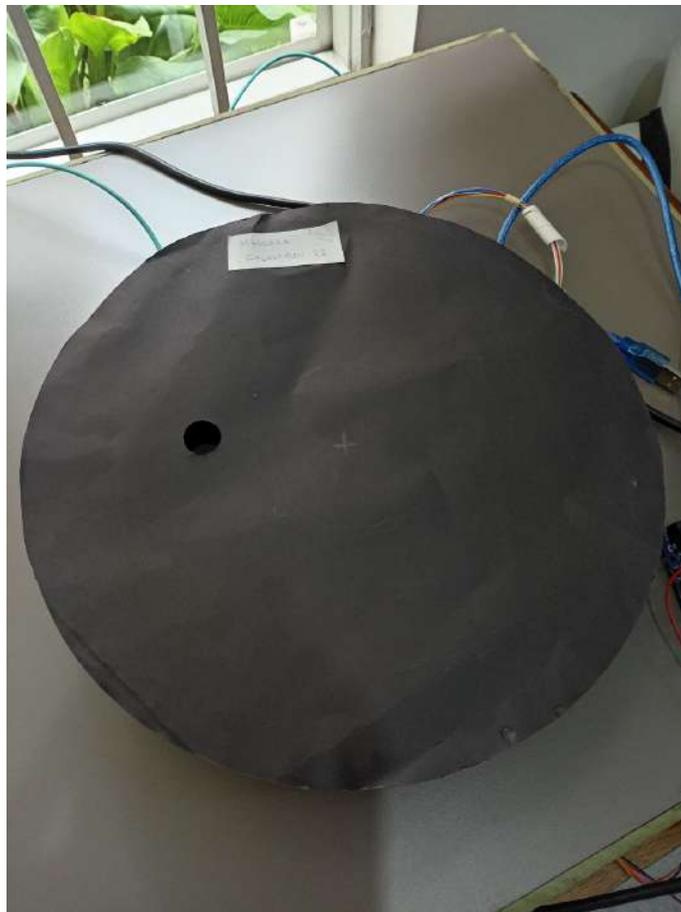


Figura 4-8.: Máscara usada para disminuir la apertura del telescopio.

En la figura 4-8 se observa la máscara construida, la cual simplemente está construida en un material que bloquee la luz y una apertura circular. Puesto que se redujo la apertura, se reduce la

cantidad de flujo de fotones, y por ende la intensidad en el plano imagen del telescopio, haciendo seguro poner el conjunto de fibras en dicho plano. Por otra parte al reducir la apertura se reduce el límite óptico, debido a la difracción $R = 1,22\lambda/D$, de tal manera que si reemplazamos los 15mm de apertura, obtenemos una resolución angular de $R = 9,22''$.

Ya en este punto se observa que la apertura de la máscara juega un papel importante, ya que se debe buscar un punto de equilibrio entre la apertura para obtener mejor resolución y el límite de temperatura en el cual operan las fibras, el cual es de alrededor $50^{\circ}C$ y límite de temperatura del telescopio.

Ya listo el telescopio, se procede a ubicar la entrada de las fibras en el plano focal del telescopio, ubicando previamente el astro en cuestión. En este paso la idea consiste en realizar un mapeo del Sol, por lo cual las fibras se ubican en dirección perpendicular a la dirección de movimiento aparente del astro.

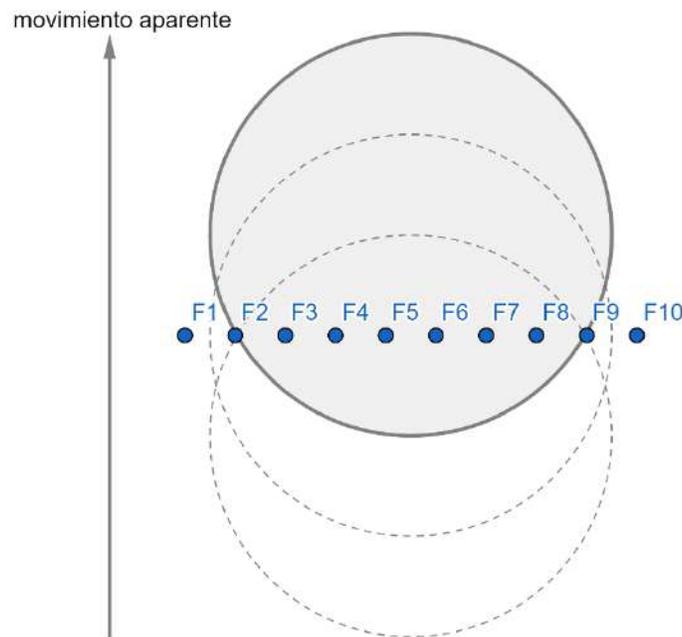


Figura 4-9.: Modo de observación Raster Scan.

En la figura 4-9 se muestra ejemplificado el movimiento aparente del Sol visto en el plano imagen del telescopio, de tal manera que si ubicamos las fibras de forma perpendicular a este vector de movimiento aparente, podremos realizar una especie de scan en diferentes zonas del Sol usando simplemente el movimiento aparente del astro en la esfera celeste. A este método de observación lo llamamos **Raster Scan** y es el que se usará para posteriormente generar un cubo de datos de imágenes.



Figura 4-10.: Montaje dispuesto para la observación Solar usando una Cámara Heliosférica para Imágenes espectrales. Foto tomada el día 3 de Junio del 2023 alrededor de la 1:30 pm.

En la figura 4-10 se muestra el montaje usado para obtener información del Sol, el cual se compone de la Cámara Heliosférica para Imágenes espectrales y el telescopio. En la figura se evidencia la

versatilidad del instrumento, ya que podemos usar cualquier telescopio y mover el instrumento a cualquier parte para realizar las observaciones. La caja del instrumento brinda una perfecta protección ante luz externa, al igual que el diseño óptico evita que se introduzca luz parásita al sistema.

Ya ubicado y armado todo el montaje de observación, se realizan las respectivas tomas de datos, las cuales consisten en ubicar el sol en la parte inferior del plano imagen del telescopio, y dejar que este suba en la dirección de movimiento aparente como se mostró en la figura 4-9, tomando así capturas del espectro cada determinado tiempo, el cual depende de límite que ofrezca el sensor y la resolución angular del telescopio, para el instrumento el límite del sensor es de tan solo 10 ms, por lo cual el tiempo entre tomas dependería mayormente de la resolución angular debida a la apertura de la máscara en el telescopio. En este caso en que se tiene una resolución angular de $R = 9,22''$ y teniendo en cuenta que el tamaño aparente del Sol en el firmamento es de aproximadamente $0,5^\circ = 1800''$, y que este va de extremo a extremo del plano imagen en aproximadamente 160 segundos, podemos calcular que el tiempo mínimo entre capturas de espectros es de aproximadamente 0.81 segundos.

Ahora bien, para realizar la prueba de generación de cubos de datos de imágenes no es necesario llegar al límite de tiempo mínimo entre capturas, por lo cual realizaremos un cubo con capturas cada 4 segundos, tomando un total de aproximadamente 42 capturas, cada una usando una exposición de 30ms y una ganancia del 25 %.

Una vez tomadas las capturas se procesan individualmente usando una rutina en Python, la cual recorta las imágenes, elimina los píxeles calientes, realiza la calibración y genera una imagen alrededor del valor de longitud de onda que deseemos.

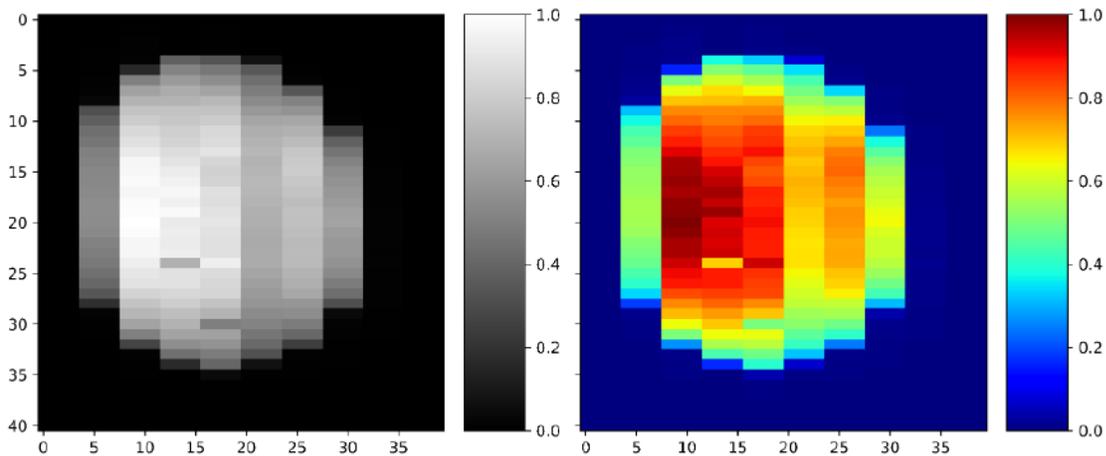


Figura 4-11.: Imagen del Sol generada en modo Raster Scan alrededor de la línea $H\gamma(\lambda = 434,047\text{nm})$.

En la figura 4-11 se observa la reconstrucción de una imagen para la línea $H\gamma$, una línea que da información de emisión en capas bajas de la atmósfera solar, como lo es la cromosfera. En la imagen el *eje x* corresponde a el número de fibras ópticas (10 en este caso) y el *eje y* corresponde

a el número de capturas realizadas (42 en este caso cada 4 segundos).

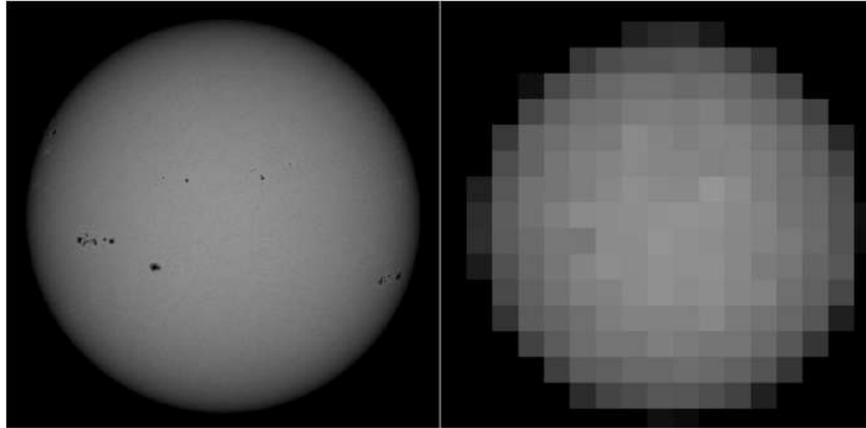


Figura 4-12.: Imagen del Sol en el filtro 6173\AA del HMI en tonos de grises, obtenida de www.solarmonitor.org

En la figura **4-12** se observa el Sol para el día 3 de junio de 2023, en el cual se ven varias manchas y destacan regiones de gran tamaño. También observamos la misma imagen en la parte derecha, pero ahora hacemos un “rebinning” de la imagen (efecto de pixelar), con lo cual podemos comparar con la imagen obtenida con el instrumento mostrada en la figura **4-11**.

Una vez obtenida la imagen final, vemos que la prueba del instrumento ha sido exitosa, ya que se obtiene una imagen congruente del sol, la cual muestra una forma circular y valores de intensidad más altos en la región central comparados con la imagen mostrada de HMI. Ahora, también vemos mínimos de intensidad que pueden estar asociados a regiones activas.

Por otro lado las capturas hechas nos sirven de cubo de datos, ya que la rutina usa estas matrices de datos para obtener imágenes espectrales de cualquier valor de longitud de onda en el intervalo previamente calibrado como se mostró en las secciones anteriores. Dicho esto se han cumplido los objetivos del trabajo, y creado un nuevo instrumento para obtener información espectral y espacial del Sol u otro astro.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño, construcción, calibración y verificación observacional de una cámara heliosférica para imágenes espectrales. El desarrollo fue todo un éxito, puesto que se logró obtener información espectral, y posteriormente generar una imagen del Sol en una longitud de onda específica haciendo uso del instrumento. Ahora, en cuanto a la resolución del instrumento, se obtuvieron valores alrededor de los 0,3 nm de resolución espectral, y 9,22" de resolución espacial, los cuales pueden mejorar con futuras modificaciones, como el uso de mejores fibras ópticas y una mejor máscara al telescopio. Con esto ratificamos el poder que tiene el instrumento en el desarrollo de adquisición de datos para investigación científica.

Una de las principales motivaciones para desarrollar este instrumento, fue el estudio del espectro visible, comprendido entre los 400 a 700 nm. Esto para observar los cambios de Luminosidad en función de la longitud de onda, para diferentes regiones en el sol. Todo esto tratando de apuntar a una región activa, logrando así obtener información de su evolución. Ahora bien, este objetivo de registrar la evolución de una mancha solar se cumple parcialmente, ya que si bien se observan regiones de menor intensidad en la imagen, falta confirmarlo.

En cuanto al análisis de intensidades vimos que el sensor aunque es pequeño permite mejor resolución de píxeles (1900*1200), con lo cual podemos identificar los cambios de intensidad por píxel que no son vistos a simple vista.

Por otra parte caben resaltar los detalles que se observaron durante la verificación observacional, como lo es la dispersión presente en el eje de las fibras ópticas y que disminuye la resolución espectral del instrumento, esto puede ser generado por el tipo de transmisión en estas guías de onda, además de su apertura de unas 50 micras, entre otros.

También se observó un buen resultado en las regiones menores a los 800 nm en el rango visible, puesto que como vimos las fibras están optimizadas entre los 800 – 1500 nm, con lo cual podemos hacer estudios a estas longitudes de onda compensando con la atenuación en la fibra. Pese a que esta región se comporta bastante bien, en este caso no fue usada debido a que casi no se encuentran líneas de emisión de los elementos usados para la calibración en esta zona. Por esta razón es indispensable usar lámparas que tengan buena densidad de líneas identificables para aprovechar esta zona. Ahora por otro lado, en la región cerca al Ultra Violeta cercano, también se observó una buena detección por parte del sensor, registrando hasta los 380 nm.

Este instrumento demostró versatilidad y eficacia a la hora de obtener información espacial y espectral, puesto que es tolerable a ciertos errores en la disposición óptica y pequeñas perturbaciones mecánicas del mismo, como se mostró en la figura 4-10, además de ser compatible con varios instrumentos como lo son telescopios de diferentes configuraciones y aperturas, los cuales pueden

ser usados para estudiar un astro específico de interés; esto le da un otro punto a favor, puesto que no solo podemos estudiar el Sol, como lo hicimos en este caso, si no que también podemos estudiar cualquier cuerpo celeste, ajustando simplemente la máscara en la apertura del telescopio consiguiendo así la luminosidad necesaria.

Hemos visto que la Cámara Heliosférica para Imágenes Espectrales funciona de manera excepcional, a pesar de contar con elementos ópticos y un chasis convencional, es por esto que vemos en este instrumento una alternativa económica y de gran potencial científico, en comparación con instrumentos como el desarrollado para DKIST, *SINFONI* o *MuSICa* los cuales son mucho más costosos por el desarrollo y construcción de elementos ópticos y mecánicos optimizados, como ejemplo recordemos los colimadores y sensores usados, los cuales son superficies cóncavas esféricas, el hecho de remplazar un lente por un espejo cóncavo como colimador nos elimina las aberraciones cromáticas causadas por las lentes y usar un sensor esférico nos elimina los efectos provocados por un foco o plano de la imagen no plano; todas estas diferencias hacen que la precisión del instrumento aumente pero con un aumento en el costo monetario de forma dramática.

5.2. Recomendaciones

Como se ha mencionado el uso de elementos ópticos de mayor calidad y geometría específica aumentan la precisión del instrumento ayudando a obtener mayor resolución espectral como espacial. A continuación se mencionaran las principales mejoras al instrumento que se pueden realizar manteniendo un presupuesto razonable.

- Una mejora inmediata es el uso de nuevas fibras, ya que las que dispone el instrumento se encuentran un poco maltratadas, introduciendo pérdidas de intensidad debidas a grietas en la fibra o suciedad.
- En cuanto al tipo de fibras vimos que el arreglo MPO es óptimo para simular una rendija, pero el número de fibras en algunos casos es insuficiente para abarcar una basta región de observación. Con lo cual, el arreglo de dos adaptadores en vertical podría ser una solución, y así aprovechar también todo el espacio vertical en el sensor.
- Las lámparas de calibración son necesarias para calibrar las imágenes, puesto que permiten obtener una relación pixel versus longitud de onda, por lo cual sería óptimo introducir una pequeña lámpara dentro del instrumento la cual quede fija, asociando así una fibra para fines de calibración. Esta lámpara puede ser de Helio, Neón y Argón, una mezcla de gases nobles, conocida como HeNeAr, la cual es usualmente usada para estos fines.
- Se pueden experimentar cambiando la cámara por un módulo de desarrollo para Raspberry Pi u otros, que integre un sensor CMOS o CCD, con lo cual se pueda manipular la cámara y la rejilla de forma integrada.
- Como se mencionó anteriormente, se necesita poder identificar de forma clara qué regiones del Sol se están observando. Para lo cual sería ideal añadir un elemento, como lo puede ser un divisor de haz en el plano imagen del telescopio, el cual nos permita comparar las imágenes espectrales obtenidas con alguna otra captura usando algún filtro.

- Por último, para que el instrumento sea un instrumento completo es necesario obtener imágenes en tiempo real o de forma regular con los espectros obtenidos del área a la cual se le está observando, para esto se planteó el uso de un divisor de haz, con el cual se obtengan dos imágenes focales en la salida del telescopio de diferentes intensidades, la de mayor intensidad irá a las entradas de la fibra y la de menor a una cámara, con lo cual se obtendría una imagen en tiempo real del área específica de observación. Esto último implica trabajar en el desarrollo de una nueva pieza, que al dividir el haz no afecte las resoluciones espacial y espectral del instrumento.

A. Anexo: El espectro solar.

Como hemos visto el principal objetivo de un IFU es obtener información del espectro electromagnético de un astro, en este caso del Sol, para comprender mejor como resulta el espectro observado es necesario comprender los mecanismos de liberación de energía dentro del núcleo del Sol y como esta interactúa con las capas exteriores del mismo, además en el caso de una observación en la superficie terrestre, se añade una interacción con la atmósfera terrestre. Por todo esto en la presente sección explicaremos los mecanismos que dan lugar al espectro solar observado.

Todo comienza con la generación de reacciones nucleares en el interior solar, dado a la alta temperatura y presión, con lo cual estas reacciones generan una presión de radiación que contra resta el efecto gravitatorio debido a la propia masa de la estrella, dando un equilibrio hidrostático a la misma; cuando la estrella tiene un núcleo en el que predomina Hidrógeno, su energía se dará mayormente a la fusión de Hidrógeno para dar lugar al Helio y algunos subproductos, a este tipo de reacción se le llama **cadena protón-protón**



abarcando una región de cerca del 25 % del radio interior y conteniendo aproximadamente la mitad de la masa total de la estrella, a esta región es la que llamamos núcleo. Este mecanismo se caracteriza por darse en temperaturas superiores al orden de 3×10^6 K.

Otro mecanismo de fusión de Hidrógeno para dar lugar al Helio es el **ciclo CNO**, siendo el Carbono, Nitrógeno y Oxígeno catalizadores de la reacción, pero que se da a temperaturas superiores a 11×10^6 K, por lo cual en estrellas de la secuencia principal como el Sol, predomina la cadena protón-protón. [Bethe, 1939, Iben, 1967, Krane, 1988]

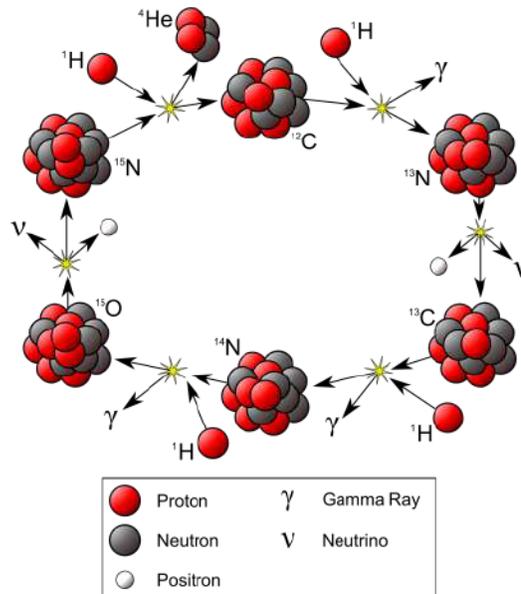


Figura A-1.: Ciclo CNO para la producción de Helio y sus subproductos, “Introductory Nuclear Physics”, Kenneth S. Krane, John Wiley Sons, New York, 1988

En la figura **A-1** se observa el funcionamiento del ciclo CNO donde se produce Helio a partir de Hidrógeno y se obtienen subproductos como rayos Gamma, neutrinos electrónicos y positrones. Todo este mar de subproductos generan la emisión de un espectro electromagnético continuo, debido a la aceleración de partículas cargadas, tanto como la emisión de rayos Gamma y neutrinos, así pues, la radiación se transportará sobre las capas radiativas y convectiva en el interior solar hasta llegar a la fotosfera, donde posteriormente interactuará con la atmósfera solar, como se ha explicado en la sección *El Sol: Nuestra estrella*, ahora bien, en las capas que se encuentren en equilibrio termodinámico habrán átomos fríos (en estado base), los cuales absorberán cuantos de energía $E = h\nu$ correspondientes a sus transiciones electrónicas permitidas, esto hará que el espectro continuo resulte con varias absorciones discretas o líneas de absorción. Fue así, cuando en 1802, el químico inglés *William Hyde Wollaston* observó por primera vez la aparición de estas zonas oscuras, pero fue en 1814 cuando el físico alemán *Joseph von Fraunhofer* redescubrió de forma independiente y estudió las franjas oscuras, clasificándolas en longitud de onda y nombrando las líneas más visibles de A a K y el restante con letras, reportando finalmente cerca de 570 líneas. Posteriormente *Kirchhoff y Bunsen* encontrarían los elementos químicos responsables de las absorciones en cada línea espectral, con esta información se determina la presencia de diversos elementos en el Sol, como el Hierro, Calcio, Magnesio, entre otros; además de líneas causadas por la presencia de moléculas de O_2 y H_2O , las cuales están presentes en la atmósfera terrestre y que se le denominarían **líneas telúricas**, las cuales se caracterizan por variar en intensidad según el ángulo de observación sobre la superficie terrestre, también por no cambiar debido al efecto Doppler causado por la rotación del Sol.

Una vez caracterizado el espectro solar, se evidenció la presencia de líneas del Hidrógeno correspondientes a la **serie de Balmer**, observada en la región visible 300-700 nm; estas líneas se dan a

partir de todas las transiciones desde el nivel de energía $n = 2$, hasta cada uno de los niveles con $n > 2$, esto para el caso de absorción de fotones. En general estas transiciones están descritas por la **fórmula de Rydberg** para el caso del átomo de Hidrógeno.

Names	Wavelength Ranges	Formulas
Lyman	Ultraviolet	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$
Balmer	Near ultraviolet and visible	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$
Paschen	Infrared	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$
Brackett	Infrared	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 5, 6, 7, \dots$
Pfund	Infrared	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 6, 7, 8, \dots$

Figura A-2.: Series espectrales para el Hidrógeno, correspondientes a la fórmula de Rydberg. Tomado de “QUANTUM PHYSICS of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and particles”, Robert Eisberg, 1985, pg 94.

En la figura **A-2** se observan las series para las transiciones desde $n = 1$ (Lyman) hasta $n = 5$ (Pfund), con sus respectivos nombres y región en el espectro electromagnético, siendo $\kappa = 1/\lambda$ y $R_H = 109677576 \pm 1,2 \text{ m}^{-1}$.

A partir de toda esto podemos obtener diversos datos del espectro solar, además de efectos de interacción con el campo magnético y polarización de la luz, debida al **efecto Zeeman** y **efecto Hanle**. [Eisberg, 1985]

Bibliografía

- [Benz, 2016] Benz, A. (2016). Flare observations. *Living Rev. Sol. Phys*, 14:3–18.
- [Bethe, 1939] Bethe, H. A. (1939). Energy production in stars. *Science*, 161:1–23.
- [Buck and A., 1995] Buck and A., J. (1995). *Fundamentals of optical fibers*. New York: John Wiley, New York.
- [Eisberg, 1985] Eisberg, R. (1985). *QUANTUM PHYSICS of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and particles*. John Wiley Sons, New York.
- [Elmore, 2014] Elmore, D. F., R. T. R. C. R. e. a. (2014). The dkist first light instruments and critical science program.
- [Hecht, 1998] Hecht, E. (1998). *OPTICS -4th edition*. Adisson Wesley, San Francisco.
- [Iben, 1967] Iben, I. (1967). Stellar evolution within and off the main sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 5:571.
- [Jackson, 1999] Jackson, D. (1999). *Classical Electrodynamics 3rd edition*. John Wiley Sons, California.
- [Karttunen, 2016] Karttunen, H. (2016). *Fundamental Astronomy 6th edition*. Springer, New York.
- [Keiser and Gerd, 2000] Keiser and Gerd (2000). *Optical fiber communications, 3th edition*. McGraw-Hill, Boston.
- [Krane, 1988] Krane, K. S. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley Sons, New York.
- [M. and E., 1999] M., B. and E., W. (1999). *Principles of optics Born -7th edition*. Cambridge University Press, New York.
- [Okamoto, 1991] Okamoto, T; Yamaguchi, I. (1991). Simultaneous acquisition of spectral image information. page 1277.
- [Rimmele, 2020] Rimmele, T.R., W. M. K. S. e. a. (2020). The daniel k. inouye solar telescope – observatory overview. page 172.
- [Shibata and Magara, 2011] Shibata, K. and Magara, T. (2011). Solar flares: Magnetohydrodynamic processes. *Living Rev. Sol. Phys*, 8:6–19.
- [Tritschler, 2007] Tritschler, Sankarasubramanian, R. e. a. (2007). Diffraction-limited spectropolarimetry at the dunn solar telescope.

- [Yeh and Chai, 1990] Yeh and Chai (1990). *Handbook of fiber optics: theory and applications*. Academic Press, San Diego.