



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA**

DISEÑO DE UN SISTEMA ÓPTICO PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA  
FORMA SOLAR EN TEMIXCO, MÉXICO.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. LUIS GALLARDO PÉREZ

TUTOR PRINCIPAL  
DR. RAFAEL CASTREJÓNGARCÍA, IER  
COMITÉ TUTORAL  
DR. OSCARALFREDO JARAMILLO SALGADO, IER  
DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES, IER  
DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR, UQROO  
DR. JOSE RUBÉN DORANTES RODRÍGUEZ, UAM AZCAPOTZALCO

MÉXICO, D. F. MAYO 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis:

Dr. Rafael Castrejón García, por su apoyo en la realización de esta tesis.

A los miembros de mi comité tutorial:

Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado  
Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes  
Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar  
Dr. Jose Rubén Dorantes Rodríguez

Por su tiempo y sus comentarios en todo momento objetivos y útiles.

Agradezco al CONACyT por otorgarme la beca que me permitió realizar mis estudios de maestría.

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por la beca obtenida para la realización de mi tesis de maestría dentro del proyecto de investigación con clase IN113310 “Comparación exergo económica entre un concentrador solar de canal parabólico y un sistema de concentración solar tipo Fresnel”

A los miembros de la Coordinación de Concentración Solar, Claudio Alejandro Estrada Gasca, Carlos A. Pérez Rábago, José de Jesús Quiñones Aguilar y Heidi Isabel Villafán Vidales.

A mi madre y a mi padre por su infinito cariño y apoyo incondicional que he recibido.

A toda mi familia por sus buenos deseos y cariño, en especial a mi tía Esther.

A mis compañeros de posgrado por su tiempo, comentarios y apoyo, en especial a Eduardo Venegas, Moisés Montiel, Ricardo Arturo Pérez, Ulises Dehesa, Amilcar Fuentes, Rodrigo Cuevas, Mario Barrera, Mauricio Solís.

A todos mis amigos en el Centro de Investigación en Energía con quienes compartí esta etapa de mi vida.

A Mariela, quién me recibió y me apoyó en esta etapa de mi vida.

# ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	1
1.1	Algunas tecnologías para aprovechamiento de la energía solar	2
1.1.1	Plato Parabólico	3
1.1.2	Campo de heliostatos	4
1.2	Radiación Solar	4
1.3	Efectos Atmosféricos	6
1.3.1	Teoría de Rayleigh	8
1.3.2	Teoría de Mie	8
1.3.3	Turbidez de Angström	9
1.3.4	Absorción de la radiación	10
1.3.5	Estimación del promedio de la radiación solar terrestre	11
1.4	Forma Solar y Razón Circunsolar (Circumsolar Ratio (CSR))	13
1.5	Métodos de medición de forma solar	15
1.5.1	Medición de la forma solar por el Lawrence Berkeley Laboratory (LBL)	15
1.5.2	Medición de la forma solar por el German Aerospace Center (DLR)	17
1.6	Objetivos	18
2.	Metodología Experimental	20
2.1	Cámara CCD y su interfaz	22
2.2	Arreglo con cámara CCD	23
2.3	Sistema de filtros	25
2.4	Adaptación de un telescopio	25
2.5	Componentes fabricadas (piezas diseñadas)	27
3.	Resultados Experimentales	29
3.1	Cámara digital con su propio lente (sin telescopio)	30
3.2	Cámara digital con telescopio	35
3.3	Comparación de resultados con el modelo propuesto por Buie (2003)	38
4.	Diseño del Sistema Óptico	44
4.1	Parámetros del diseño óptico	44
4.2	Sistema de filtrado óptico	45
4.3	Descripción del sistema mecánico	46
5.	Conclusiones y Recomendaciones	50
5.1	Trabajo a futuro	52

Referencias Bibliográficas	53
----------------------------	----

## Apéndices

A1.	Planos de las piezas diseñadas para los experimentos	55
A2.	Planos del sistema óptico diseñado	59
B1.	Especificaciones de la cámara	64
B2.	Especificaciones de los filtros y polarizadores	65

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1.	Concentrador parabólico, reflectores de tipoFresnel, heliostatos con receptor central (tomado de Duffie, 1991).	3
Fig. 1.2.	Plato parabólico.	3
Fig. 1.3.	Arreglo de heliostatos en torre central.	4
Fig. 1.4.	Relaciones geométricas Sol-Tierra (modificado de Duffie, 1991).	5
Fig. 1.5.	Comportamiento de los rayos solares a su paso por la atmósfera terrestre (tomado de Soto Enrich, 2002).	5
Fig. 1.6.	Comportamiento de la teoría de Rayleigh (modificado de Iqbal, 1983).	8
Fig. 1.7.	Comportamiento de la teoría de Mie (modificado de Iqbal, 1983).	9
Fig. 1.8.	Atenuación por los gases en la atmósfera (modificado deSoto Enrich, 2002).	11
Fig. 1.9.	Disco solar y región circunsolar, tomados por el LBL y el DLR (modificado de Neuman, 2002).	14
Fig. 1.10.	Perfiles de CSR obtenidos por el LBL (tomado de Neuman, 2002).	16
Fig. 1.11	Diagrama del equipo para medición de forma solar usado por el DLR (tomado de Neumann, 1999).	17
Fig. 1.12.	Perfiles de CSR obtenidos por el DLR (tomado de Neuman, 2002).	18
Fig. 2.1	Cámara acoplada al sistema simple de seguimiento del pirheliómetro.	21
Fig. 2.2	Cámara montada en el pirheliómetro y la estación meteorológica.	22
Fig. 2.3	Placa para montar la cámara al sistema de seguimiento solar.	23
Fig. 2.4	Pieza para sostener la cámara sujeta del pirheliómetro.	24
Fig. 2.5	Imagen del Sol tomada con la cámara CCD, sin telescopio.	24
Fig. 2.6	Imagen del Sol tomada con el telescopio acoplado al sensor (Los puntos negros son imperfecciones de la lente).	26
Fig. 2.7	Posición de las piezas diseñadas para acoplarse al telescopio.	26
Fig. 2.8	Sensor CCD acoplado al telescopio y montado en el robot.	27
Fig. 2.9	Pieza para sostener a la cámara y al telescopio.	27
Fig. 2.10	Pieza para acoplar al sensor.	28
Fig. 2.11	Pieza para acoplar los filtros.	28

Fig. 3.1	Fotos del Sol tomadas con el lente de la cámara Pike.	31
Fig. 3.2	Fotos del Sol tomadas con el lente de la cámara Pike.	31
Fig. 3.3	Matriz de datos importados por Matlab.	32
Fig. 3.4	Gráfica en dos dimensiones de la forma solar (Eje X y Eje Y).	32
Fig. 3.5	Gráfica en dos dimensiones de la forma solar y zoom en disco solar (Eje X y Eje Y).	33
Fig. 3.6	Gráfica en dos dimensiones de una línea de datos de la matriz (Eje X y Eje Z).	33
Fig. 3.7	Gráfica de perfiles solares sobrepuestos.	34
Fig. 3.8	Imagen del Sol ampliada con el telescopio.	36
Fig. 3.9	Imagen de la mitad del disco solar ampliada con el telescopio.	36
Fig. 3.10	Matriz de datos de imagen tomada con el telescopio.	37
Fig. 3.11	Gráfica en dos dimensiones de la imagen tomada con el telescopio (Eje X y Eje Y).	37
Fig. 3.12	Gráfica en dos dimensiones del disco solar, por la mitad, captado por el telescopio (Eje X y Eje Y).	38
Fig. 3.13	Perfil solar tomado con la cámara.	40
Fig. 3.14	Perfil solar tomado con la cámara.	41
Fig. 3.15	Perfil solar tomado con el telescopio.	42
Fig. 3.16	Perfil solar tomado con el telescopio.	42
Fig. 4.1.	Tubo óptico del telescopio.	47
Fig. 4.2.	Soporte para lentes y filtros.	47
Fig. 4.3.	Soporte del sensor.	48
Fig. 4.4.	Arreglo final del sistema óptico diseñado.	49

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.	Ondas electromagnéticas de la radiación solar (modificado de Soto Enrich, 2002).	6
Tabla 1.2.	Componentes del aire limpio atmosférico (tomado de Iqbal, 1983).	7
Tabla 1.3	Perfiles tomados por el LBL en las diferentes locaciones (tomada de Buie, 2003).	16
Tabla 3.1.	Filtros usados en los experimentos con la cámara.	31
Tabla 3.2.	Relaciones mrad/pixel obtenidas con la cámara.	34
Tabla 3.3.	Filtros usados en los experimentos con el telescopio.	35
Tabla 3.4.	Relaciones mrad/pixel obtenidas con el telescopio.	38
Tabla 4.1.	Datos de la lente encontrada en catálogo.	45
Tabla 4.2.	Filtros de mayor densidad óptica.	46

# 1. INTRODUCCIÓN

La radiación electromagnética emitida por el Sol viaja a través del espacio hasta llegar a la Tierra (Duffie, 1991); al pasar por la atmósfera terrestre es desviada, esparcida y absorbida debido a la interacción que sufren los rayos solares con las partículas de la atmósfera (Buie, 2003), vapor de agua, polvo, aerosoles, átomos y moléculas de gases. Una cantidad significativa de esta radiación llega a la superficie terrestre de todas direcciones (Buie, 2003); direcciones tanto diferentes como iguales a la del Sol. La dispersión generada por estas partículas tiene un efecto visible desde el suelo, la cual se ve como una aureola alrededor del Sol (Neumann, 1999), cuyos distintos tamaños dependen de las cantidades de partículas que haya en la atmósfera (Buie, 2003); lo que conlleva finalmente a una distribución de la brillantez solar, que contiene tanto al disco solar como a una región fuera del disco llamada región circunsolar (aureola solar), y juntas forman la distribución de brillantez solar o forma solar *sunshape* (Neumann, 2002; Buie, 2003).

Los radios de las partículas causantes del efecto de la región circunsolar, tienen dimensiones del orden de  $0.1 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$  (Buie, 2003), y son comparables con las longitudes de onda del espectro solar, lo que provoca una dispersión de rayos solares. Esta dispersión es dirigida hacia delante y en diferentes direcciones lo cual origina la aureola solar. Dentro de las partículas que habitan la atmósfera están gases, aerosoles, así como cristales de hielo o gotas de agua en las nubes; también puede encontrarse polvo o partículas de sal marina, humo, contaminantes fotoquímicos, gotas de ácidos sulfúricos y contaminantes de las grandes industrias (Iqbal, 1983; Buie, 2003). El tamaño de la región circunsolar también se ve afectado por la ubicación geográfica, el clima del lugar, el periodo del año, la hora del día y el ángulo desde el cual se observe al Sol.

El conocimiento de la cantidad de energía que está contenida dentro de la región circunsolar es muy importante y de gran ayuda para el diseño, estudio y desempeño de los sistemas de concentración solar (Neumann, 1999), ya que algunos emplean la imagen del Sol para ser reflejada y concentrada (Neumann, 2002; Buie, 2003). El rendimiento de los concentradores puede verse afectado si no se tiene la estimación adecuada de la cantidad de energía incidente para que trabaje el concentrador (Neumann, 2002; Buie, 2003). Así mismo, si se conoce el ángulo de aceptación de los sistemas ópticos de concentración puede ocurrir una sobreestimación de la cantidad de potencia que nos otorga el sistema (Buie, 2003), esto, si sólo se toma en cuenta la energía incidente contenida en el disco solar medida a través de un pirheliómetro, además de que los instrumentos para la medición de radiación directa varían en cuanto a su ángulo de aceptación en comparación con los sistemas de concentración solar (Duffie, 1991).

### **1.1 Algunas tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar**

La energía solar es una fuente de energía renovable que está disponible en toda la superficie terrestre. Sin embargo, a partir del lugar donde uno se encuentre para su aprovechamiento, la intensidad no es la misma. Además de que varía en las diferentes épocas del año, sólo puede estar disponible durante el día (Pérez Rábago, 2003 y 2007).

Actualmente se puede aprovechar la energía solar a través de varios procesos (Winter, 1991), los cuales se clasifican en tres ramas:

- 1) Sistemas fotovoltaicos, los cuales constan de dispositivos semiconductores llamados celdas solares que realizan una transformación directa de energía solar a energía eléctrica.
- 2) Sistemas fotoquímicos, que aprovechan el espectro solar para inducir una reacción química y crear combustibles solares o generar corriente eléctrica.
- 3) Sistemas fototérmicos, los cuales captan y concentran la energía solar con el propósito de aumentar la temperatura en procesos térmicos, a través de arreglos ópticos, para posteriormente producir energía mecánica o eléctrica.

Para incrementar las temperaturas en los sistemas de radiación altamente concentrada, es necesario que el área que va a recibir los rayos solares sea un área muy pequeña para así reducir las pérdidas de calor por convección (Duffie, 1991). Esto se logra con un arreglo óptico, compuesto por un colector de rayos solares el cual desviará estos rayos a un solo objetivo llamado receptor que tiene un área mucho menor al área del colector. Además, este arreglo, tendrá menores pérdidas de calor comparado con uno que presente una mayor área de captación, de esta manera se logran altas temperaturas a través de el aumento en la densidad de flujo radiativo del colector al receptor, así mismo el sistema puede obtener o no una imagen del Sol en el receptor(Duffie, 1991).



En la Figura 1.1 se muestran los sistemas de alta concentración solar, estos pueden estar dentro de la clasificación de concentradores de imagen o de no imagen y, de foco puntual o lineal, sus diseños están basados en la parábola, la parábola de revolución y en los lentes de tipo Fresnel (Duffie, 1991).



Fig. 1.1. Concentrador parabólico, reflectores de tipo Fresnel, helióstatos con receptor central (tomado de Duffie, 1991).

### 1.1.1 Plato Parabólico

La característica principal de un plato parabólico es que todos los rayos de luz incidentes que sean perpendiculares a la directriz de la parábola, serán reflejados al foco de la parábola donde se encuentra el receptor (ver Figura 1.2). En estudios anteriores reportados en la literatura, principalmente se toma en cuenta sólo la distribución de energía en el plano focal y se dejan de lado las características direccionales, aunque es conveniente utilizar varios métodos de trazado de rayos para la simulación y un buen diseño del receptor (Rabl, 1985; Buie, 2003). Algunas de las aplicaciones para este sistema son la Química Solar, como por ejemplo la producción de hidrógeno a través de la gasificación de una biomasa. Otra aplicación es la generación de vapor, calentando agua, gracias al incremento de la temperatura que se logra con este sistema.

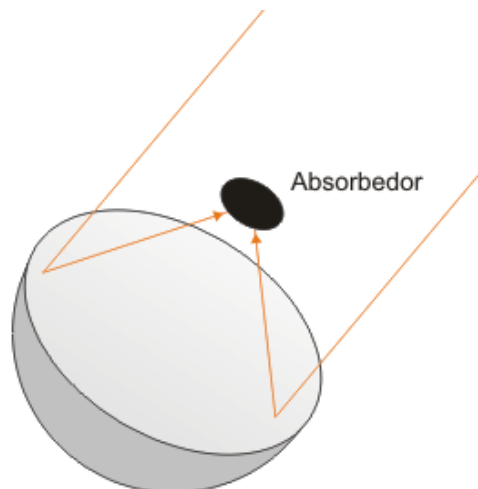


Fig. 1.2. Plato parabólico.

### 1.1.2 Campo de heliostatos

El sistema de Torre Central está basado en los reflectores tipo Fresnel (Rabl, 1985); como si se tuviera un plato parabólico, se fragmentara en pedazos iguales y se colocaran todos en un mismo plano. El receptor de la torre estará colocado en el foco de los espejos (Duffie, 1991), que en ocasiones cuentan con una mayor reflectividad comparada con espejos planos de uso comercial. Al conjunto de estos espejos se le llama campo de heliostatos, que además tienen un movimiento que permite redireccionar los rayos solares al receptor (ver Figura 1.3). De igual forma que el plato parabólico aumenta el flujo de energía. Una de las aplicaciones más importantes de la torre central es la conversión de energía solar en energía eléctrica.

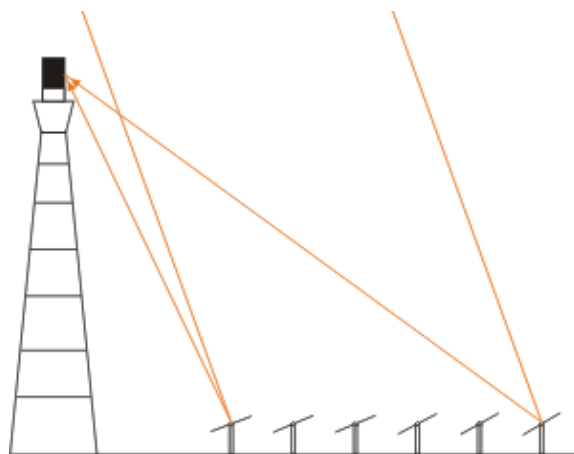


Fig. 1.3. Arreglo de heliostatos en torre central.

## 1.2 Radiación Solar

El Sol es una fuente de energía inagotable, y es una energía con mucho potencial ya que puede ser usada en diferentes formas como aprovechamiento directo de la radiación en forma de calor, o bien, se puede captar la radiación con ayuda de dispositivos ópticos, o transformar la radiación solar en energía eléctrica con dispositivos fotovoltaicos (Rabl, 1985).

El Sol es una esfera de materia gaseosa caliente con un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  m y se encuentra a una distancia promedio de  $1.5 \times 10^{11}$  m de la Tierra (Duffie, 1991), en la Figura 1.4 se muestran estas relaciones geométricas. La temperatura del Sol, como si se tratara de un cuerpo negro, se ha calculado alrededor de 5777 K (Duffie, 1991).

También se ha calculado un flujo constante de energía que llega fuera de la atmósfera terrestre por unidad de tiempo y por unidad de área, la constante solar  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  (Duffie, 1991).

La radiación solar que recibe la superficie terrestre presenta variaciones debido a factores climáticos, localización geográfica, altitud, además de los niveles de insolación que varían en función de las fluctuaciones diarias y estacionales de humedad y calor atmosférico de cada zona en particular (Rabl, 1985).

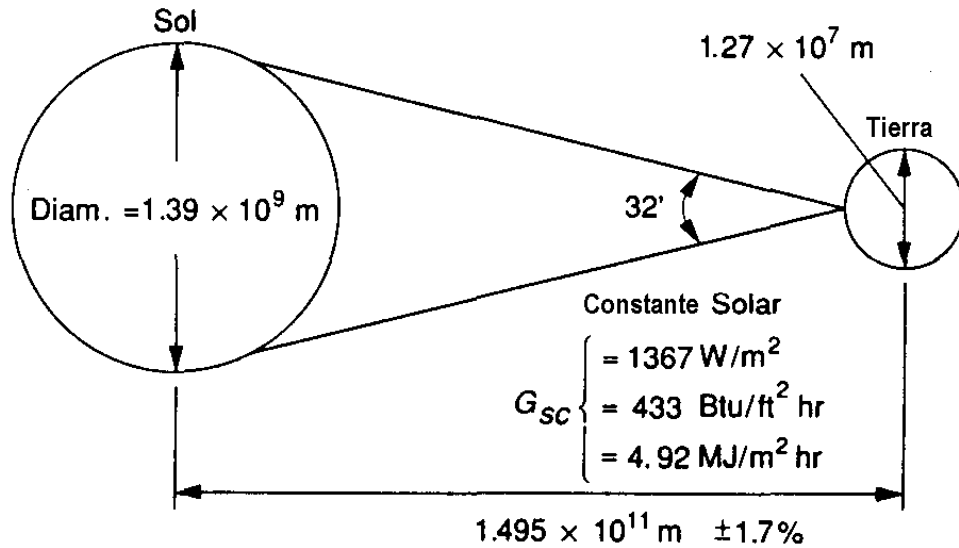


Fig. 1.4. Relaciones geométricas Sol-Tierra (modificado de Duffie, 1991).

La cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre está en función del flujo radiativo solar extraterrestre, puede estimarse si se toma en cuenta que sufre una atenuación producida principalmente por los gases y aerosoles constituyentes de la atmósfera terrestre, que dan lugar a fenómenos de reflexión, esparcimiento y absorción (Soto Enrich, 2002). En la Figura 1.5 se ilustra el comportamiento de los rayos solares al entrar a la atmósfera terrestre.

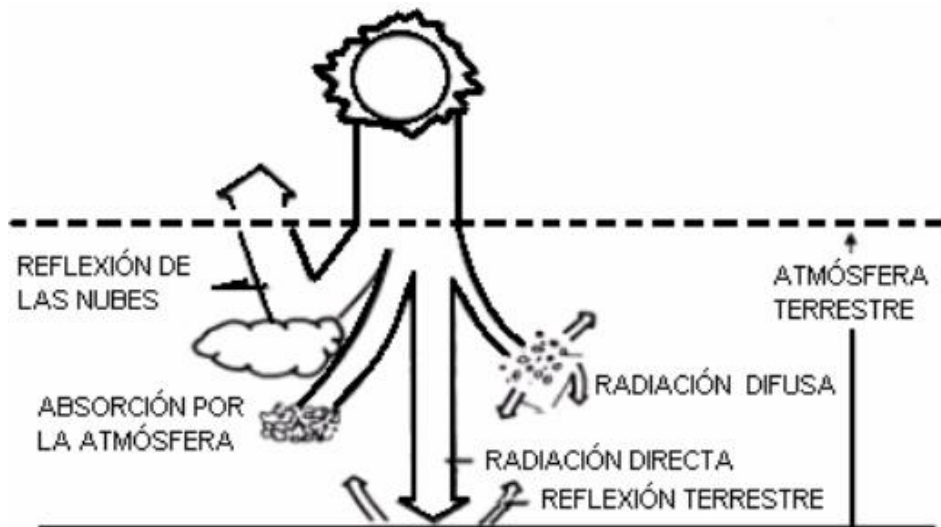


Fig.1.5. Comportamiento de los rayos solares a su paso por la atmósfera terrestre (tomado de Soto Enrich, 2002).

La energía del Sol entra a la atmósfera de la Tierra en forma de ondas electromagnéticas, la parte del espectro que golpea la superficie terrestre, que incluye una parte de la región ultravioleta (UV), todo el rango visible (VIS) y el infrarrojo (IR), se encuentra en un rango aprovechable de longitudes de onda con efectos térmicos; parte de ésta es absorbida, reflejada y esparcida. Se ha verificado que del 99% de ésta radiación se encuentra dentro del rango de longitud de onda de  $0.25 \mu\text{m} - 4 \mu\text{m}$  (Soto Enrich, 2002). En la Tabla 1.1 se muestra que de esta radiación un 7% de la energía pertenece a la región ultravioleta (onda corta), un 47.3% a la región visible y el 45.7% restante a la región infrarroja (onda larga).

Tabla 1.1. Ondas electromagnéticas de la radiación solar (modificado de Soto Enrich, 2002).

Nombre	Rango [ $\mu\text{m}$ ]	Características	% del espectro
Ultravioleta (UV)	$0 < \lambda < 0.38$	Invisible al ojo humano	7.0
Visible (VIS)	$0.38 < \lambda < 0.78$	Visible por el ojo humano	47.3
Infrarrojo (IR)	$\lambda > 0.78$	Ondas de calor	45.7

El tipo de energía que se aprovecha del Sol se divide en tres partes (Duffie, 1991):

**Radiación Directa:** Es la radiación que se recibe del Sol sin que ésta haya sufrido algún tipo de dispersión a su paso por la atmósfera.

**Radiación Difusa:** Es la radiación solar recibida después de que sufrió cambios por dispersión en la atmósfera.

**Radiación Global:** La suma de la radiación solar directa y difusa que recibe una superficie.

### 1.3 Efectos Atmosféricos

La radiación solar que pasa por la atmósfera terrestre se ve afectada por moléculas de gases que la componen, vapor de agua, partículas de polvo y aerosoles que no están distribuidos de manera homogénea, y provocan diferentes tipos de dispersión y absorción en todas las longitudes de onda, lo que conlleva visiblemente a una ampliación de  $0.5$  grados del disco solar, que da lugar a una aureola del Sol (Neumann, 2002).

La atmósfera está constituida principalmente por moléculas de Nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y Oxígeno ( $\text{O}_2$ ). Las partículas que contiene el aire limpio y seco pueden variar con respecto a su volumen (ver Tabla 1.2). Por otro lado en la atmósfera se encuentran vapores de agua, aerosoles, polvo y cristales de hielo que varían respecto al tiempo y al espacio (Iqbal, 1983). Para la determinación de la cantidad

de partículas que dan como resultado la atenuación de la radiación solar, la atmósfera es dividida en tres grupos: componentes de aire, vapor de agua y aerosoles.

Tabla 1.2. Componentes del aire limpio atmosférico (tomado de Iqbal, 1983).

Composición estándar del aire atmosférico limpio	
Gas constituyente	Contenido (% por volumen)
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.084
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20.948
Argón (Ar)	0.934
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0.333
Neon (Ne)	18.18 x 10 <sup>-4</sup>
Helio (He)	5.24 x 10 <sup>-4</sup>
Kriptón (Kr)	1.14 x 10 <sup>-4</sup>
Xenón	0.089 x 10 <sup>-4</sup>
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0.5 x 10 <sup>-4</sup>
Metano (CH <sub>4</sub> )	1.5 x 10 <sup>-4</sup>
Oxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	0.27 x 10 <sup>-4</sup>
Ozono (O <sub>3</sub> )	0 - 12 x 10 <sup>-4</sup>
Dióxido de sulfuro (SO <sub>2</sub> )	0.001 x 10 <sup>-4</sup>
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.001 x 10 <sup>-4</sup>
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	0.004 x 10 <sup>-4</sup>
Monóxido de carbono (CO)	0.19 x 10 <sup>-4</sup>
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	0 - 0.04 x 10 <sup>-4</sup>
Óxido Nítrico (NO)	0.0005 x 10 <sup>-4</sup>
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	0.00005 x 10 <sup>-4</sup>
Vapor de ácido nítrico	Rastros

Todas las partículas que se encuentran en la atmósfera atenúan la energía solar por medio de dispersión que ocurre en todas las longitudes de onda, aunque, el proceso de absorción sólo toma lugar en ciertas longitudes de onda (Iqbal, 1983; Duffie, 1991).

La dispersión provocada por partículas más pequeñas que la longitud de onda incidente, fue explicada por Lord Rayleigh en el siglo XIX, y es una solución de las ecuaciones de Maxwell de ondas electromagnéticas en coordenadas polares, conocida como teoría de Rayleigh (Iqbal, 1983; Duffie, 1991). Cuando se trata de partículas del orden de la longitud de onda incidente, la solución de las ecuaciones de Maxwell fue dada por Gustav Mie a principios del siglo XX, y la solución es

conocida como teoría de Mie. La teoría de Rayleigh es un caso especial de las soluciones de Mie (Iqbal, 1983; Duffie, 1991).

### 1.3.1 Teoría de Rayleigh

Cuando se trata de partículas esféricas y la longitud de onda incidente es mucho mayor al tamaño de la partícula el tipo de dispersión generado se llama dispersión de Rayleigh, que es una solución particular a las ecuaciones de Maxwell de ondas electromagnéticas (Iqbal, 1983), cuya característica es que la partícula tiene forma esférica y su diámetro es menor a  $0.2 \lambda$ . Se puede decir que cuando  $\pi D/\lambda < 0.6/n$  el tipo de dispersión es regido por la teoría de Rayleigh (ver Figura 1.6), donde  $D$  es el diámetro de la partícula,  $\lambda$  es la longitud de onda en  $\mu\text{m}$  y  $n$  el índice de refracción (Iqbal, 1983).

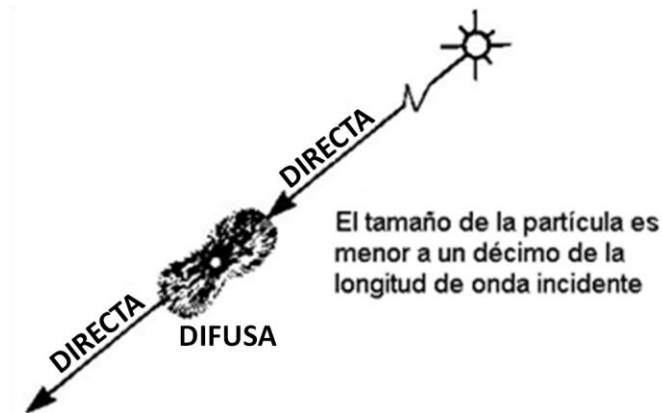


Fig. 1.6. Comportamiento de la teoría de Rayleigh (modificado de Iqbal, 1983).

Los coeficientes de dispersión y de transmitancia para la teoría de Rayleigh (Iqbal, 1983) están dados de la siguiente manera:

$$k_{r\lambda} = 0.008735\lambda^{-4.08} \quad \text{dispersión} \quad (1.1)$$

$$\tau_{r\lambda} = \exp(0.008735\lambda^{-4.08}m_a) \quad \text{transmitancia} \quad (1.2)$$

donde:  $m_a$  – cantidad relativa de masa óptica de aire

### 1.3.2 Teoría de Mie

Otro tipo de dispersión que ocurre en la atmósfera es la dispersión de Mie. Según la dispersión de Mie, se produce más dispersión hacia delante que en ninguna otra dirección (Iqbal, 1983). Conforme aumenta el tamaño de la partícula, la dispersión hacia delante también aumenta, la forma que toma este comportamiento se ilustra en la Figura 1.7.

Las partículas que más provocan esta dispersión son las de vapor de agua y de polvo, estas producen reflexión difusa cuando  $\pi D/\lambda > 5$  que es como un cierto caso de la dispersión de Mie (Iqbal, 1983). La teoría de Mie se cumple cuando las partículas son mayores a  $10 \text{ \AA}$ , o cuando  $0.6/n < \pi D/\lambda < 5$ , esto sucede mayormente con los aerosoles. La dispersión por polvo seco o mojado se vuelve muy difícil de analizar matemáticamente y de igual manera se vuelve difícil analizar el vapor de agua. Por lo tanto se dan diferentes coeficientes de dispersión y transmitancia para vapor de agua y polvo (Iqbal, 1983).

$$k_{ws\lambda} = 0.008635\lambda^{-2} \text{ dispersión vapor de agua} \quad (1.3)$$

$$k_{d\lambda} = 0.08128\lambda^{-0.75} \text{ dispersión polvo} \quad (1.4)$$

$$\tau_{ws\lambda} = \exp [-0.008635\lambda^{-2}wm_r] \text{ transmitancia vapor de agua} \quad (1.5)$$

$$\tau_{d\lambda} = \exp [-0.08128\lambda^{-0.75} \left(\frac{d}{800}\right)m_a] \text{ transmitancia polvo} \quad (1.6)$$

donde:  $w$  – espesor de agua precipitada  
 $m_r$  – cantidad relativa de masa de aire en condiciones estándar

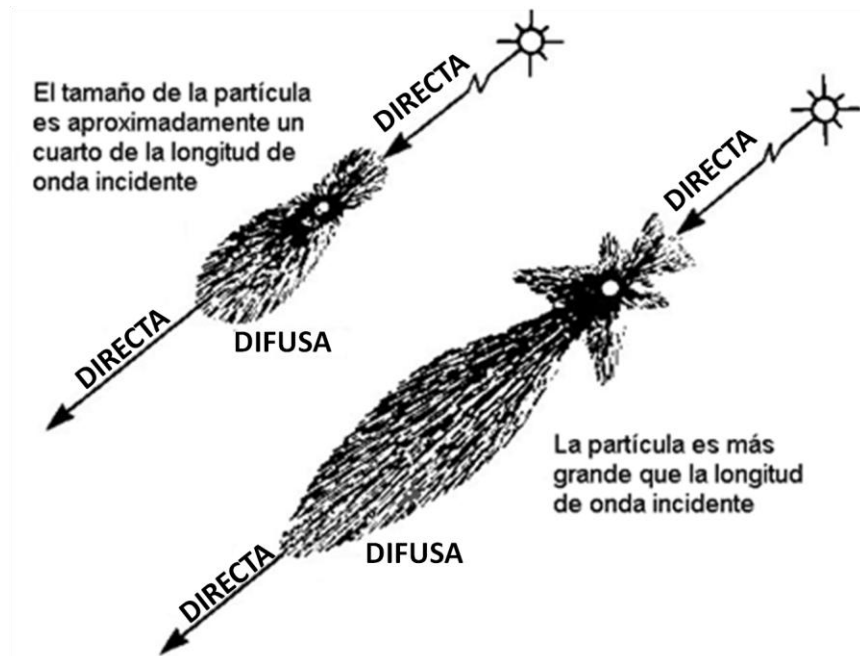


Fig. 1.7. Comportamiento de la teoría de Mie (modificado de Iqbal, 1983).

### 1.3.3 Turbidez descrita por Angström

Los aerosoles también provocan un tipo de dispersión llamada Turbidez descrita por Angström, esto debido a que los aerosoles contienen partículas de diferentes

tamaños (Iqbal, 1983; Duffie, 1991). Su coeficiente de dispersión se expresa de la siguiente manera:

$$k_{a\lambda} = \beta\lambda^{-\alpha} \quad \text{dispersión aerosoles} \quad (1.7)$$

donde:  $\beta$  – turbidez de Angström  
 $\alpha$  – exponente de la longitud de onda,  $\alpha=1.3\pm 0.5$

y su coeficiente de transmitancia:

$$\tau_{a\lambda} = \exp(-\beta\lambda^{-\alpha}m_a) \quad \text{transmitancia aerosoles} \quad (1.8)$$

El proceso de esparcimiento de la radiación directa antes y después de golpear a la superficie terrestre es un proceso continuo en toda la atmósfera (Iqbal, 1983).

### 1.3.4 Absorción de la radiación

Por otro lado, en el proceso de absorción de la radiación solar, que como se mencionó anteriormente es un proceso selectivo y sólo ocurre a longitudes de onda discretas, se encontró que las partículas del aire seco que más absorben son: CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>; y en menor proporción absorben los óxidos de nitrógeno: NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, los hidrocarburos: C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> y C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, y el gas sulfuroso: H<sub>2</sub>S (sulfuro de hidrogeno) (Iqbal, 1983; Duffie, 1991). Y cuando la absorción ocurre en longitudes de onda muy cercanas unas de otras se llama banda de absorción. Cabe mencionar que el ozono absorbe en el UV, la VIS y el IR (Duffie, 1991; Iqbal, 1983).

Los principales absorbedores en la región ultravioleta y el espectro visible son (Iqbal, 1983):

- Oxígeno (O<sub>2</sub>) y (O)
- Nitrogeno (N<sub>2</sub>) y (N)
- Ozono (O<sub>3</sub>)

Debido a la existencia de estas partículas en la atmósfera, principalmente por arriba de los 90 km, la radiación en longitudes de onda menores a 0.085  $\mu\text{m}$  no logra traspasar la termósfera, y, radiación en longitudes de onda igual o menor a 0.2  $\mu\text{m}$  no alcanza la superficie terrestre (Iqbal, 1983).

Los principales absorbedores en el espectro infrarrojo son:

- H<sub>2</sub>O (Agua)
- CO<sub>2</sub> (Dioxido de carbono)
- O<sub>3</sub> (Ozono)
- N<sub>2</sub>O (Óxido nitroso)



- CO (Monóxido de carbono)
- O<sub>2</sub> (Oxígeno)
- CH<sub>4</sub> (Metano)
- N<sub>2</sub> (Nitrógeno)

De la radiación térmica que aproximadamente va desde 0.1 hasta 100 μm del espectro electromagnético, la radiación solar que se ocupa para aplicaciones terrestres sólo toma en cuenta longitudes de onda entre 0.29 a 2.5 μm (Duffie, 1991) (ver Figura 1.8).

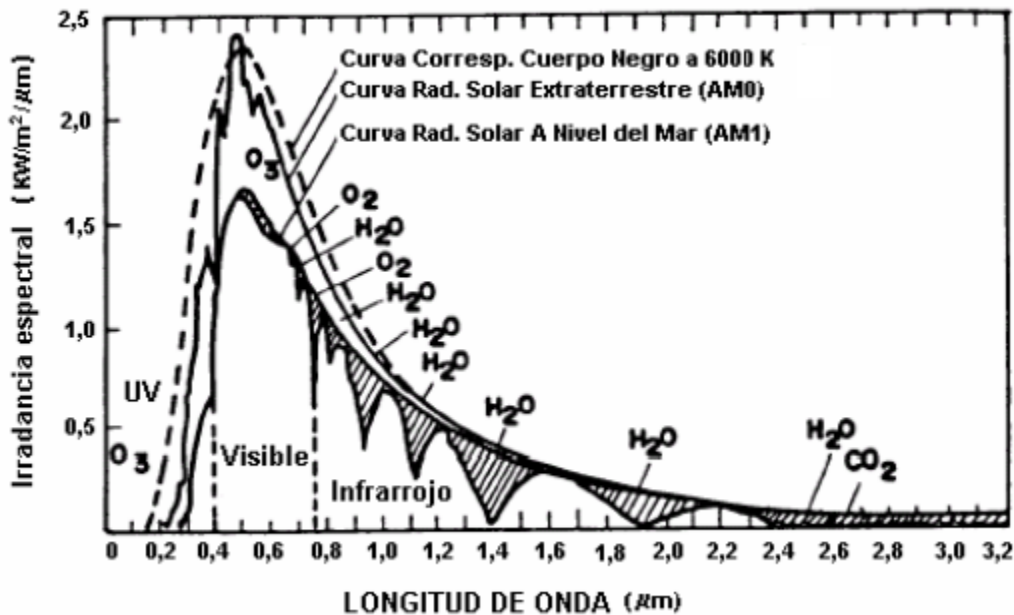


Fig. 1.8. Atenuación por los gases en la atmósfera (tomado de Soto Enrich, 2002).

### 1.3.5 Estimación del promedio de la radiación solar terrestre

La atenuación de la radiación solar extraterrestre, debido a los efectos de absorción y esparcimiento ocurridos en la atmósfera terrestre, también tiene una variación dependiente de si se tiene un cielo limpio sin nubes o un cielo con nubes (Duffie, 1991).

En primera instancia se estima la radiación solar que recibe una superficie horizontal mensualmente. El método utilizado es el de Angström, el cual es un simple modelo lineal relacionado al promedio de radiación solar en una superficie horizontal y el posible porcentaje de horas de Sol en un día despejado (Angström, 1924).

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{N} \quad (1.9)$$

donde:

$\bar{H}$ - promedio mensual de radiación media diaria  $\left[\frac{J}{m^2}\right]$ .

$\bar{H}_0$ - promedio de radiación extraterrestre en el tiempo y lugar requeridos  $\left[\frac{J}{m^2}\right]$ .

a, b- constantes empíricas [-].

$\bar{n}$ - promedio mensual diario de horas de Sol.

$\bar{N}$ - promedio mensual del máximo posible de horas de Sol.

$$H_0 = \left(\frac{(24)(3600)G_{sc}}{\pi}\right) \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta\right) \quad (1.10)$$

donde:

$G_{sc}$ - constante solar  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$n$ - día del año;  $1 \leq n \leq 365$

$\varphi$ - latitud;  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$

$\delta$ - declinación;  $\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365}\right)$

$\omega_s$ - ángulo horario de la puesta del Sol;  $\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta$

De igual forma se puede calcular la estimación de la cantidad de radiación que recibe una superficie horizontal por cada hora (Duffie, 1991).

$$I_0 = \left(\frac{(12)(3600)G_{sc}}{\pi}\right) \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \left[\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta\right] \quad (1.11)$$

donde:

$I_0$ - promedio por hora de radiación  $\left[\frac{J}{m^2}\right]$

Los valores de a y b son constantes calculadas a partir de las condiciones climáticas en distintos lugares (Duffie, 1991).

Los periodos en los que se tienen cielos nublados o despejados cambian con mucha frecuencia, y para esto se estima la radiación solar en varios periodos de tiempo, y también se pueden estimar, gracias a un índice de claridad  $K_T$ , el cual indica que tan despejado o nublado estuvo el periodo de tiempo requerido, con la relación de la radiación particular de un periodo de tiempo con la radiación extraterrestre en ese periodo de tiempo (Duffie, 1991).

El índice de claridad para un día en particular, que relaciona la radiación obtenida en ese día con la radiación solar extraterrestre, se calcula de la siguiente manera:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (1.12)$$

De igual forma se puede calcular un índice de claridad para una hora determinada:

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (1.13)$$

Los valores de  $H_0$  y  $I_0$  son calculados y los valores de  $H$  y  $I$  son obtenidos por medio de lecturas hechas con un pirheliómetro (Duffie, 1991).

#### 1.4 Forma Solar y Razón Circunsolar (Circumsolar Ratio (CSR))

La determinación de la distribución de brillantez solar *sunshape* es particularmente importante para los sistemas de concentración solar, ya que generalmente se utiliza la imagen del Sol reproducida en un plano focal (Neumann, 1999; Buie, 2003), la cual incluye además las características de la región circunsolar. Si únicamente se toma en cuenta la radiación directa medida con un pirheliómetro, se puede incurrir en el error de sobrestimar significativamente el comportamiento del sistema (Buie, 2003).

Si se pretende simular, analizar y optimizar el comportamiento de los sistemas de radiación altamente concentrada y sus parámetros, como el factor de intercepción o la razón de concentración, es necesario el conocimiento tanto de la radiación solar directa como de las condiciones de la forma solar *sunshape* (Buie, 2003).

El disco solar, en el espacio exterior, tiene lo que se llama extremidad oscurecida *limbdarkening* (Neumann, 2002) causada por el perfil de distribución radiativo, en esta zona se presenta la transición del disco a la región circunsolar. Para efectos de cálculos de la razón circunsolar, el radio que captamos del disco solar se ha determinado y promediado en 4.65 mrad (Neumann, 2002), pero éste varía a partir de la distancia a la que estemos del Sol. El límite para el desplazamiento angular del disco solar fue determinado por Puliaev en el Observatorio Nacional de Brasil (Buie, 2003). Si se pudiera observar al Sol fuera de la atmósfera no sería posible ver una aureola a su alrededor. Por otro lado la región circunsolar está establecida en 43.6 mrad, desde el centro del Sol hasta el final de la aureola (Buie, 2003).

En la Figura 1.9 se puede observar el comportamiento del disco solar sin región circunsolar, también se muestra la conducta de la región circunsolar debido a la dispersión que ocurre en la atmósfera (Neumann, 2002).

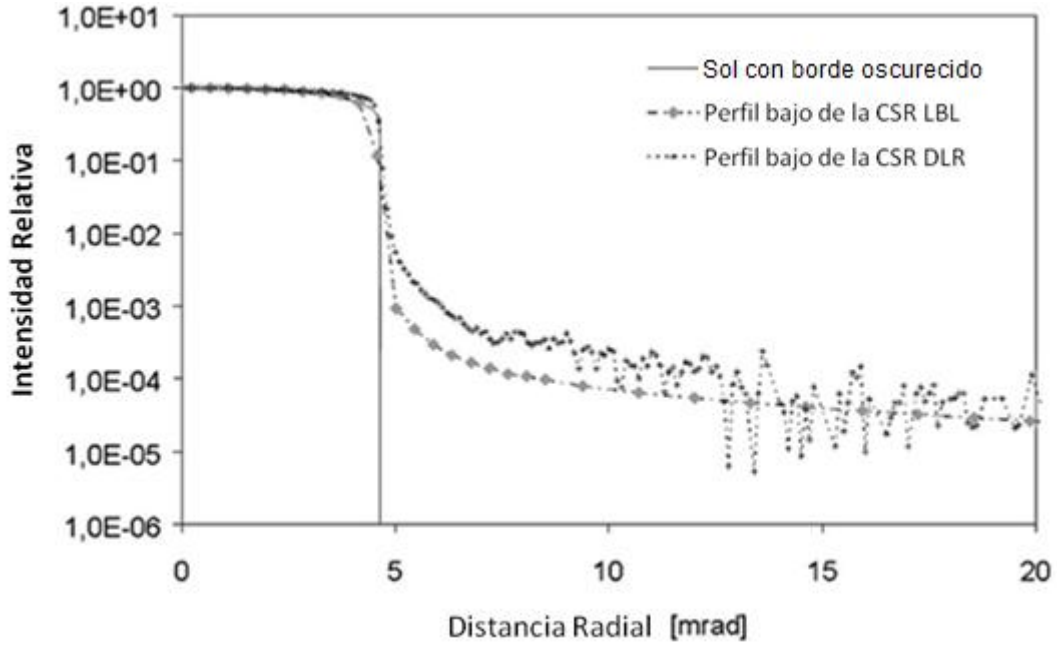


Fig. 1.9. Disco solar y región circunsolar, tomados por el LBL y el DLR (modificado de Neuman, 2002).

La Razón Circunsolar CSR, por sus siglas en inglés *circumsolar ratio*, es un parámetro que caracteriza la distribución de brillantez solar, en la Tierra, que se le llama forma solar *sunshape*. La CSR fue definida por Neumann como el flujo de radiación que está dentro de la región circunsolar dividida entre la radiación directa del disco y la aureola (Neumann, 2002).

$$CSR = \frac{I_{CS}}{I_{CS} + I_{Sun}} = \chi \quad (1.14)$$

La ecuación (1.14) muestra la razón de la energía contenida en la región circunsolar  $I_{CS}$  entre la energía dentro del disco solar  $I_{Sun}$  más la región circunsolar.

Esta misma relación es descrita por otros autores con la ecuación:

$$\chi = \frac{\Phi_{CS}}{\Phi_{i,CS}} \quad (1.15)$$

Se define entonces la energía contenida tanto en el disco como en la región circunsolar, y se considera que sus perfiles de intensidad  $\varphi$  dependientes del ángulo  $\theta$  tienen una simetría radial, donde  $\theta$  [mrad] es el desplazamiento angular:

$$\Phi_{Sol} = 2\pi \int_0^{\theta_\delta} \varphi(\theta) \theta d\theta \quad (1.16)$$

y

$$\Phi_{CS} = 2\pi \int_{\theta_\delta}^{\theta_\Delta} \varphi(\theta) \theta d\theta \quad (1.17)$$

Donde  $\theta_\delta = 4.65$  es el límite para el perfil solar, que se estableció por Puliaev en el Observatorio Nacional de Brazil (Buie, 2003) y,  $\theta_\Delta = 43.6$  es el límite para la región circunsolar establecida a partir de mediciones hechas por el Lawrence Berkeley Laboratory con un detector pyroeléctrico.

## 1.5 Métodos de medición de forma solar

### 1.5.1 Medición de la forma solar por el Lawrence Berkeley Laboratory(LBL)

A mediados de la década de 1970 el Laboratorio de Lawrence Berkeley (Lawrence Berkeley Laboratory) puso en marcha la instrumentación para realizar mediciones de la radiación circunsolar (Buie, 2003). El LBL diseñó un telescopio circunsolar el cual fue montado en un seguidor del movimiento del Sol.

El telescopio usa un elemento óptico de 7.5 cm de diámetro y de 1 m de distancia focal, basado en el principio de un espejo *fuera de eje* que daba el reflejo del sol (Neuman, 2002). El espejo formaba una imagen del Sol y el cielo que lo rodeaba al lado del eje del telescopio. La luz pasaba por un pequeño agujero en el detector con diferentes diámetros lo cual daba una resolución de 1.5 o 5 arc min. Después un detector pyroeléctrico de 1 mm de diámetro registraba la intensidad de la radiación (Neumann, 2002). Además se usaron 8 capas de filtros, un pirheliómetro y un piranómetro para establecer el sistema.

La determinación de los 43.6 mrad de región circunsolar se debió a que el LBL utilizó, para sus mediciones, un radiómetro de cavidad activa ACR *active cavity radiometer*, el cual tiene un campo de visión de  $5^\circ$ , lo que conlleva a un desplazamiento radial de  $2.5^\circ$  (43.6 mrad) del centro del disco hasta el extremo del ACR. Por lo tanto todos los cálculos posteriores consideran esta característica particular.

Estos telescopios circunsolares fueron colocados en diferentes partes de los Estados Unidos tomando en cuenta diferentes altitudes, diferentes tipos de climas, zonas costeras y zonas desérticas. Las ciudades escogidas fueron Albuquerque con dos telescopios, Argonne, Atlanta, Barstow, Boardman, China Lake, Colstrip, Edwards y Fort Hood también con dos telescopios. Los telescopios operaban casi automáticamente y tomaron datos durante casi 10 años. Los datos de los 11 lugares fueron recopilados y ajustados en una sola base de datos, se eliminaron los datos erróneos, para dar finalmente lo que se llamo Base Reducida de Datos RDB, por sus siglas en inglés *reduced data base*, con un total de casi 180,000 formas solares(Buie, 2003). En la Tabla 1.3 se muestra el porcentaje de perfiles para cada telescopio.

Tabla 1.3 Perfiles tomados por el LBL en las diferentes locaciones (tomada de Buie, 2003).

Porcentaje de perfiles de la forma solar de cada localidad ajustados por la RDB del LBL

Localidad	Porcentaje
Albq-STTF	20.4 %
Albq-STTF	7.1 %
Argonne	5.6 %
Atlanta	15.1 %
Barstow	23.3 %
Boardman	6.6 %
China-lake	5.5 %
Colstrip	3.6 %
Ft-Hood-Bunk	1.2 %
Ft-Hood-TES	1.0 %
Edwards	10.6 %

Los datos obtenidos fueron promediados y se ajustaron para dar diferentes razones circunsolares. Se generaron gráficas en la cuales es posible observar las intensidades dentro de estas condiciones de CSR (ver Figura 1.10).

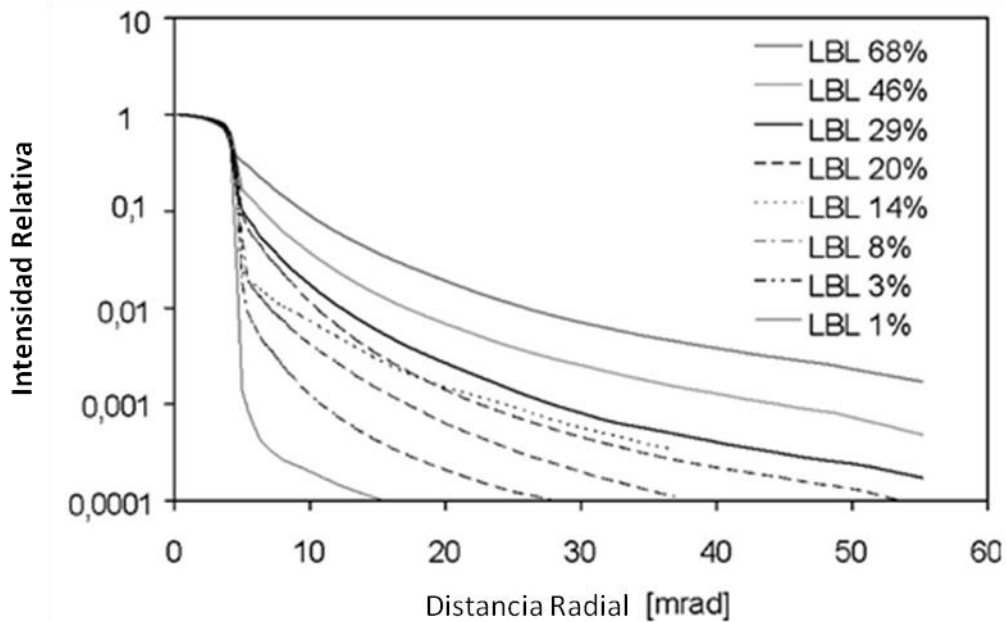


Fig. 1.10. Perfiles de CSR obtenidos por el LBL (tomado de Neuma, 2002).

### 1.5.2 Medición de la forma solar por el German Aerospace Center (DLR)

En 1992 el Centro Aeroespacial Alemán (German Aerospace Center) diseñó y creó una cámara para la toma de imágenes de la forma solar *sunshape*, en el ámbito de diseñar un Horno Solar, con ayuda de un telescopio óptico y con una cámara CCD con 12 bits de resolución (Neumann, 2002). El chip CCD es enfriado termoeléctricamente a 10 °C, lo que reduce el ruido térmico para así estabilizar la imagen de fondo, ayudado igualmente de filtros para reducir la intensidad de luz que entra a la cámara. La cámara y el pirheliómetro fueron montados en un seguidor de movimiento solar. Con esta cámara más de 2300 perfiles se obtuvieron de diferentes lugares de Europa: DLR Colonia Alemania, PSA en España y el Horno Solar en el CNRS en Odeillo Francia. Los datos se almacenaron, redujeron y ajustaron con un método similar al de RDB, pero con rangos más amplios de razones circunsolares CSR (Neumann, 2002).

El sistema óptico del telescopio de DLR incluía un filtro de densidad neutra con un paso de banda, esto para mejorar la respuesta del CCD. El arreglo de los lentes de la cámara tenían una resolución espacial de 0.065 mrad por pixel, mejor aún que los 0.44 mrad y 1.31 mrad de resolución de sistema del LBL (Neumann, 1999). Esto daba lugar a espacios más estrechos entre los datos obtenidos. Además, el tiempo requerido para tomar las imágenes era casi instantáneo y se obtenían datos más precisos. En la Figura 1.11 se ilustra el diagrama del sistema utilizado por el DLR.

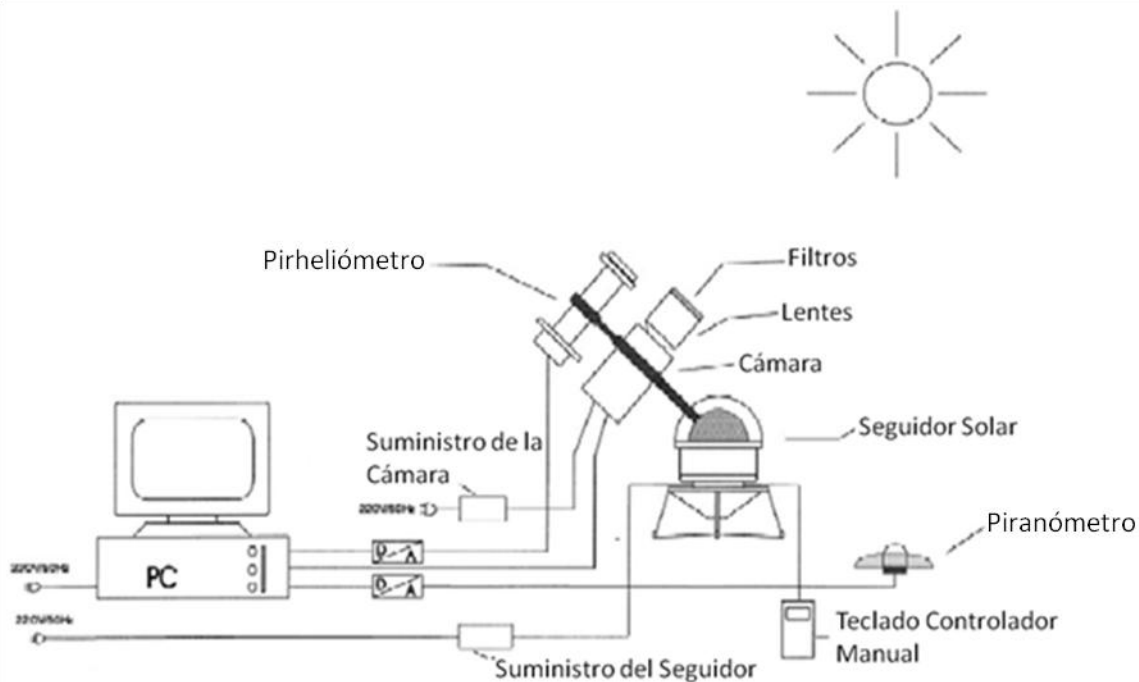


Fig.1.11 Diagrama del equipo para medición de forma solar usado por el DLR (tomado de Neumann, 1999).

En la Figura 1.12 se muestra la intensidad de las diferentes razones circunsoles (CSR) tomadas y promediadas por el DLR.

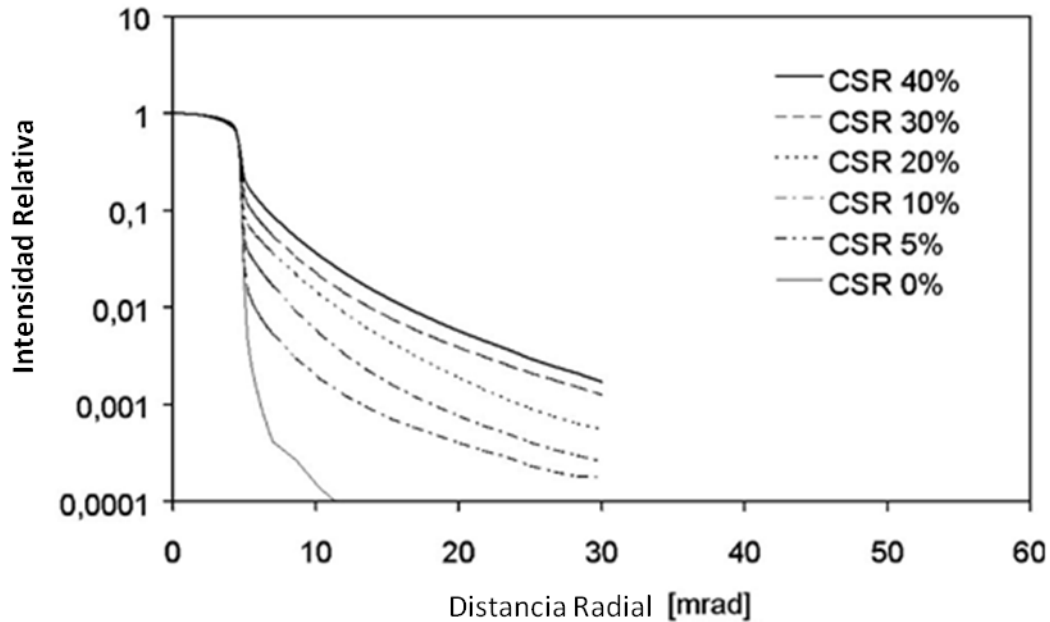


Fig. 1.12. Perfiles de CSR obtenidos por el DLR (tomado de Neuman, 2002).

## 1.6 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es:

El diseño de un sistema óptico para el estudio de la distribución de brillantez solar a partir de la captura de imágenes del Sol, con la ayuda de una cámara de sensor CCD.

Los objetivos específicos son:

- Desarrollar una metodología para captar y analizar las imágenes de la forma solar.
- Optimización de la resolución de las imágenes captadas con el sistema óptico desarrollado.

La tesis consta de cinco capítulos. En el presente capítulo se mencionan algunas de las tecnologías existentes para la alta concentración solar. Se explica cómo se ve afectada la radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre y la consecuente formación de la distribución de brillantez solar. También se exponen los diferentes experimentos que ya se han realizado para el estudio de la forma solar.



En el segundo capítulo se presenta la metodología que se llevó a cabo para la captura de imágenes del Sol, los dispositivos que se usaron para construir el sistema óptico, de igual forma se presentan las dificultades que se tuvieron con el uso de la cámara y el posterior acoplamiento de un telescopio para una mayor resolución en las imágenes.

El tercer capítulo describe los experimentos y los resultados que se obtuvieron con la cámara y con el telescopio acoplado al sensor CCD, también se presenta una metodología para el análisis de las imágenes capturadas; además se hace una comparación con el modelo propuesto por Buie (2003).

En el capítulo cuarto se presenta el diseño de un sistema óptico acoplado al sensor CCD para mejorar la resolución de las imágenes capturadas del Sol y poder realizar un análisis más detallado de la forma solar.

Finalmente, en el quinto capítulo se dan a conocer las conclusiones y recomendaciones para posibles estudios futuros.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El propósito, de los experimentos en este trabajo, es la toma de imágenes del Sol para el posterior estudio de la distribución de brillantez solar *sunshape*. Para ello se siguió la siguiente metodología:

1. Primero se diseña un arreglo de una cámara acoplada a un sistema de seguimiento solar ya existente, con esto se logra que la cámara esté siempre direccionada directamente al Sol. En el apéndice B1 se muestra la ficha técnica de la cámara de sensor CCD, el cual es altamente sensible a la luz, además de que este tipo de dispositivos son los más utilizados en estudios de brillantez solar.
2. Una vez realizado el paso anterior, se acopla la cámara a un sistema simple de seguimiento solar de un pirheliómetro, que cuenta con un montaje ecuatorial. Mediante un dispositivo reductor de engranajes, la rotación del eje al cual se encuentra sujeto el pirheliómetro se produce a una velocidad constante, siguiendo el movimiento del Sol, como se muestra en la Figura 2.1. También se diseñó y fabricó una pieza para ensamblar la cámara, basada en el mismo soporte para el pirheliómetro, de esta manera la pieza diseñada sostiene a la cámara sujetándose del pirheliómetro.

Posteriormente, en un segundo experimento en el cual se ensamblan componentes de un telescopio al sensor CCD con el fin de agrandar la imagen del disco solar, el telescopio se sujeta del pirheliómetro de la misma manera como se sujetó la cámara utilizada en el primer experimento.

3. Después de realizar los pasos anteriormente descritos, se procede a la captura de imágenes para su posterior análisis.

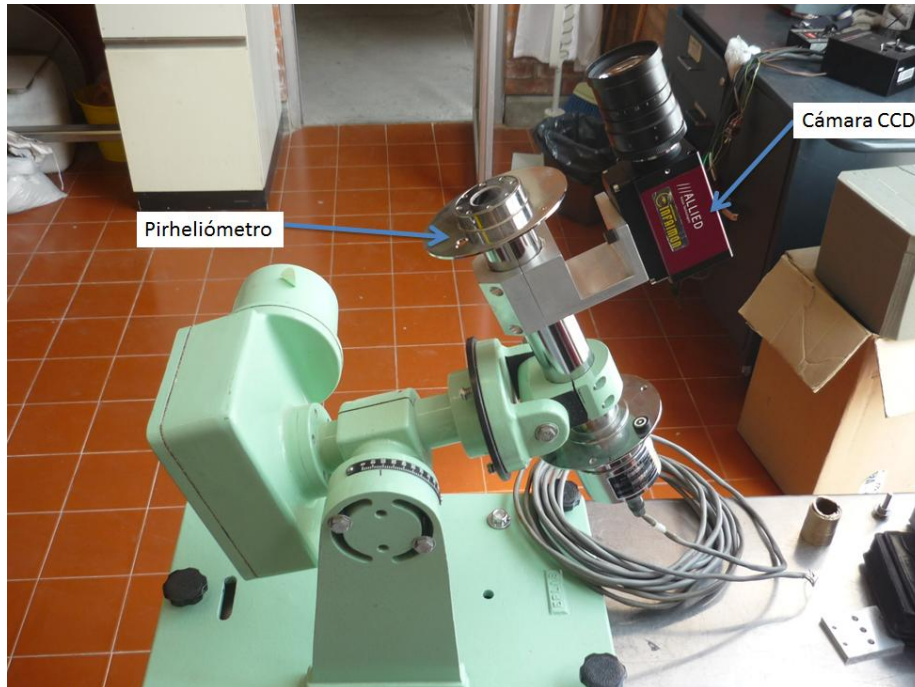


Fig. 2.1. Cámara acoplada al sistema simple de seguimiento del pirheliómetro.

Debido a problemas de localización del sistema simple de seguimiento, se utilizó otro sistema de seguimiento solar que puede soportar hasta dos pirheliómetros y que funciona también como estación meteorológica ya que cuenta con una montura para piranómetro y un receptor para medición de lluvia. En la Figura 2.2 se puede observar al sistema utilizado, un robot el cual cuenta con su propia computadora. La computadora tiene programadas las ecuaciones del movimiento solar, y calcula la posición aparente del Sol dándole la fecha actual, la longitud y latitud del lugar, y la hora en el meridiano 0; con estos comandos se controlan los motores del robot para seguir al Sol.



Fig. 2.2. Cámara montada en el pirheliómetro y la estación meteorológica.

## 2.1 Cámara CCD y su interfaz

La cámara utiliza un sensor CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) de imagen, que consta de un arreglo matricial de celdas fotoeléctricas las cuales captan la energía de la luz transformándola en una corriente eléctrica, ésta es procesada y guardada para así proporcionar una imagen digital como resultado final. Se nombra a las celdas del sensor como pixeles, y dependerá entonces de cuantos pixeles contenga el sensor, la imagen podrá tener menor o mayor resolución. El sensor tiene la capacidad de captar la luz casi uniformemente en todo el rango visible (VIS), aunque trabaja poco en el rango ultravioleta (UV) e infrarrojo (IR).

Las imágenes capturadas por el sensor CCD pueden ser de 8, 12 y 16 bits, en blanco y negro, con una resolución máxima de 2.07 megapíxeles, y para su estudio se utilizan los diferentes tonos de grises, los cuales indican la intensidad de luz que es captada por el sensor. Las dimensiones del sensor son aproximadamente de 14 x 8 mm, y cada celda mide 7.4 x 7.4  $\mu\text{m}$ , en las cuales podemos captar imágenes efectivas en 1280 x 960 píxeles que es la resolución máxima que nos otorga el programa (ver apéndice B1). Al utilizar los 16 bits, el nivel máximo de luz que puede registrar cada celda sin que esta se sobre-exponga es de  $2^{16}=65536$ , de esta manera la imagen capturada tiene una mayor información en cada píxel y podrá ser procesada y estudiada en un software. La información sobre la intensidad de luz que es registrada por el sensor puede ser usada, relativamente, como información de la cantidad de radiación que capta el sensor si se hace una relación con datos proporcionados por sistemas de medición de radiación solar.

## 2.2 Arreglo con cámara CCD

Un primer diseño, para que la cámara CCD tuviera un seguimiento del Sol, fue una pequeña placa de aluminio a la cual se le hicieron los barrenos correspondientes para sostener la cámara y acoplarla al sistema de seguimiento simple del pirheliómetro, pero únicamente se colocaba la cámara (ver Figura 2.3). El problema que surgió fue que no había una manera sencilla de alinear la cámara.



Fig. 2.3. Placa para montar la cámara al sistema de seguimiento solar.

El diseño definitivo se basó en la pieza del robot de seguimiento que sostiene al pirheliómetro. En la Figura 2.4 se muestra la pieza diseñada que abraza al pirheliómetro y tiene un espacio para colocar los tornillos que sostendrán a la cámara (ver apéndice A1). De igual manera que el pirheliómetro, la cámara apunta directamente al Sol y sólo se requieren ajustes manuales mínimos.

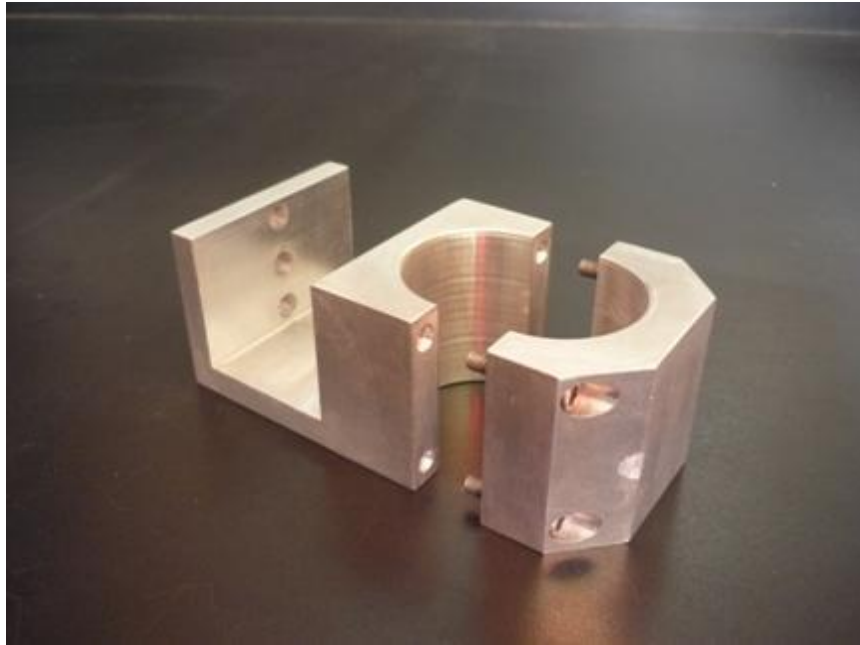


Fig. 2.4. Pieza para sostener la cámara sujeta del pirheliómetro.

La captura de imágenes se realizó con el enfoque de la cámara en infinito, con el diafragma de la cámara completamente cerrado y con un arreglo de filtros para atenuar la cantidad de luz que entraba al sensor. En la Figura 2.5 se muestra el ejemplo de una imagen del Sol tomada por la cámara el día 11 de marzo del 2010 en el que se usaron todos los filtros. A continuación se describen los filtros utilizados en los experimentos.

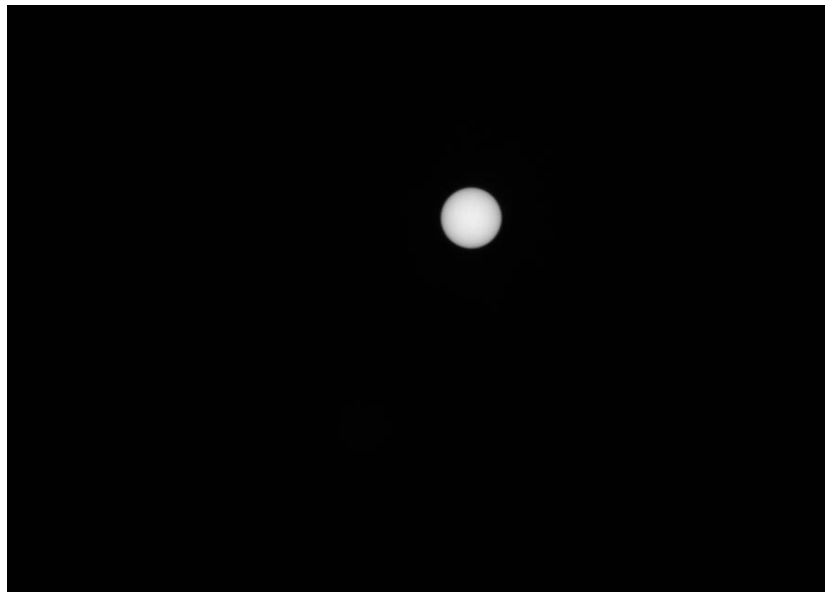


Fig. 2.5. Imagen del Sol tomada con la cámara CCD, sin telescopio.

### 2.3 Sistema de filtros

El sistema de filtrado de luz consta de 3 filtros con densidad óptica de 0.9 y con 12.5% de transmisión, 3 filtros con densidad óptica de 1.8 y con 1.6% de transmisión y un juego de polarizadores (ver apéndice B2). Los filtros son llamados de densidad neutra, esto quiere decir que absorben la luz dando diferentes niveles de atenuación, y que la variación en la transmisión de la región visible es muy pequeña, para que exista así un balance de colores en la imagen final.

Para atenuar de manera gradual la incidencia de luz, se utilizaron adicionalmente dos filtros polarizadores, con los cuales también se eliminan reflejos de superficies metálicas cercanas. Estos polarizadores son circulares, uno solo tiene una transmitancia del 30% y en paralelo con otro tienen una transmitancia del 20%; al empezar a cruzarse se logra una transmitancia aproximada del 10%, y de igual forma la variación de colores es balanceada (ver apéndice B2). Trabajan en un rango de longitudes de onda que abarca de 380 nm a 780 nm.

### 2.4 Adaptación de un telescopio

Debido a que las imágenes capturadas cuando se utilizaba sólo la cámara proporcionaban poca información en la zona de transición del disco a la región circunsolar, fue necesario adaptar componentes de un telescopio convencional (objetivo, tubo óptico del telescopio y botón de enfoque) para aumentar el tamaño de la imagen del disco solar y con esto la imagen de la brillantez solar es más detallada, lo cual resulta en un mejor análisis de dichas imágenes.

El telescopio utilizado es de tipo refractor, el principio de funcionamiento de éste utiliza un sistema de lentes, los cuales desvían la luz de un objeto lejano que después converge para dar la imagen en un plano focal, que en este caso es el sensor de la cámara CCD. La lente objetivo del telescopio tiene un diámetro de 60 mm.

De igual manera se atenuó la intensidad de la luz incidente con varios filtros que fueron colocados antes de los lentes; en la Figura 2.6 se muestra el ejemplo de una imagen del Sol capturada el día 12 de mayo del 2010 (los puntos que aparecen en la imagen son imperfecciones del uso que se le dio a la lente anteriormente), donde se utilizaron un filtro de 12.50% y dos de 1.60% de transmitancia. Se añadió también, un pequeño *pinhole* de 9.68 mm de diámetro que hace el papel de diafragma, para reducir aún más la intensidad de radiación solar a niveles aceptables por la cámara. Después la luz incidente se refracta y pega en el sensor que está colocado en el otro extremo del telescopio. La configuración final se muestra en el diagrama de la Figura 2.7.

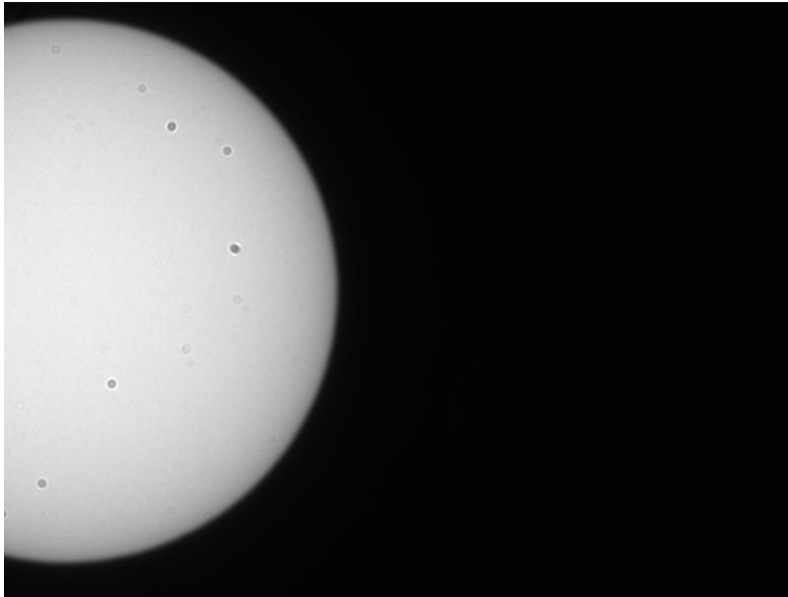


Fig. 2.6. Imagen del Sol tomada con el telescopio acoplado al sensor (Los puntos negros son imperfecciones de la lente).

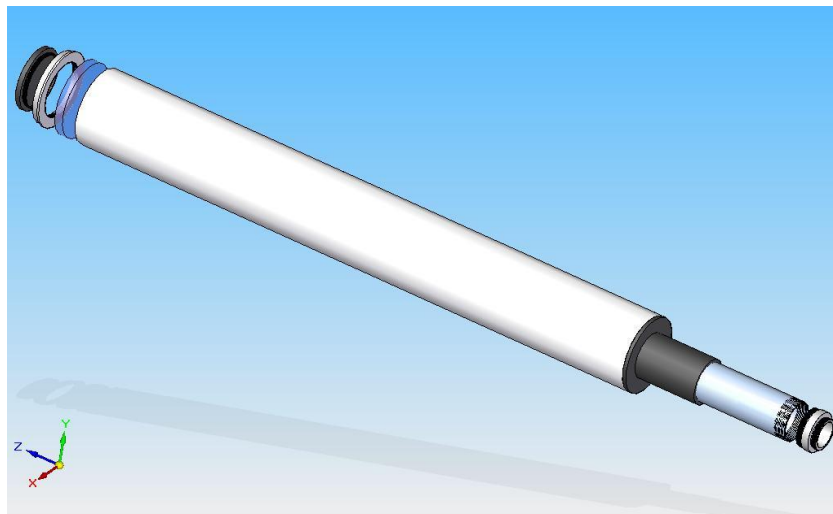


Fig. 2.7. Posición de las piezas diseñadas para acoplarse al telescopio.

La pieza que inicialmente se usó para sostener la cámara abrazada del pirheliómetro, ahora sostiene al tubo óptico del telescopio y a la cámara (ver Figura 2.8). El telescopio necesita alinearse ajustándolo manualmente ya que la imagen del disco solar abarca casi la mitad del tamaño del sensor. Además, se tuvieron que diseñar dos piezas para completar el sistema; una para poder unir la cámara al telescopio y otra para colocar los filtros sobre el objetivo.





Fig. 2.8. Sensor CCD acoplado a telescopio y montado en el robot.

## 2.5 Componentes fabricadas (piezas diseñadas)

La primera pieza elaborada fue la que se sujeta del pirheliómetro y sostiene a la cámara (ver Figura 2.9). Después se diseñó la pieza para poder acoplar la cámara al tubo óptico del telescopio, para esto se tomó en cuenta la configuración con la que ya contaba el telescopio; en la Figura 2.10 se observa la pieza que se atornilla al extremo del telescopio, donde se encuentra el plano focal, y sujeta de la misma manera a la cámara. Finalmente se diseñó la pieza donde se atornillan los filtros, como se ve en la Figura 2.11; esta pieza es sujeta por los mismos componentes que detienen a los lentes con los que cuenta el telescopio.

En el apéndice A1 se muestran los planos de las piezas diseñadas.

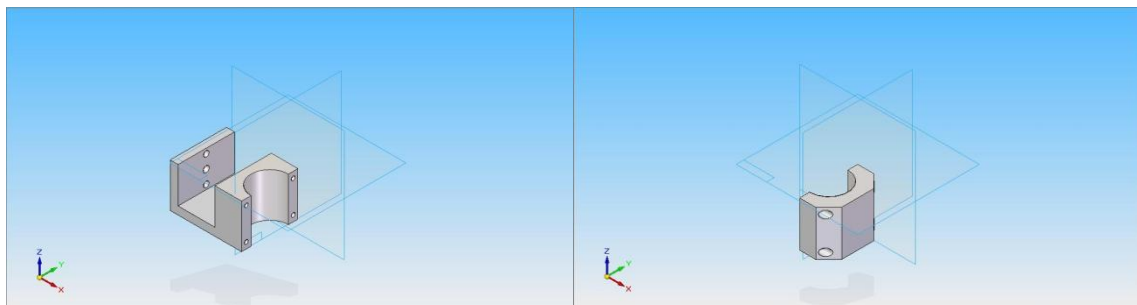


Fig. 2.9. Pieza para sostener a la cámara y al telescopio.



Fig. 2.10. Pieza para acoplar el sensor.

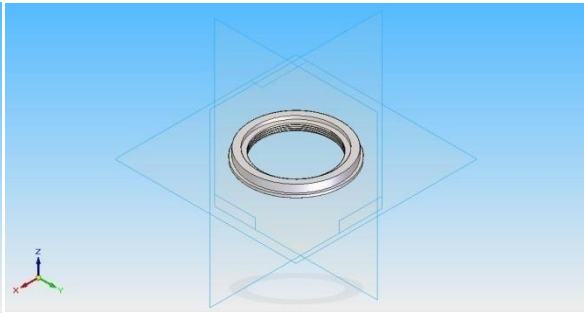


Fig. 2.11. Pieza para acoplar los filtros.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Durante los primeros experimentos, se utilizó únicamente la lente con la que contaba la cámara CCD, después se tomaron imágenes con el telescopio acoplado al sensor para poder ver en mayor tamaño la imagen del disco solar y detallar la información del comportamiento de su aparente distribución de brillantez. Esto también permite obtener mayor información de la región de transición del disco a la región circunsolar.

La cámara CCD Pike F210B cuenta con un sistema de lentes los cuales tienen una distancia focal de 75 mm. La lente objetivo del telescopio tiene una distancia focal de 700 mm.

Con la ecuación para una lente delgada, y tomando en cuenta las relaciones geométricas vistas en la sección 1.2, se calcularon las alturas de las imágenes teóricas que capta el sensor CCD.

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

También se usó una relación con el término de aumento transversal:

$$M_T = \frac{y_i}{y_o} = \frac{s_i}{s_o} \quad (3.2)$$

donde:

$f$	-	distancia focal (lente)
$s_o$	-	distancia objeto (distancia media al Sol)
$s_i$	-	distancia imagen
$y_o$	-	altura del objeto (diámetro del Sol)
$y_i$	-	altura de la imagen

El diámetro teórico del Sol reproducido por la lente de la cámara es de 0.7 mm, sin embargo, debido a los efectos atmosféricos descritos en la sección 1.3, el diámetro que capta el sensor es de aproximadamente 1 mm; mientras que en el caso del telescopio el diámetro teórico es de 6.54 mm, y la imagen del Sol captada por el sensor tiene un diámetro de casi 9.0 mm, como se puede ver en los siguientes cálculos. Esto indica que los diámetros reales son aproximadamente 40% más grandes que los diámetros teóricos.

Para el caso de la cámara digital (sin telescopio):

$$s_i = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{s_0}} = 0.075[mm] \quad ; y_i = \frac{s_i}{s_0} y_0 = 0.7[mm]$$

Para el caso de telescopio acoplado al sensor:

$$s_i = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{s_0}} = 0.7[mm] \quad ; y_i = \frac{s_i}{s_0} y_0 = 6.54[mm]$$

Para las primeras pruebas se utilizó el software LabView 9.0, y su plataforma “Machine Vision and ImageProcessing” para tomar y procesar las imágenes del Sol. Pero en el programa no se podían capturar imágenes con los 16 bits que proporciona el sensor de la cámara, y sólo se mostraban datos tomados a 8 bits como máximo. En consecuencia se optó por tomar las imágenes con el programa propio de la cámara, SmartView, e importar los datos, de 16 bits, a través del software MATLAB, para su estudio. MATLAB tiene la capacidad de mostrar una matriz de datos que representa a cada uno de los pixeles del sensor CCD, y muestra el valor en bits de la cantidad relativa de luz incidente.

### 3.1 Cámara digital con su propio lente (sin telescopio)

Para la toma de imágenes, la cámara tenía que estar con la posición de enfoque en infinito y el diafragma de la cámara necesitaba estar totalmente cerrado ya que al pasar demasiada luz la imagen se sobreexponía y la información se pierde. Se tuvo que hacer uso de todos los filtros para obtener así una transmitancia del  $0.8 \times 10^{-6}\%$ ; en la Tabla 3.1 se muestran los filtros utilizados. Para lograr que la intensidad de la luz estuviera a punto de saturar al sensor se abrió muy poco el diafragma, esto para obtener la mayor cantidad de información de incidencia de luz posible.

Tabla 3.1. Filtros usados en los experimentos con la cámara.

	FILTROS		
Tipo	103	106	
Densidad Óptica	0.9	1.8	
Transmitancia	12.50%	1.60%	Transmitancia Total
Usados	3	3	0.000008%

En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestran las fotos tomadas con SmartView, en la mismas se puede apreciar el aparente movimiento del Sol. Se buscó centrar al disco solar en el marco de la cámara ya que la imagen reproducida del disco resultó ser demasiado pequeña en comparación con las dimensiones del tamaño del sensor. Las fotos tomadas por SmartView son imágenes que están en una escala de grises, lo que permite hacer una nálisis de niveles de intensidad pixel por pixel.

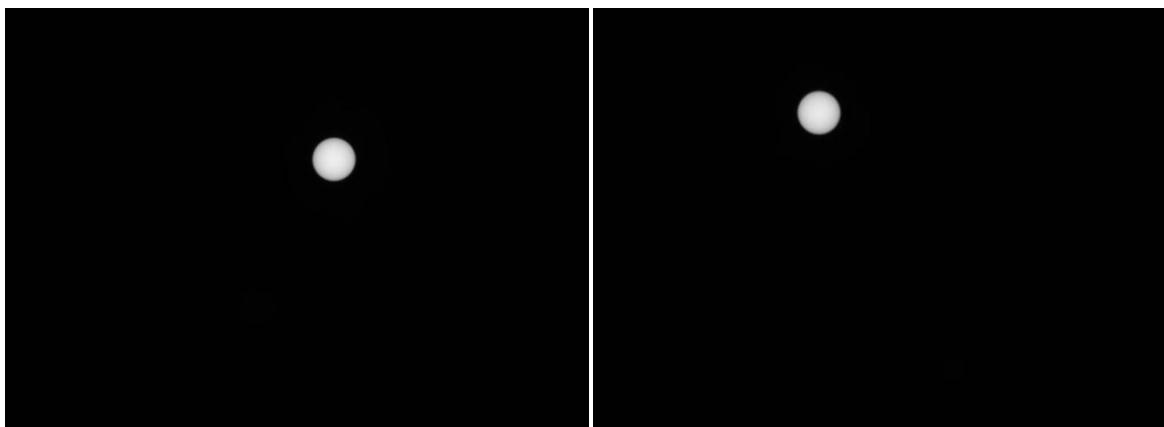


Fig. 3.1.

Fig.3.2.

Fotos del Sol tomadas con el lente de la cámara Pike.

El software utilizado para procesar las imágenes, MATLAB, toma los datos de escala de grises y puede transformarlos en una imagen con la intensidad de luz que es registrada en cada pixel. La metodología para analizar las imágenes fue la siguiente:

1. El primer paso fue importar la imagen tomada por SmartView, enseguida se le da la instrucción de mostrar la matriz con los datos obtenidos en cada pixel (ver Figura 3.3).

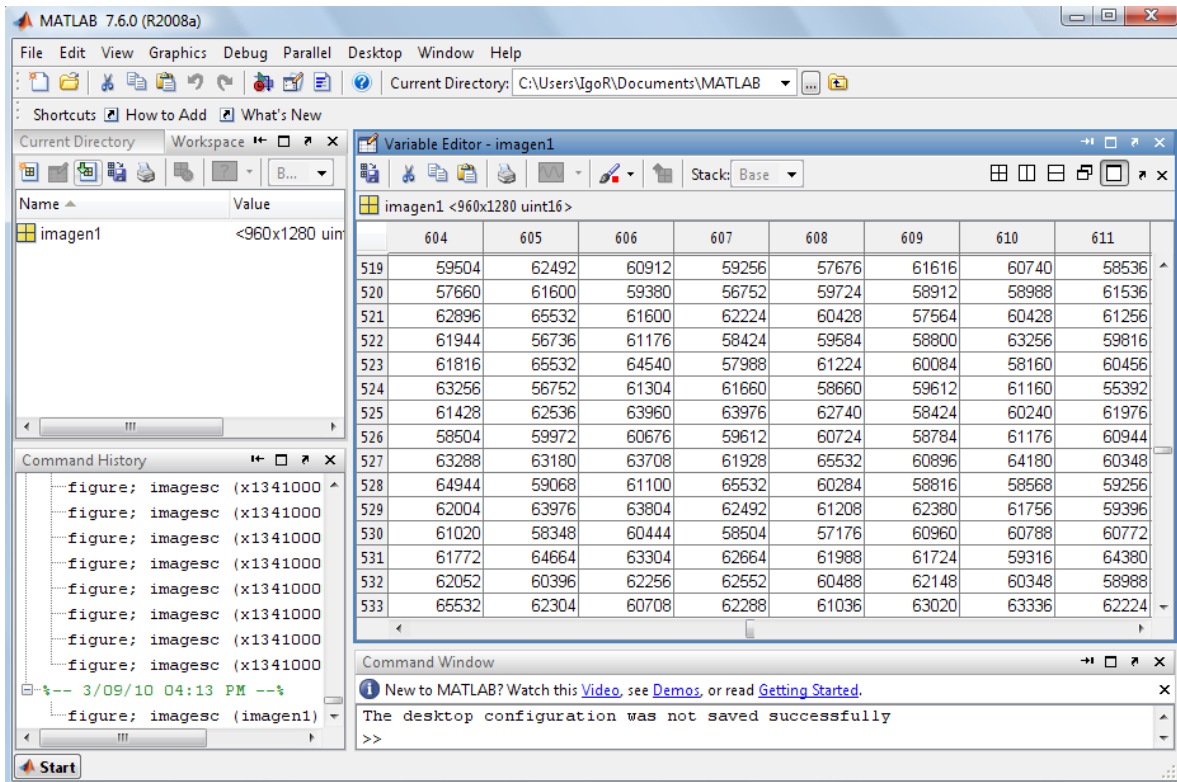


Fig. 3.3. Matriz de datos importados por Matlab.

De cada una de las imágenes, los datos procesados por el programa muestran en la matriz que, el marco de la fotografía tiene dimensiones de 1280x960 pixeles.

- Posteriormente se hace un gráfico con los datos de la matriz, en el cual se ilustra la intensidad de luz incidente en cada pixel con colores, con un tono rojo un valor máximo y en tono azul un valor mínimo (ver Figura 3.4).

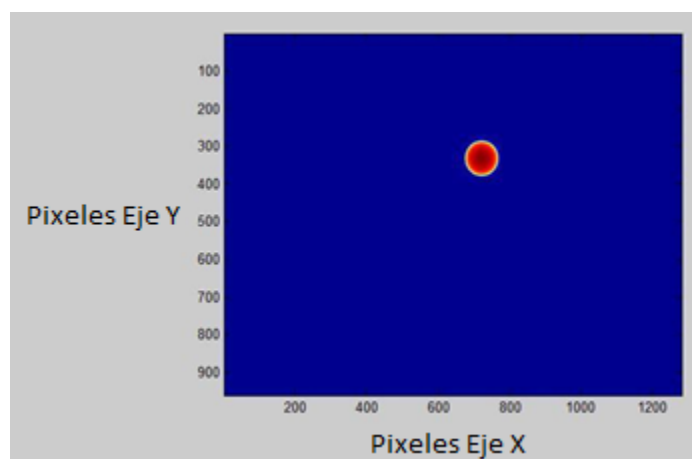


Fig. 3.4. Gráfica en dos dimensiones de la forma solar (Eje X y Eje Y).

3. Para poder identificar las coordenadas del centro del disco se agranda la imagen con la instrucción de zoom (ver Figura 3.5), esto también permite visualizar su diámetro y su perfil de distribución radiativa.

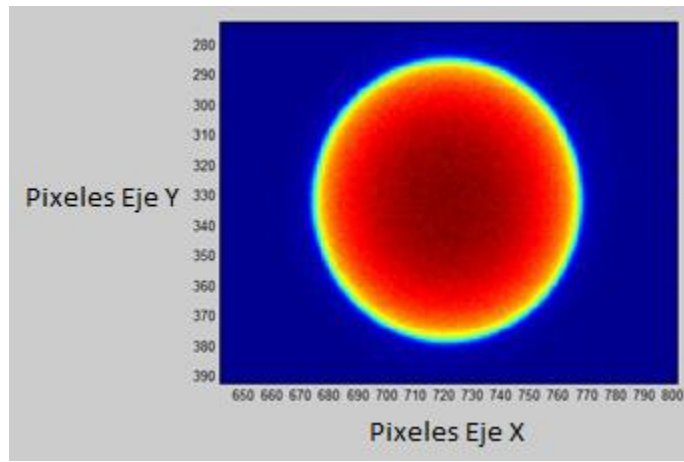


Fig. 3.5. Gráfica en dos dimensiones de la forma solar y zoom en disco solar (Eje X y Eje Y).

4. Al conocer las coordenadas del centro del disco se realiza otra gráfica con una línea de datos de la matriz (ver Figura 3.6), la cual va de un extremo a otro del sensor, paralela al eje X, y que atraviesa al disco. Esto permite ilustrar el comportamiento de la distribución radiativa del Sol y la conducta de la radiación difusa alrededor del Sol.

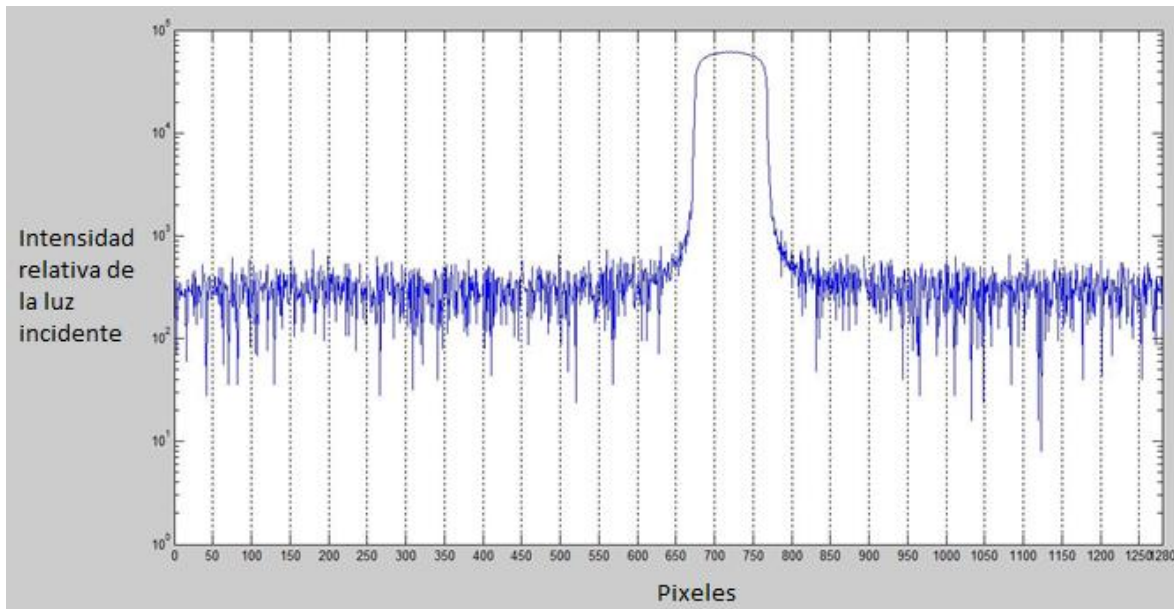


Fig. 3.6. Gráfica en dos dimensiones de una línea de datos de la matriz (Eje X y Eje Z).

En las Figuras 3.5 y 3.6 se observa que el diámetro del disco solar ocupa casi 100 píxeles. Si se toma en cuenta el perfil angular, a partir del centro del disco, como lo define Buie (2003), el radio del Sol sería de 50 píxeles, y esto indica que a través de la cámara se alcanza una razón de aproximadamente 0.099 mrad/píxel. La

región circunsolar que abarca la cámara es de poco más 10 veces el tamaño del radio, lo que cumple con lo establecido en trabajos anteriores hechos en el Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) y el German Aerospace Center (DLR) (Wilbert, 2012). En la Tabla 3.2 se muestra una tabla con las relaciones de miliradianes/píxel obtenidas para las imágenes, donde se compara el radio del Sol en miliradianes contra el radio ocupado en píxeles.

Tabla 3.2. Relaciones mrad/píxel obtenidas con la cámara.

Experimentos con la cámara			
Día	Radio real del Sol [mrad]	Radio del Sol [píxeles]	[mrad/píxel]
11/03/2010	4.7175	47	0.10037234
24/03/2010	4.6830	45	0.104066667

Las magnitudes de los datos varían de entre 400 a 600 en la región circunsolar y, de 50000 a 65000 en la zona del disco solar. Si se observan los datos en la matriz se aprecia que los valores que ocupa el disco solar son muy parecidos aunque disminuyen al final del disco. En la región circunsolar también se observa que los valores son muy parecidos. El salto tan grande entre estos valores indica que ese día en particular estaba muy despejado, con un índice de claridad de 0.7. Los valores cercanos a los 65535 bits en el disco solar dan a entender que las imágenes fueron tomadas ocupando la máxima capacidad del sensor.

Los datos obtenidos, a partir de las imágenes, se ajustaron en una hoja de Excel para generar un gráfico que muestre la curva de la imagen solar. En la Figura 3.7 se muestran los valores de los diferentes perfiles solares sobrepuestos en una misma gráfica, en la cual se verifica lo anteriormente dicho sobre el tamaño del disco solar y la variación de los valores entre el disco y la región circunsolar.

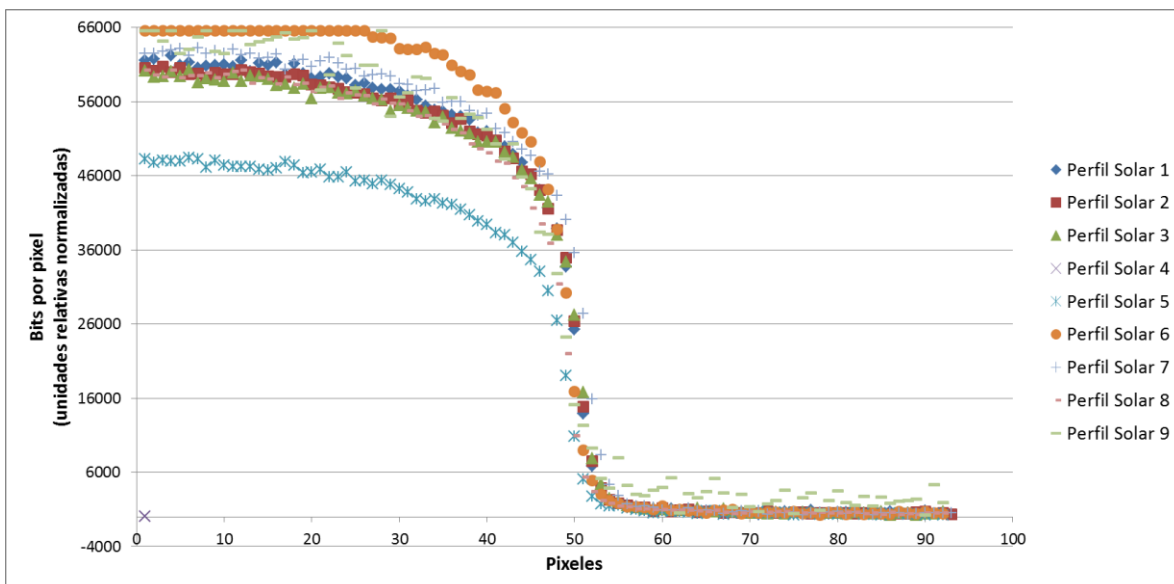


Fig. 3.7. Gráfica de varias imágenes de perfiles de la forma solar (disco solar y región circunsolar), sobrepuestos.



De la Figura 3.7 es posible observar como los perfiles 6 y 9 están saturados, lo cual indica que la imagen fue sobre-expuesta.

En las pruebas que se realizaron con los lentes de la cámara, se utilizaron todos los filtros para atenuar la luz, lo que funcionó para dejar pasar la cantidad de luz adecuada y lograr llevar al sensor casi a su máxima capacidad. En el momento que empezaba a nublarse el cielo, lo único que se necesitaba hacer era abrir, poco o mucho, el diafragma de la cámara.

### 3.2 Cámara digital con telescopio

Debido a que las imágenes tomadas únicamente con el lente, con el cual contaba la cámara, daban relativamente poca información de la zona donde se realiza la transición del disco a la región circunsolar (limbdarkening), se acoplaron al sensor CCD, componentes de un telescopio convencional con una lente con distancia focal de 700 mm; con esta configuración se logra que la imagen del disco solar ocupe mayor espacio en el sensor, además de que permite obtener información detallada de la distribución de brillantez solar.

En principio se hicieron pruebas para ajustar el enfoque con el telescopio; se tomó como referencia un punto lejano. Debido a que las pruebas se llevaron a cabo en días con un menor índice de claridad, para cada uno de los experimentos se utilizaron diferentes configuraciones de filtrado para dar diferentes transmitancias. Se añadieron los filtros polarizadores para ajustar la incidencia de luz. En la Tabla 3.3 se muestra el tipo de configuración de filtros que se usaron para los experimentos.

Tabla 3.3. Filtros usados en los experimentos con el telescopio.

	FILTROS		
Tipo	103	106	
Densidad Óptica	0.9	1.8	
Transmitancia	12.50%	1.60%	Transmitancia Total
15-abr	1	2	0.00320%
19-abr	1	2	0.00320%
22-abr	1	1	0.20000%
23-abr	2	1	0.02500%
12-may	1	2	0.00320%
15-jul	1	2	0.00320%

Durante las pruebas iniciales con el nuevo sistema óptico y dada la gran amplificación lograda con esta configuración, resultó difícil ajustar la imagen del disco solar (ver Figura 3.8). Dado que en la literatura (Buie, 2003) se menciona la consideración de una simetría radial aplicada a la distribución de brillantez solar, se decidió que en las posteriores imágenes, el disco solar fuera capturado por la mitad y dejar el espacio restante del sensor para la región circunsolar como se

muestra en la Figura 3.9 (los puntos que se aprecian en la imagen son imperfecciones de la lente, como se mencionó en la sección 2.4).

De igual forma como se hizo con las pruebas hechas con la cámara, se optó por usar el programa de la cámara Pike para la toma de imágenes y analizar los datos a través de MATLAB, para obtener así los 16 bits.

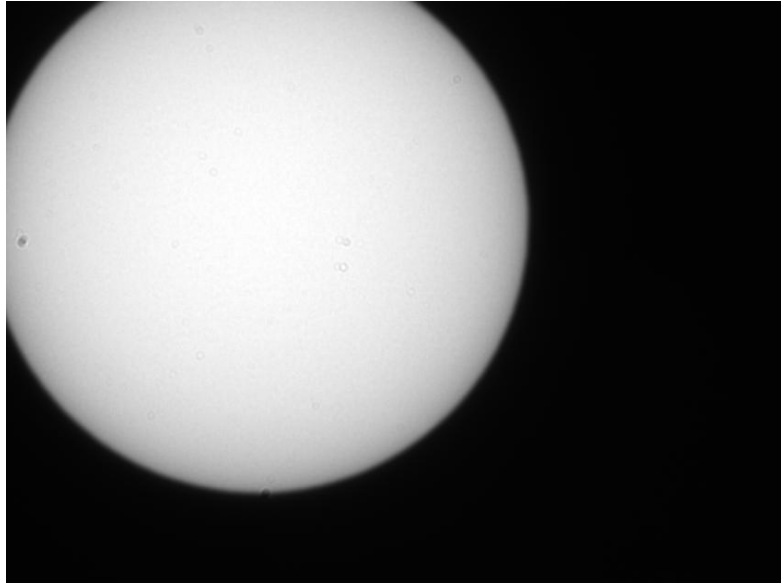


Fig. 3.8. Imagen del Sol ampliada con el telescopio.

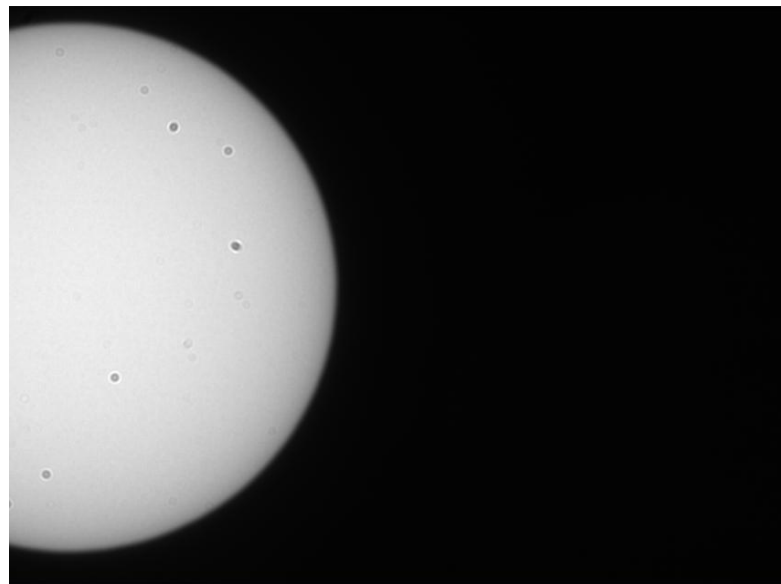


Fig. 3.9. Imagen de la mitad del disco solar ampliada con el telescopio.

Para las pruebas posteriores con la nueva configuración óptica, se siguió el mismo procedimiento de análisis usado con la cámara. Como se muestra en la figura 3.10, después de importar las imágenes, MATLAB proporciona la matriz con los valores registrados en cada uno de los pixeles del sensor; se continúa con el

gráfico (ver Figura 3.11) en el cual se visualizan las coordenadas del centro del Sol. Como se mencionó anteriormente el análisis de la forma solar se realiza con la captura de imágenes del disco solar tomado por la mitad como se muestra en la Figura 3.12.

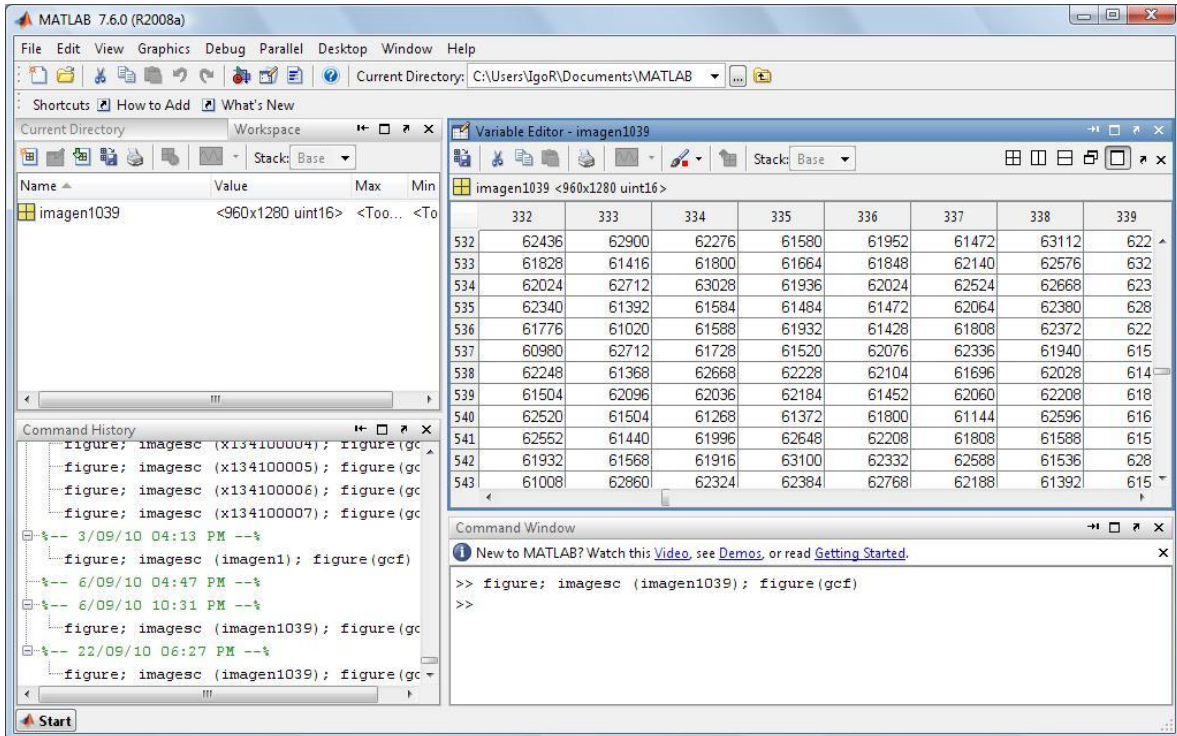


Fig. 3.10. Matriz de datos de imagen tomada con el telescopio.

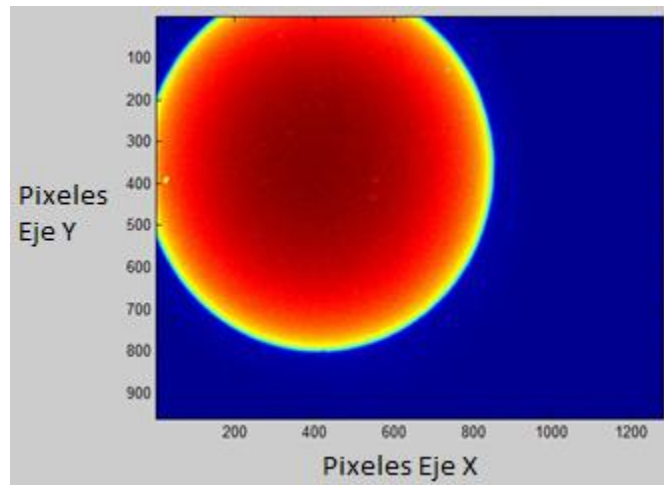


Fig. 3.11. Gráfica en dos dimensiones de la imagen tomada con el telescopio (Eje X y Eje Y).

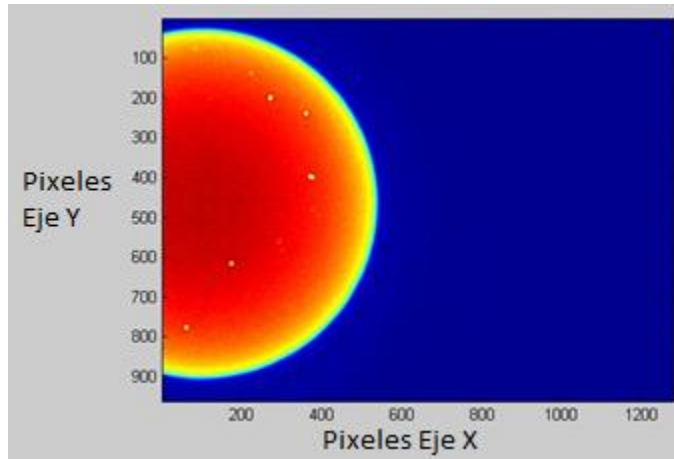


Fig. 3.12. Gráfica en dos dimensiones del disco solar, por la mitad, captado por el telescopio.

Los valores obtenidos en el análisis de las imágenes para el radio del Sol varían entre los 430 y 440 píxeles, esto debido a que las pruebas se hicieron en diferentes días y que el diámetro aparente de Sol varía como se mencionó en la sección 1.4. A su vez se logran razones de entre 0.0101 y 0.0105 mrad/píxel (ver Tabla 3.4), lo cual indica que existe mayor resolución, con este equipo, que el utilizado por el DLR, así mismo se utilizan 16 bits para las imágenes, además, la zona de transición del disco a la región circunsolar resulta en un mayor número de datos.

Tabla 3.4. Relaciones mrad/píxel obtenidas con el telescopio.

Día	Experimentos con el telescopio		[mrad/píxel]
	Radio real del Sol [mrad]	Radio del Sol [píxeles]	
15/04/2010	4,62256	442	0,010458281
19/04/2010	4,612323	438	0,010530418
22/04/2010	4,6044	440	0,010464545
23/04/2010	4,602	453	0,01015894
12/05/2010	4,55787	434	0,010502005
15/07/2010	4,50109	432	0,01041919

Al ocupar mayor tamaño el disco solar en el sensor, la aureola ocupó aproximadamente de 630 a 640 píxeles, lo que conlleva a un desplazamiento angular de 6 mrad.

### 3.3 Comparación de resultados con el modelo propuesto por Buie et al (2003)

En estudios anteriores hechos por Noring (1991) se examinaron los perfiles solares tomados por el LBL, en los cuales se menciona que existe una relación lineal entre la intensidad solar y la distribución angular tomada a partir del centro del Sol y hasta el final de la aureola. Por otra parte Buie (2003), indica que los

perfiles estudiados y presentados por Neumann (2002), tomados por el telescopio del DLR representan de mejor manera el perfil del disco solar.

En el estudio realizado por Buie (2003), en el cual se toman en cuenta los perfiles tomados por el LBL y el DLR, se presenta un algoritmo que puede ser utilizado para representar los perfiles de la distribución solar, independientemente de la situación geográfica y la época del año, además de que el radio disco solar se propone que mida 4.65 mrad.

El modelo de Buie(2003) para el disco solar está dado de la siguiente manera:

$$\phi(\theta) = \frac{\cos(0.326\theta)}{\cos(0.308\theta)} \text{ para } \{\theta \in \mathbb{R} / 0 \leq \theta \leq 4.65\text{mrad}\} \quad (3.3)$$

Y, el modelo para la región circumsolar está dado como sigue:

$$\phi(\theta) = e^{\kappa\theta^\gamma} \text{ para } \{\theta \in \mathbb{R} / \theta > 4.65\text{mrad}\} \quad (3.4)$$

En ambos casos  $\phi$  representa el perfil de intensidad solar en función del desplazamiento angular  $\theta$  que está dado en miliradianes.

Para la región de la aureola se utiliza la ecuación (3.4) y los valores de los exponentes  $\kappa$  y  $\gamma$  los da Buie (2003) de la siguiente manera:

$$\gamma = 2.2 \ln(0.52\chi)\chi^{0.43} - 0.1 \quad (3.5)$$

$$\kappa = 0.9 \ln(13.5\chi)\chi^{-0.3} \quad (3.6)$$

donde  $\chi$  es el valor de la Razón Circumsolar, definida en la sección 1.4.

Estos algoritmos representan el perfil de distribución solar desde el centro del disco hasta el final de la aureola en una sola dimensión ya que para propósitos del modelo se considera que la distribución radial es simétrica.

Los datos obtenidos por medio de estos modelos son comparados con los valores que proporcionan el sistema óptico con la cámara CCD y con los componentes del telescopio acoplado al sensor. Se realizó una metodología para comparar estos valores utilizando EXCEL:

1. Después de la toma de imágenes y la obtención de las coordenadas del Sol, se tomó una línea de datos de la matriz que va desde el centro hasta el final de la imagen, paralela al eje X. Los valores se copiaron en una tabla de EXCEL y se normalizaron con respecto al valor tomado del centro del Sol.

2. Se calculó la razón de mrad/pixel. El radio teórico de Sol es determinado con base a la fecha en la cual se tomaron las imágenes y el valor obtenido corresponde a cada valor dado anteriormente.
3. Ya logrados los pares de datos, se hizo una gráfica en la cual el eje X representa el desplazamiento angular en miliradianes, el eje Y representa la intensidad relativa de radiación.
4. Para graficar el modelo matemático correspondiente al disco solar, se le dan los valores obtenidos para el desplazamiento angular en miliradianes, estos corresponden a los adquiridos en el paso dos.
5. En el caso del modelo para la aureola solar, las variables son la razón circunsolar y el desplazamiento angular. El valor para la razón circunsolar se estima al empatar la curva resultante con la curva obtenida experimentalmente.

La metodología se aplicó tanto en las imágenes tomadas con la cámara, como en las tomadas por el telescopio. Ya que las ordenes de magnitud entre el disco y la aureola solar son diferentes, al eje que representa la intensidad de luz incidente se le dio la instrucción para presentarlo en escala logarítmica, con lo que se logra además, una mejor visualización de la forma solar *sunshape*.

La comparación de resultados para imágenes tomadas con la cámara se muestra en las Figuras 3.13 y 3.14.

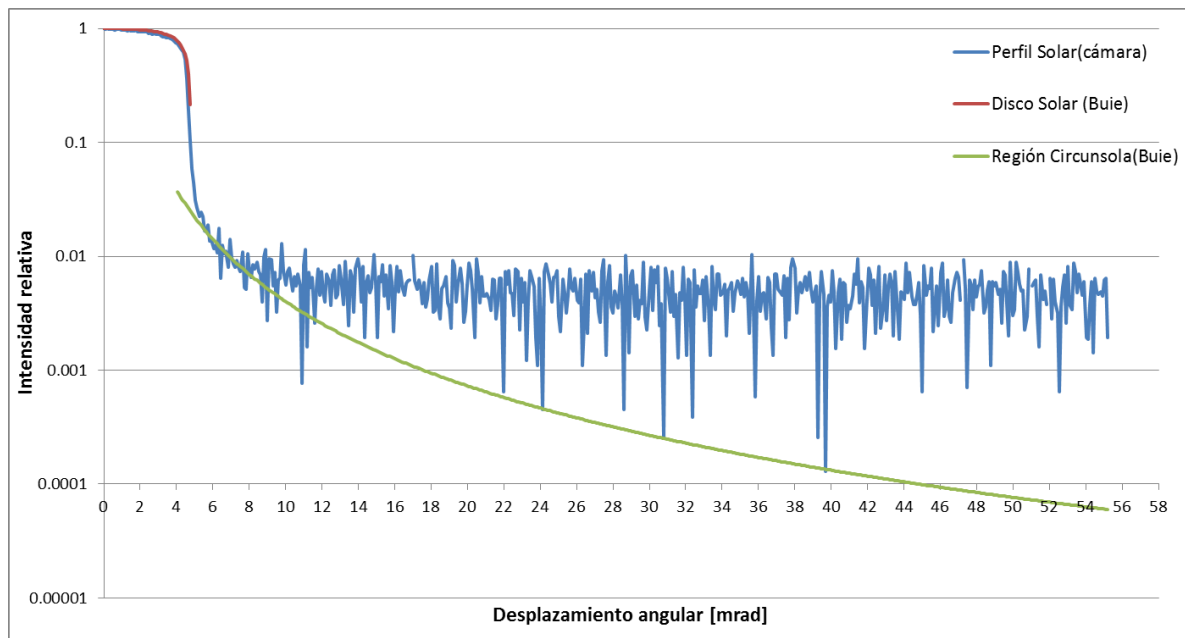


Fig. 3.13. Perfil solar tomado con la cámara.

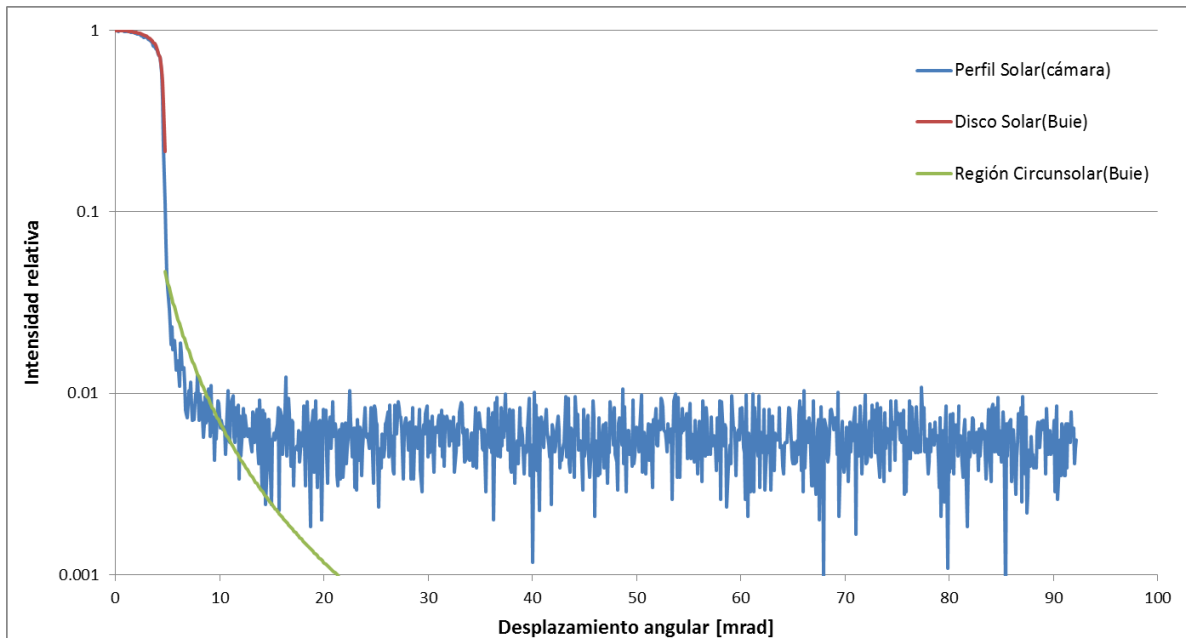


Fig. 3.14. Perfil solar tomado con la cámara.

El algoritmo que modela la zona del disco empata con los datos obtenidos con las imágenes, pero al llegar al valor de 4.8 mrad el resultado de la ecuación se vuelve negativo y no parece representar al borde oscurecido del Sol *limbdarkening*.

El perfil obtenido de la aureola solar parece estabilizarse a partir de los 20 mrad, y el modelo de Buie (2003) solo se ajusta a esta curva en los primeros 10 mrad.

Los datos que se muestran en las gráficas, correspondientes al perfil obtenido por la cámara que representan a la región circunsolar, presentan un cierto ruido, debido a que la cámara no cuenta con la resolución adecuada y que al no ser enfriada el sensor genere datos alejados de los datos reales.

Otra causa para tener picos en los datos es debido al comportamiento de la atmósfera, ya que como se mencionó en el primer capítulo, la luz solar es esparcida y atenuada; este efecto se incrementa cuando en la atmósfera existen muchas partículas en suspensión, lo cual es típico de una atmósfera contaminada.

También, debido a que en la región del disco solar la intensidad de la luz es mayor que en la región circunsolar, el sensor logra obtener una mejor precisión en la captura de datos.

En los resultados obtenidos con la configuración de telescopio-sensor se ejecutó el mismo análisis. En las Figuras 3.15 y 3.16 se aprecia que las curvas experimentales y el modelo correspondiente al disco solar se ajustan casi en su totalidad, incluida la extremidad oscurecida *limbdarkening*.

Para el caso de la aureola, en la Figura 3.15, se muestra como el algoritmo para la región circunsolar no consigue adaptarse a la curva dada a partir de las imágenes

del Sol. De igual forma la curva experimental parece estabilizarse, en este caso a partir de los 7 mrad. La variación que se presenta en la zona del disco solar es provocada por la imperfección de la lente.

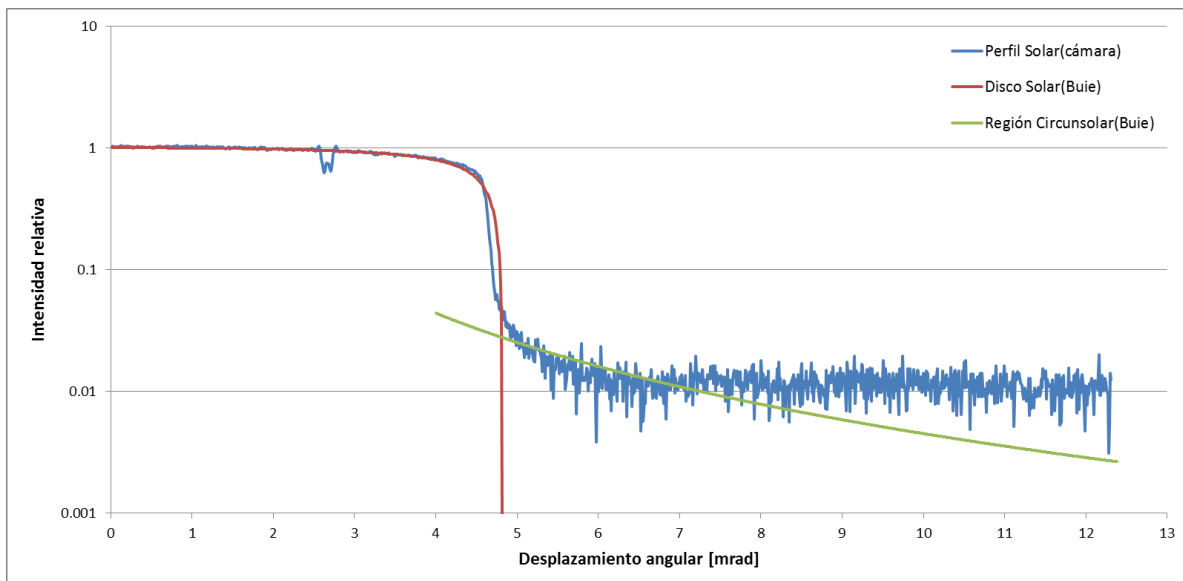


Fig. 3.15. Perfil solar tomado con el telescopio.

Se realizaron algunas pruebas cuando el cielo estaba muy nublado, donde el índice de claridad era de apenas 0.6. La Figura 3.16 muestra como en este caso existe un decaimiento por parte de la aureola solar, y este empata de manera positiva con el modelo matemático dado anteriormente.

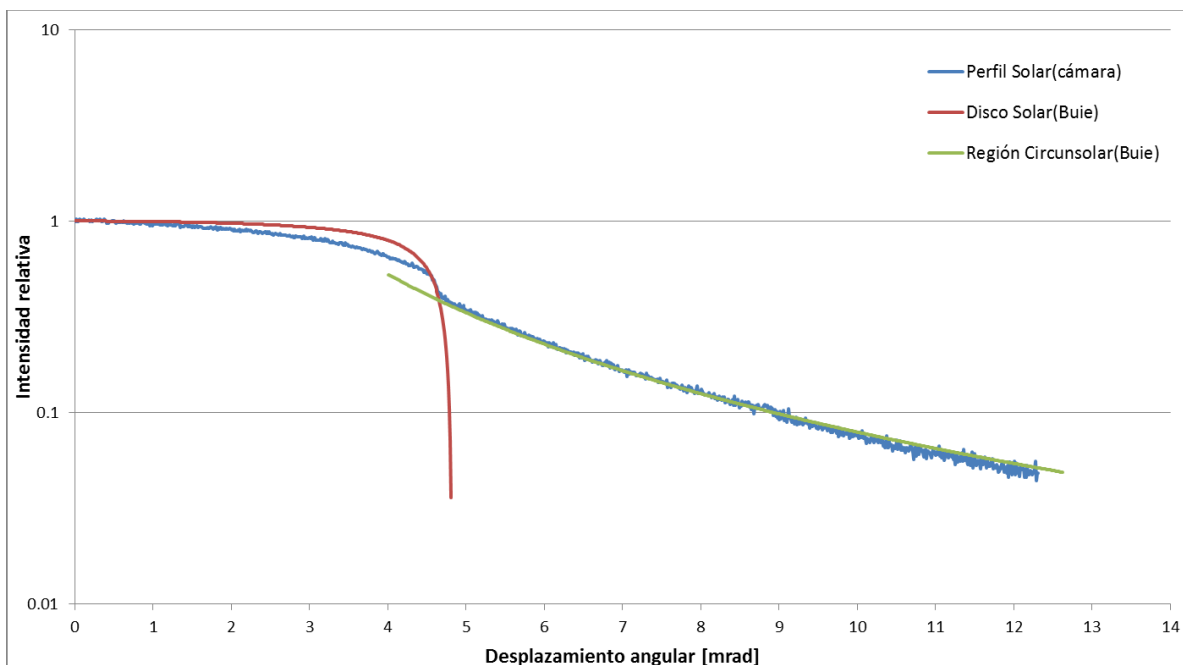


Fig. 3.16. Perfil solar tomado con el telescopio.



Para los dos tipos de experimentos que se hicieron, se buscó tener imágenes tanto en días despejados como en días nublados. En las imágenes con el cielo totalmente despejado se observa como el modelo matemático no empata con la curva tomada, ya sea con la cámara o con el telescopio. Para el caso de un día nublado, el modelo matemático se ajusta a la curva obtenida con el experimento.

## 4. DISEÑO DEL SISTEMA ÓPTICO

En los experimentos anteriormente descritos, en un principio se ajustó una cámara con sensor CCD a un sistema de seguimiento solar. Posteriormente en lugar de la lente de la cámara se utilizó un telescopio convencional acoplado al mismo sensor, y se ocupó el mismo sistema de seguimiento solar.

A partir de los resultados que se obtuvieron con las dos configuraciones (cámara y telescopio), se concluyó que lo óptimo es capturar imágenes con la ayuda de un arreglo óptico acoplado al sensor CCD, y utilizar el mismo sistema de seguimiento solar. La configuración óptica deberá comprender, a partir de la mitad del disco solar, hasta 20 mrad de distribución angular, ya que a partir de 20 mrad la variación y la intensidad de la radiación de la región circunsolar no resultan significativas para los sistemas de alta concentración solar, ya que como se mencionó en el primer capítulo algunos de estos concentradores utilizan una imagen del Sol, y a partir de los resultados obtenidos en los experimentos es posible observar que los datos se estabilizan después de los 20 mrad.

### 4.1 Parámetros del diseño óptico

Para el diseño del sistema óptico fue necesario considerar las dimensiones del sensor y el tamaño de la imagen solar requerida, que será estudiada. La lente, de uso comercial, deberá reproducir una imagen del disco solar tal que permita dar el espacio necesario para capturar la región circunsolar en el sensor.

Como se mencionó en el capítulo 3, la imagen del Sol reproducida por el telescopio es de casi 9 mm, lo que resulta en demasiado espacio ocupado por el disco solar en el sensor y poco espacio ocupado por la región circunsolar, por lo tanto, se optó por una distancia focal menor y así reducir el tamaño de la imagen. El resultado fue la mitad de la distancia focal original, de esta manera se obtendrá

información utilizable tanto del disco solar como de la región circunsolar, además se logrará una relación de aproximadamente 0.02 mrad por pixel, aún mejor que la relación de 0.065 mrad por pixel del DLR.

Para los propósitos de diseño, se consideró que la distancia al objeto (distancia al Sol)  $s_s$  es igual a infinito, ya que ésta con respecto a la distancia de la imagen  $s_i$  resulta ser mucho mayor. Esto quiere decir que en la ecuación gaussiana, para lentes delgadas (Klein, 1986), el término que contiene a la distancia al objeto se vuelve cero y la ecuación se reduce a la expresión siguiente:

$$s_i = f$$

Ahora, la distancia focal reducida es de 350 mm; al utilizar las relaciones de aumento transversal que se mencionan en el capítulo 3, y sustituir el término de la distancia imagen con la expresión y el valor anterior, se obtiene el diámetro de la imagen del disco solar que se reproducirá en el sensor. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$y_i = \frac{f y_s}{s_s} = \frac{(.350m)(1.39 \times 10^9 m)}{(1.495 \times 10^{11} m)} = 3.25 mm$$

La distancia focal, de la lente de uso comercial, que se encontró en catálogo es casi igual a la distancia focal que se requiere, y a partir de estos datos se empezó a diseñar el telescopio.

En la Tabla 4.1 se muestran las características del juego de lentes encontrado.

Tabla 4.1. Datos de la lente encontrada en catálogo.

Datos de la lente		
Diámetro	63.5	mm
Distancia Focal	354.9	mm
Espesor	17.42	mm

## 4.2 Sistema de filtrado óptico

La intensidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre es siempre cambiante, esto debido a los efectos atmosféricos que varían durante todo el año. Por lo tanto no es posible determinar un sistema de filtrado fijo.

Con los experimentos realizados anteriormente podemos decir que se debería reducir el número de filtros utilizados preferentemente a sólo uno con una transmitancia del 0.01% o de 0.0001% (véase tabla 4.1) y recurrir al juego de filtros polarizadores para ajustar la transmitancia necesaria en la toma de imágenes, de esta manera también se reduce la desviación de los rayos solares incidentes a su paso por los filtros.

Tabla 4.2. Filtros de mayor densidad óptica.

	FILTROS	
Densidad Óptica	4.0	6.0
Transmitancia	0.01%	0.0001%

### 4.3 Descripción del sistema mecánico

Con base en el juego de lentes encontrado en catálogo, se continuó con el diseño del tubo óptico del telescopio. Para poder captar el mayor número de rayos solares, el diámetro del tubo deberá ser el mismo que el de los lentes, esto permite obtener en su totalidad al cono de luz incidente. Los lentes serán colocados con su respectivo soporte en un extremo del tubo, y éste podrá enroscarse tal y como en un telescopio convencional.

Ya que el Sol se encuentra a una distancia tan alejada de nuestro arreglo óptico, y como se demuestra con la ecuación de la lente delgada, la distancia imagen  $s_i = 0.355$  m resulta ser la distancia focal de los lentes que se van a utilizar, por lo tanto la imagen del Sol en el sensor no necesitara enfocarse y en consecuencia el arreglo óptico podrá mantenerse fijo.

$$s_i = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{s_o}} = \frac{1}{\frac{1}{.3549[m]} - \frac{1}{1.495 \times 10^{11}[m]}} = 0.355[m]$$

Una de las características tomadas en cuenta para el diseño del sistema óptico es que éste fuera para exteriores, por consiguiente el sensor CCD se colocará dentro del mismo tubo del telescopio. El sensor, además, estará situado a la distancia focal, esto logrado gracias a un tope dentro del tubo donde chocará el soporte del sensor, como se muestra en la Figura 4.1.

Para eliminar el excedente de luz se colocó un diafragma fijo, dentro del tubo, con un diámetro interno de 15.3 mm (ver Figura 4.1), esta dimensión es tomada con base a la diagonal del sensor. El diafragma fijo se ubica, a partir del extremo del telescopio donde será colocado el juego de lentes, a una distancia donde el diámetro de la base del cono, formado por la trayectoria de luz incidente, sea de la dimensión antes mencionada. Esta distancia es de 270 mm.

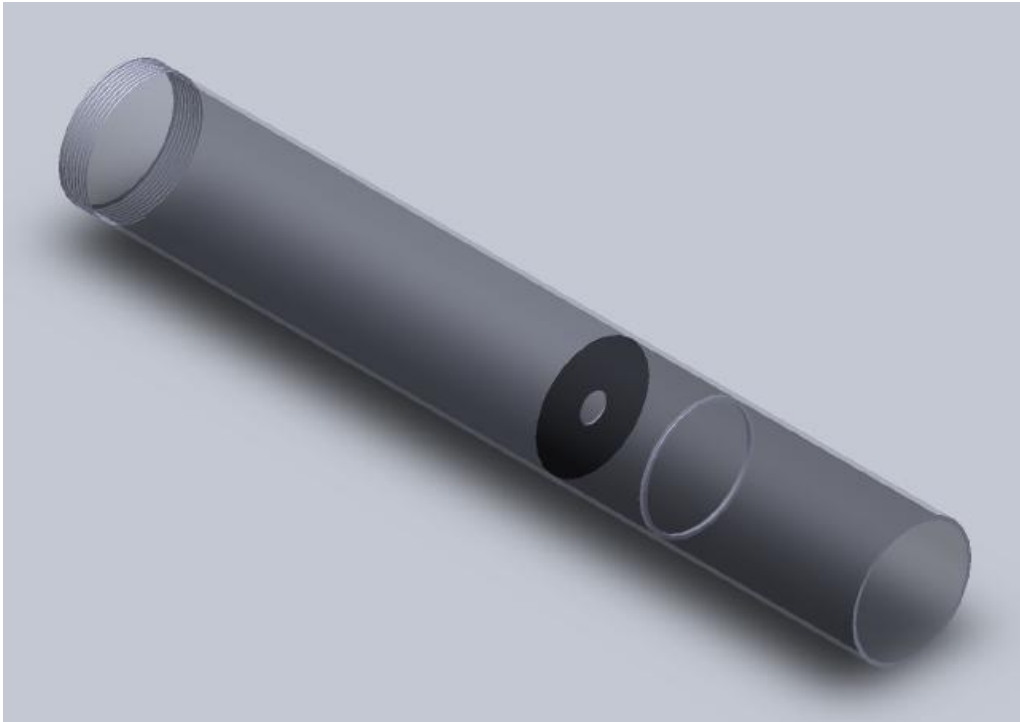


Fig. 4.1. Tubo óptico del telescopio.

Los lentes se colocarán en un extremo del tubo con su respectivo soporte el cual también ayudará de soporte a los filtros que se requieran utilizar. Como se observa en la Figura 4.2, este soporte se enroscara al tubo del telescopio (ver Figura 4.1).



Fig. 4.2. Soporte para lentes y filtros.

El soporte de los lentes tendrá una rosca para sujetarse del tubo del telescopio y otra rosca para aprisionar la pieza, diseñada y mencionada en la sección 2.5, que también soportará a los filtros que se requieran utilizar. Entre estas dos roscas estarán colocados los lentes. La pieza para aprisionar al soporte de los filtros también se basó en los diseños del telescopio convencional.

En la Figura 4.3 se muestra el soporte que se utilizará para el sensor. Como se mencionó anteriormente, esta pieza se colocará dentro del tubo del telescopio y se le enroscará el sensor, y éste se situará a la distancia correcta para obtener imágenes sin necesidad de enfocarse. Esta pieza será sujeta de igual forma que en un telescopio utilizado anteriormente.

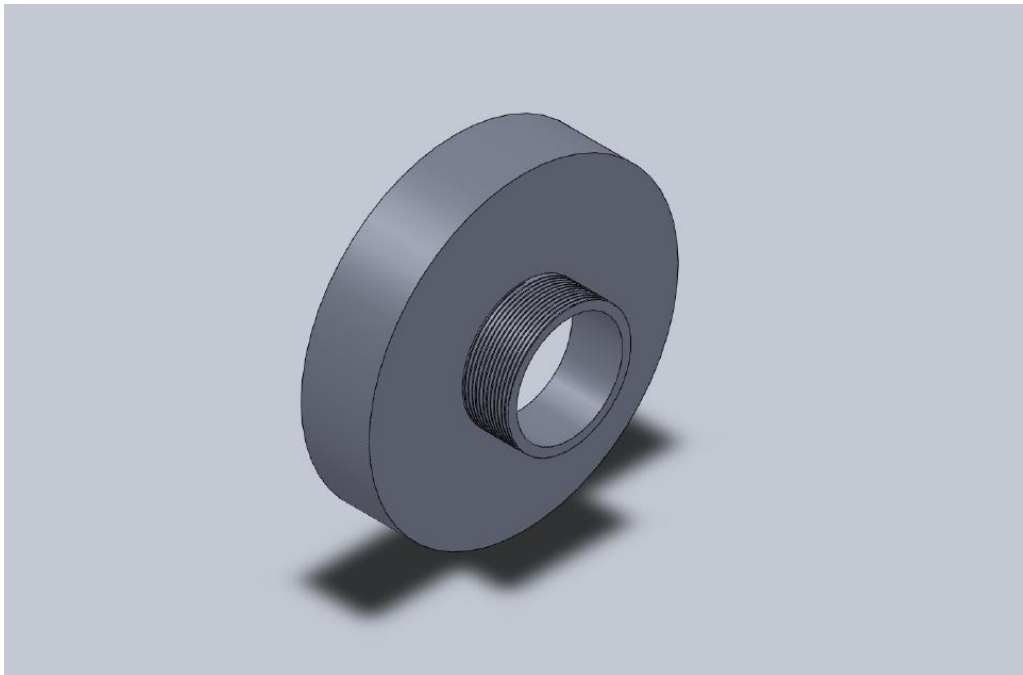


Fig. 4.3. Soporte del sensor.

El arreglo óptico final se muestra en la Figura 4.4.

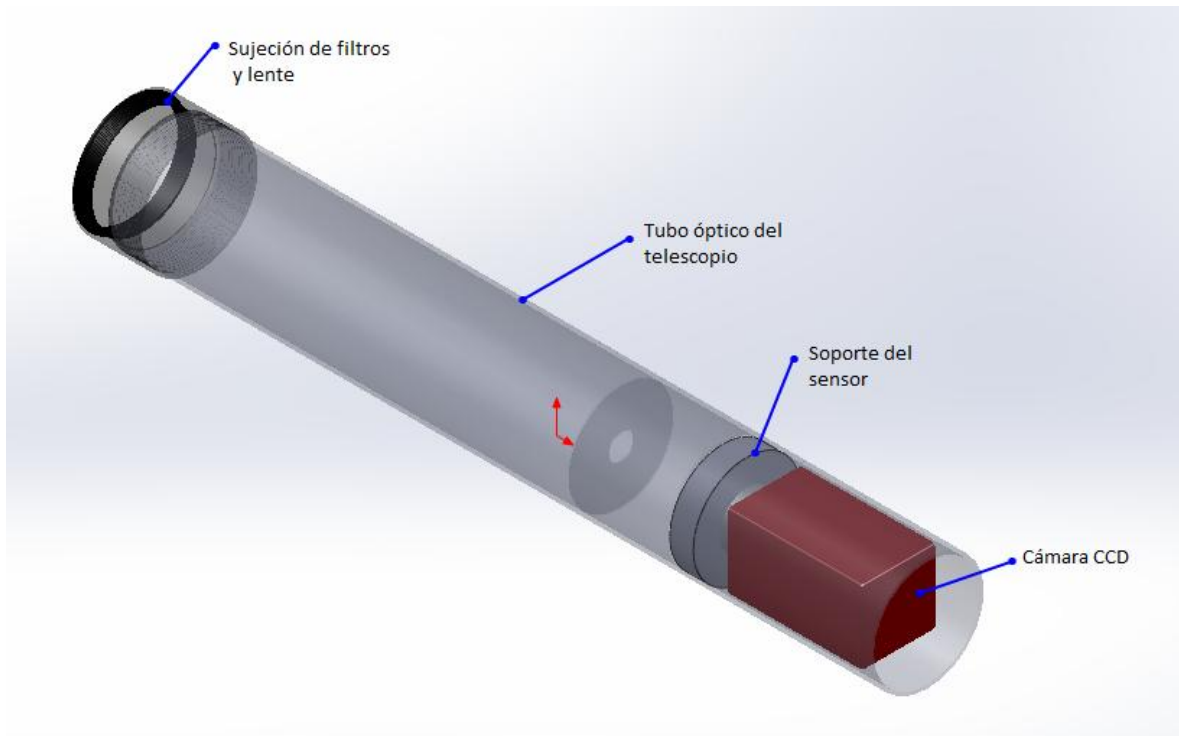


Fig. 4.4. Arreglo final del sistema óptico diseñado.

Ya que el nuevo arreglo óptico se diseñó con base en el telescopio utilizado para los experimentos, se utilizará el mismo sistema de montaje de un telescopio convencional. Además se usará la pieza diseñada para acoplar el telescopio al sistema de seguimiento solar. Con éste arreglo se alineará el diseño del sistema óptico para captar las correspondientes imágenes de la forma solar.

En el apéndice A2 se encuentran los planos detallados del arreglo óptico diseñado.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

El objetivo de este trabajo fue desarrollar el diseño de un sistema óptico con el cual se pudiera estudiar, a través de la captura de imágenes, la forma solar *sunshape*. Los resultados del análisis de las imágenes obtenidas coincidieron con los reportados por otros autores.

Para el estudio de la forma solar se desarrolló una metodología, apoyándose en el equipo con el que se contaba. Primero se hicieron pruebas con un arreglo de pirheliómetro con cámara; posteriormente se utilizó un telescopio convencional acoplado al sensor de la cámara. De esta forma se obtuvieron imágenes en blanco y negro de la forma solar *sunshape*, que posteriormente fueron analizadas.

El equipo para tomar las imágenes era una cámara CCD, y el primer problema que se resolvió fue poder ensamblar la cámara al sistema de seguimiento de un pirheliómetro, ya que de esta manera la cámara podía estar siempre apuntada en dirección del Sol. Para esto se diseñó una pieza mecánica que se sujeta del tubo del pirheliómetro y que a su vez sostiene a la cámara.

En segundo lugar se solucionó el problema de atenuar la luz solar que capta la cámara. Esto se logró a través de filtros de densidad neutra, lo que quiere decir que la luz incidente es atenuada equilibradamente, de forma que la reducción es la misma para toda la región visible (VIS).

La cámara capta imágenes en blanco y negro, por lo que el análisis se hizo con base en la escala de grises como una función de la intensidad de luz incidente. El sensor se utilizó con la resolución más alta que puede proporcionar: 16 bits, lo cual significa que cada pixel tiene un rango de información de 0 a 65536. Todas las imágenes se capturaron con la intención de dejar pasar la mayor cantidad de luz



posible sin llegar a saturar al sensor para así obtener la mayor cantidad de información para el análisis.

Se desarrolló una metodología para el estudio de las imágenes, desde su captura hasta la realización de una gráfica que representara la forma solar. Para poder utilizar la mayor resolución de 16 bits del sensor, fue preciso el uso del programa de la cámara Pike. Posteriormente, gracias a las herramientas del software Matlab, los datos de la imagen eran proporcionados en una matriz que representaba a cada una de las celdas del sensor y la información que contenían. Por último se tomó una línea de datos, de la matriz, para hacer una gráfica que representara la forma solar capturada.

Los resultados de los análisis de las imágenes hechos con el arreglo óptico de la cámara CCD acoplada al sistema de seguimiento solar, mostraron pocos datos con respecto a las capacidades del sensor CCD, debido al tamaño pequeño de la imagen. Por lo tanto se usó el sensor de la cámara CCD pero ahora acoplado a un telescopio convencional, de esta manera, al tener una imagen más grande, se aprovecha mejor la capacidad del sensor.

Para poder acoplar el arreglo óptico, que se tuvo al principio, con el telescopio convencional, fue necesario el diseño de nuevas piezas. Se necesitó de una pieza para colocar al sensor en el lugar del ocular, y otra pieza para sostener los filtros del objetivo del telescopio. Se utilizó el mismo sistema de montaje del telescopio, y se ocupó también la primera pieza diseñada para lograr sujetar el arreglo óptico al pirheliómetro.

Con el telescopio ensamblado al sensor la imagen del disco solar ocupó mucho más espacio en el sensor, de tal forma que la imagen del disco solar no cabía completa en el sensor. Por lo tanto, para el análisis se tomó en cuenta la consideración de que existe una simetría radial de la intensidad de radiación solar por lo que se seleccionaron los datos y la imagen a partir del centro del disco solar para así ocupar cada uno de los pixeles del sensor.

Se hizo una comparación de los resultados obtenidos con un algoritmo propuesto por Buie (2003). Los resultados muestran que al comparar la gráfica, de la forma solar captada por el arreglo óptico, con la curva dada por el algoritmo concuerda solo en la región del disco solar. La representación de la región circunsolar no concuerda con los datos analizados, solamente concuerda al tener un cielo con un índice de claridad bajo (nublado o contaminado). Al tener un cielo nublado, el algoritmo y los datos de la imagen coinciden de manera positiva, pero al tener un cielo despejado, sin nubes, el algoritmo de Buie, que representa la región circunsolar no empata con la gráfica obtenida en los experimentos. Esto puede ser debido a que las condiciones climáticas o la zona geográfica de Temixco sea diferente de las condiciones en las zonas de donde se recabaron los datos para el algoritmo.

Para trabajar de manera óptima el tamaño del sensor, se diseñó un sistema óptico que coincidiera con sus dimensiones. Se buscó un lente cuya distancia focal permitiera captar 20 mrad de distribución radial de la forma solar, a partir de la mitad del disco solar. Esto se considera ya que a partir de 20 mrad en adelante la región circunsolar no resulta significativa para los sistemas de alta concentración solar.

El diseño del sistema óptico se basó en el telescopio convencional utilizado en los experimentos. Con el nuevo sistema se utilizarán: la pieza para acoplar el arreglo óptico al pirheliómetro, el mismo sistema de filtros y el mismo sistema de montaje del telescopio convencional.

### **5.1 Trabajo a Futuro**

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de tesis se pueden hacer las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Construir el nuevo sistema óptico diseñado.
- Mejorar el sistema de sujeción del arreglo óptico para acoplarse al pirheliómetro.
- Reducir el número de filtros para evitar la posible desviación de los rayos solares incidentes al arreglo óptico
- Identificar las causas que originan las oscilaciones y picos de la región circunsolar (Figuras 3.13, 3.14 y 3.15).
- Continuar con esta línea de investigación y realizar experimentos con el nuevo sistema óptico. Modificar el sistema para una cámara a colores y con filtros a diferentes longitudes de onda.
- Desarrollar y proponer un modelo matemático que describa en mejor manera la forma solar que se tiene en Temixco para posteriores investigaciones.

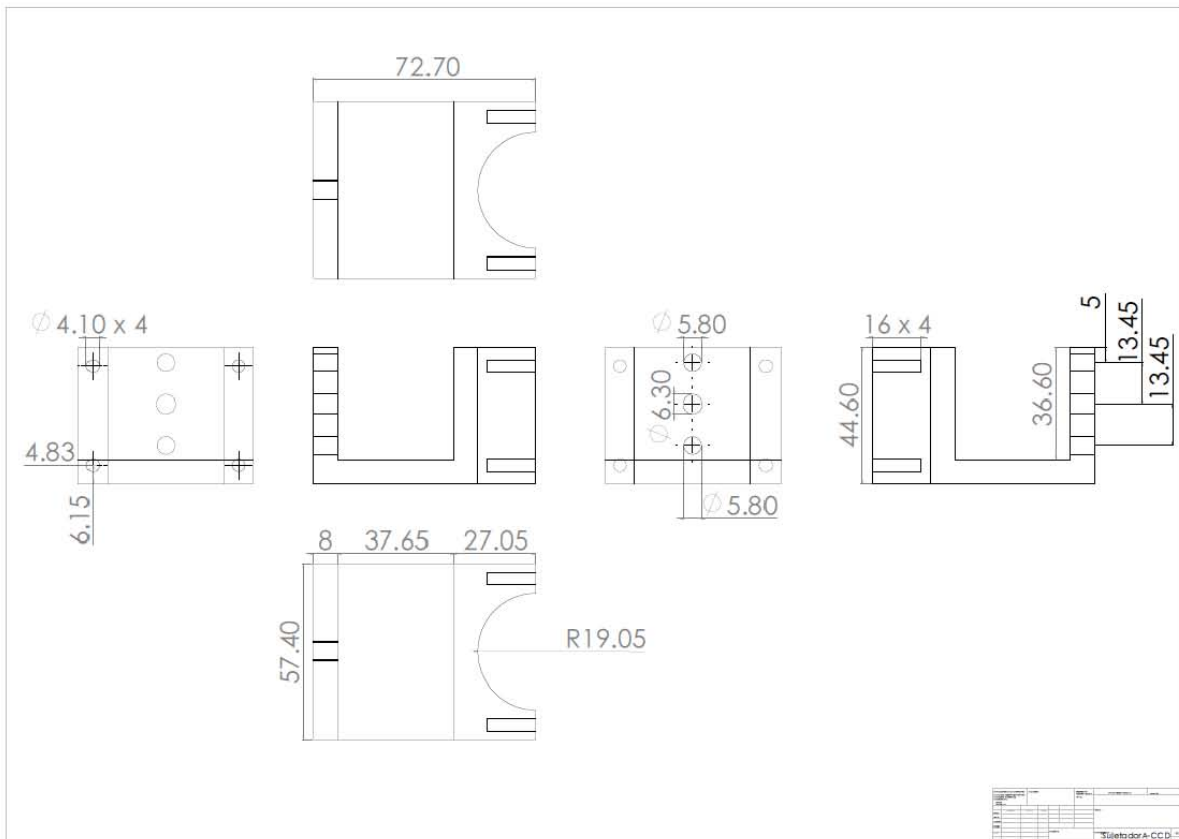
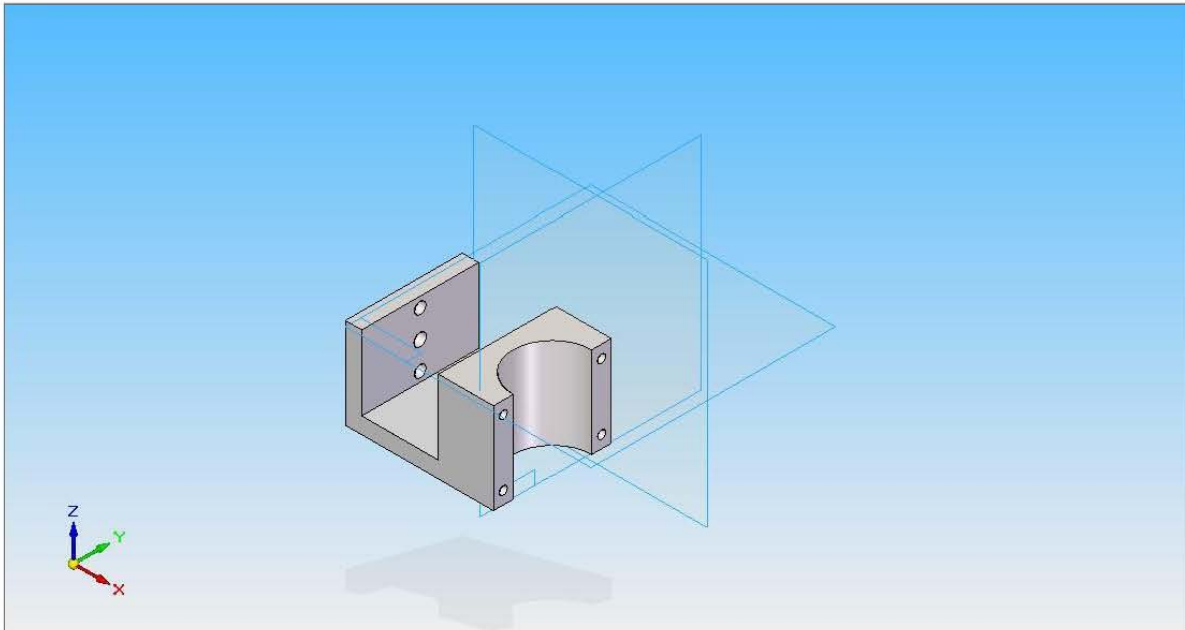
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Angström, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 50, 121-125.
2. D. Buie, A.G. Monger, C.J. Dey, 2003. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. *Solar Energy* 74, pp. 113-122.
3. D. Buie, C.J. Dey, S. Bosi, 2003. The effective size of the solar cone for solar concentrating systems. *Solar Energy* 74, pp. 417-427.
4. D. Buie, A.G. Monger. 2004. The effect of circumsolar radiation on a solar concentrating system. *Solar Energy* 76, pp. 181-185.
5. Yunus A. Çengel, 2007. *Transferencia de Calor y Masa*. Tercera edición, Ed. McGraw-Hill. México.
6. John A. Duffie, William A. Beckman, 1991. *Solar engineering of thermal processes*, 2nd. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
7. Eugene Hecht, Alfred Zajac. "Óptica".
8. Muhammad Iqbal. 1983. *An introduction to solar radiation*. Academic Press, Canada.
9. M. V. Klein and T. E. Furtak. 1986. *Optics*, John Wiley & Sons, Inc.: New York.
10. Neumann, A. Witzke., 1999. The influence of sunshape on the DLR solar furnace beam. *Solar Energy* Vol. 66, No. 6, pp. 447-457.
11. Neumann, A., Witzke, A., Jones, S. A., Schmitt, G. 2002. Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles. *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 124, pp. 198-204.
12. Carlos A. Pérez Rabago, 2003 *Diseño, construcción y puesta en operación de un calorímetro de cavidad cónica para un concentrador solar de foco puntual (DEFAC)*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Energía. UNAM, Temixco, Morelos.
13. Carlos A. Pérez Rabago, 2007 *Diseño, construcción y caracterización de un calorímetro de cavidad para la medición de flujos radiativos concentrados en sistemas de concentración solar*. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación en Energía. UNAM, Temixco, Morelos.

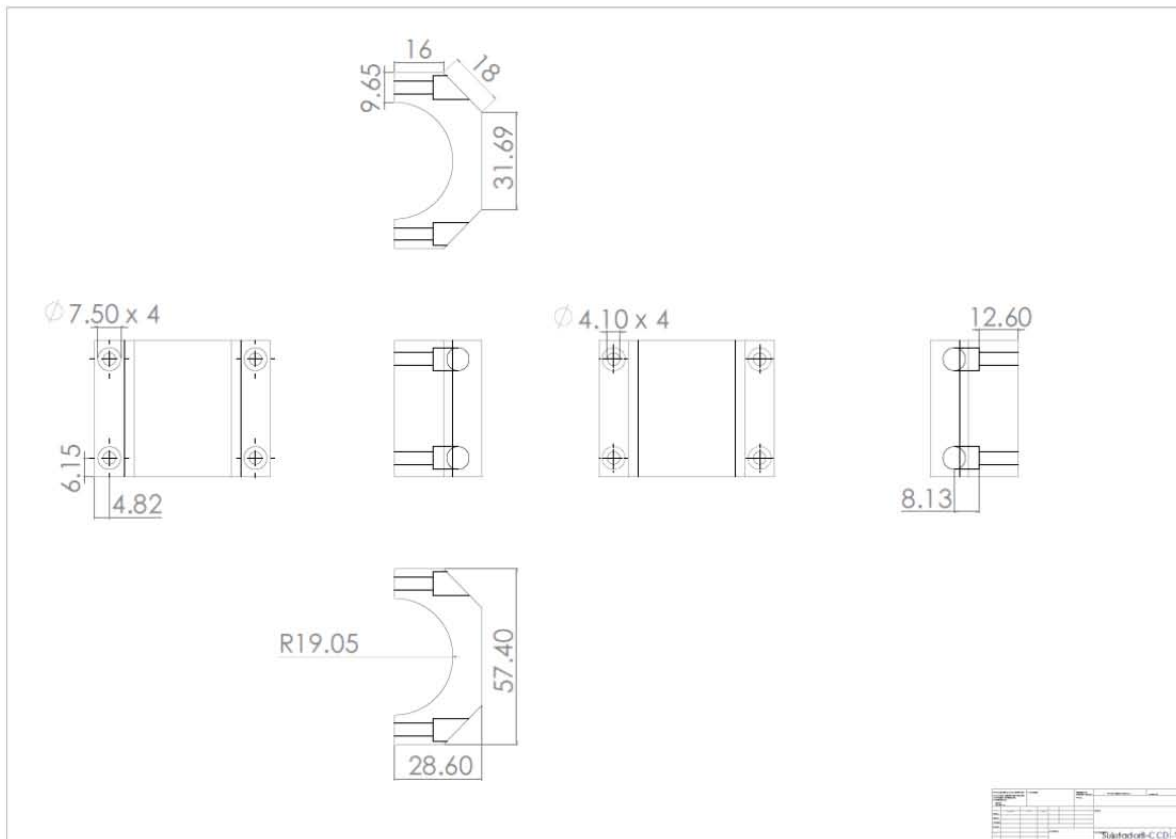
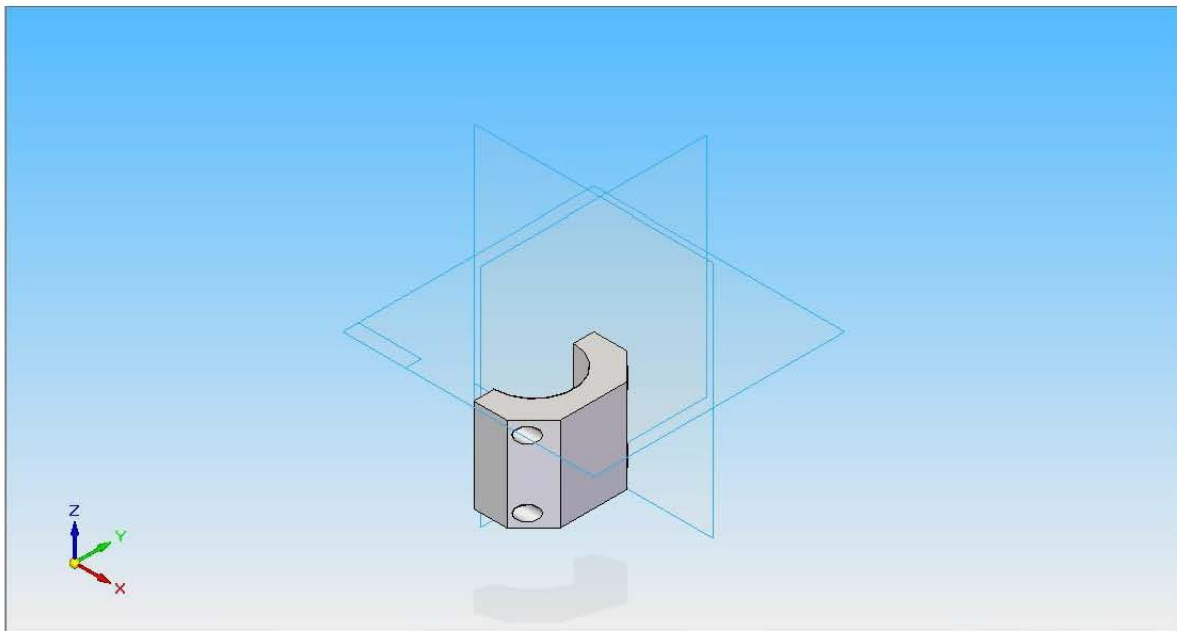
14. Ari Rabl, 1985. Active Solar Collectors and Their Applications. Oxford University Press.
15. David Riveros Rosas, 2008. Diseño óptico del horno solar de alto flujo del CIE-UNAM. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación en Energía. UNAM, Temixco, Morelos.
16. Armando Rojas Morin, 2006. Diseño mecánico de una estructura tipo ecuatorial y caracterización térmica del receptor de un concentrador solar de foco puntual con ángulo de apertura de 90°. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación en Energía. UNAM, Temixco, Morelos.
17. Akiba Segal, Michael Epstein, 2000. The optics of the solar tower reflector. Solar Energy Vol. 69(Suppl.), No. 1-6, pp. 229–241.
18. Yong Shuai, Xin-Lin Xia, He-Ping Tan, 2008. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. Solar Energy 82, pp. 13-21.
19. Daniel A. Soto Enrich, 2002. Aumento del rendimiento en un vehículo eléctrico, utilizando celdas fotovoltaicas. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. Santiago de Chile.
20. Stefan Wilbert, Robert Pitz-Paal, Joachim Jaus, 2012. Circumsolar radiation and beam irradiance measurements for focusing collectors.
21. Winter, C.J., Sizmann R.L., Vant-Hull L.L., 1991. Solar Power Plants. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
22. <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/circumsolar/index.html>

## Apéndice A1. PLANOS DE LAS PIEZAS DISEÑADAS PARA LOS EXPERIMENTOS

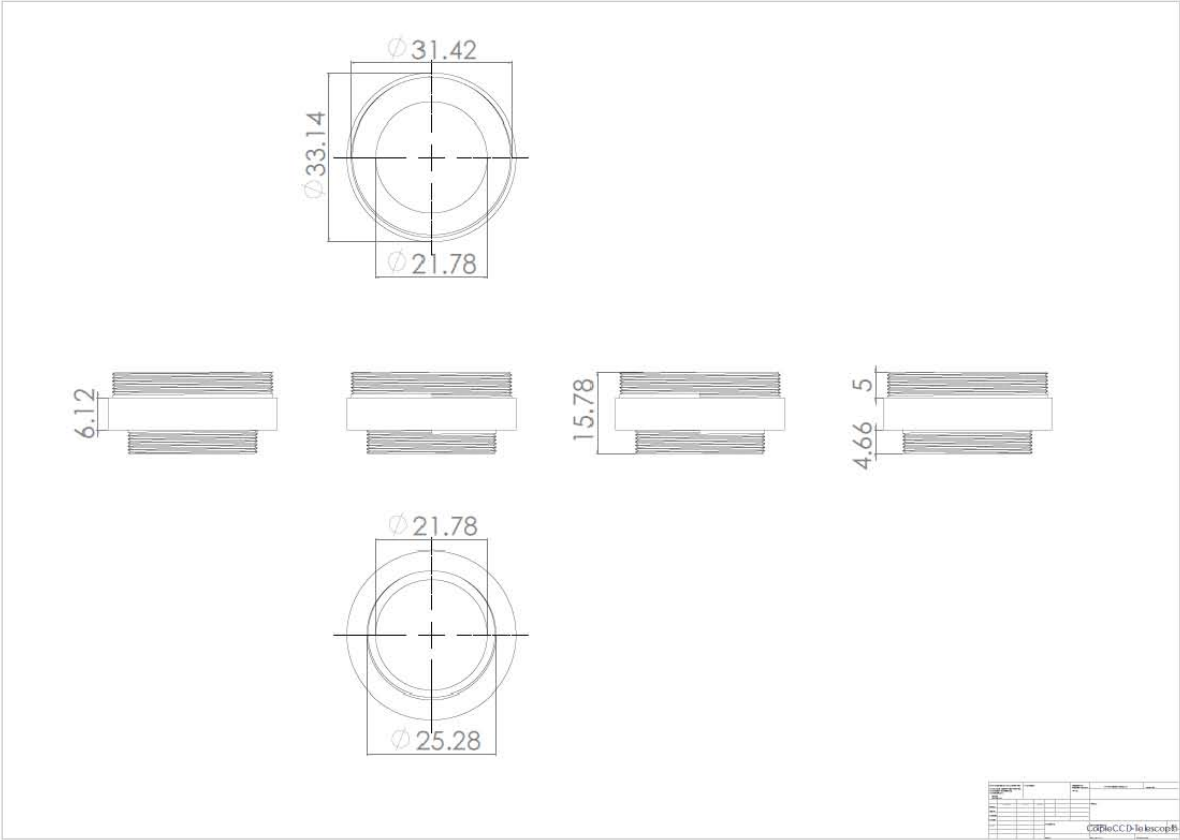
Parte A de la pieza para sostener a la cámara y al telescopio sujetándose del pirheliómetro.



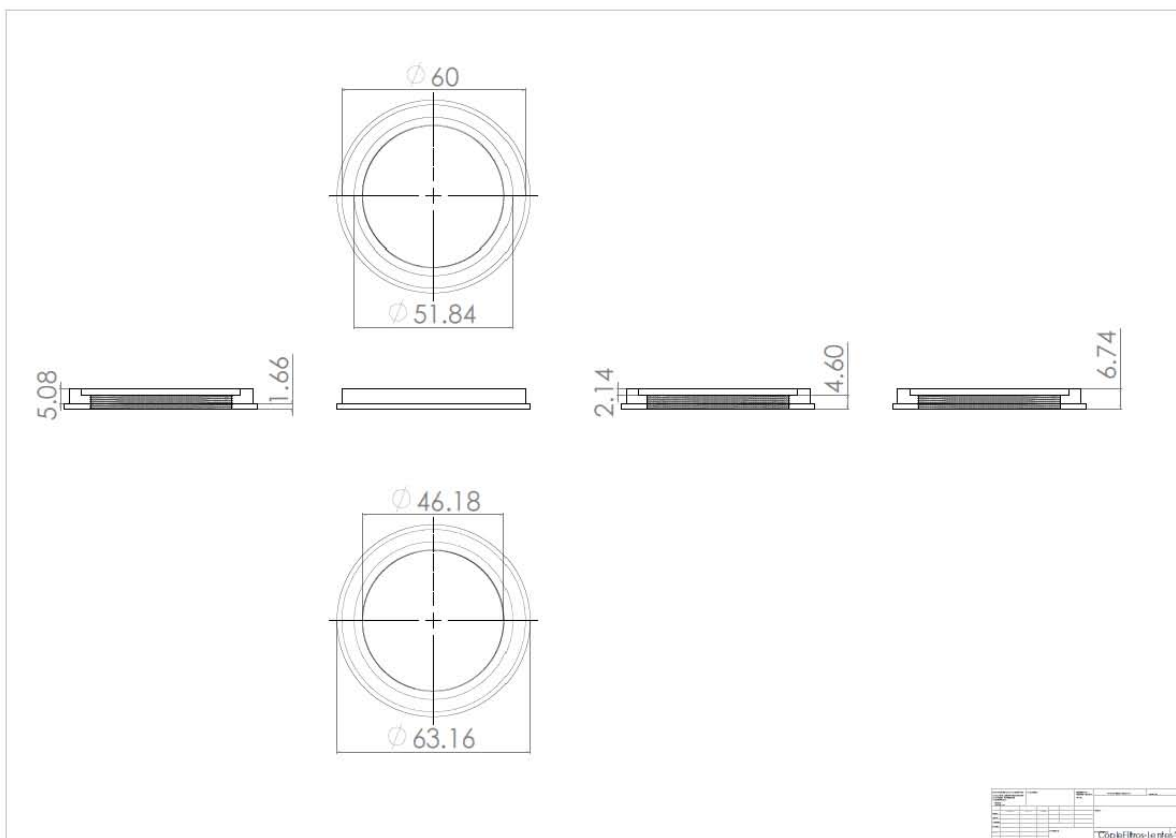
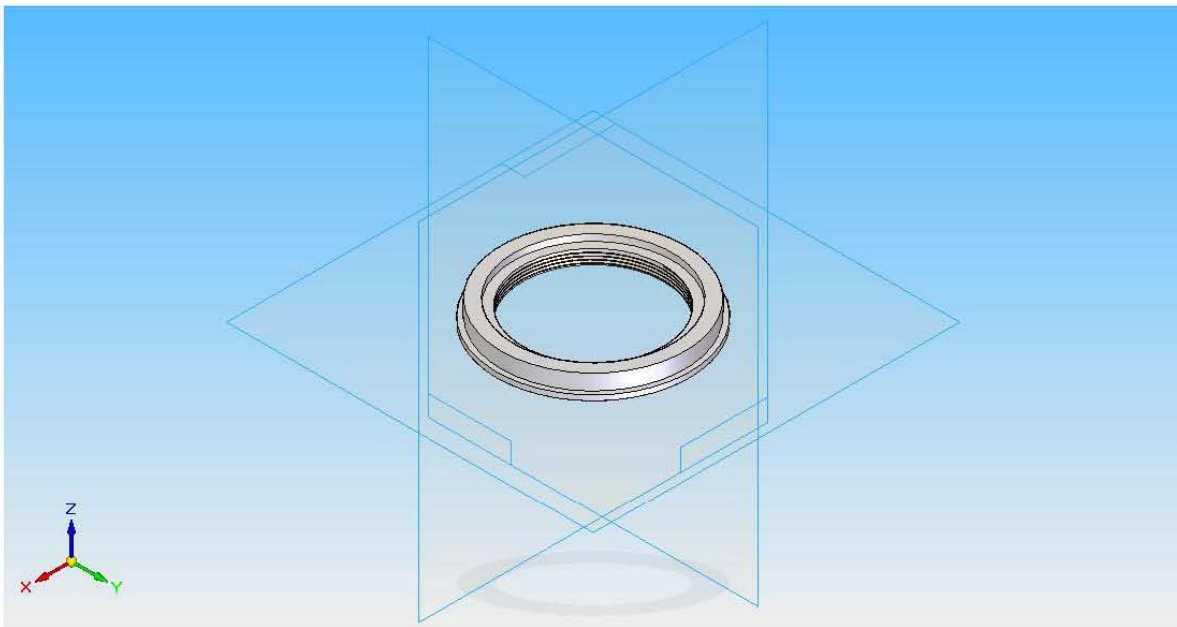
Parte B de la pieza para sostener a la cámara y al telescopio sujeta del pirheliómetro.



Pieza diseñada para acoplar el sensor CCD al telescopio convencional.



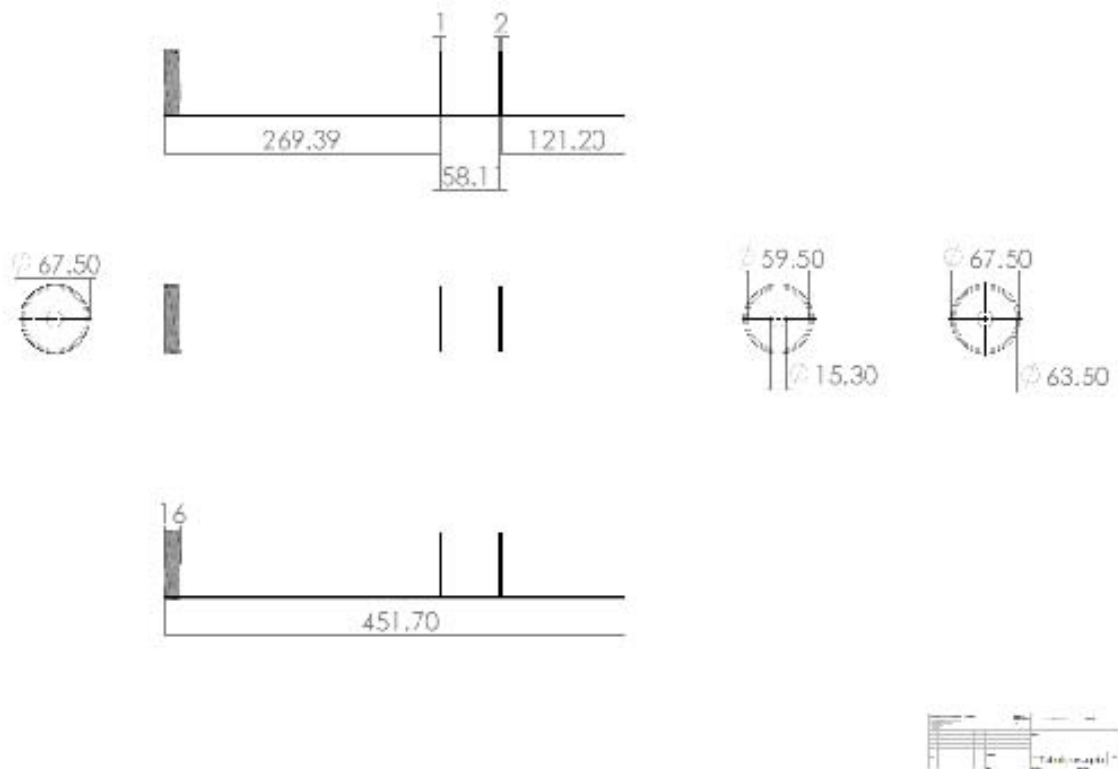
Pieza diseñada para sujetar los filtros, acoplada a soporte de los lentes del telescopio.



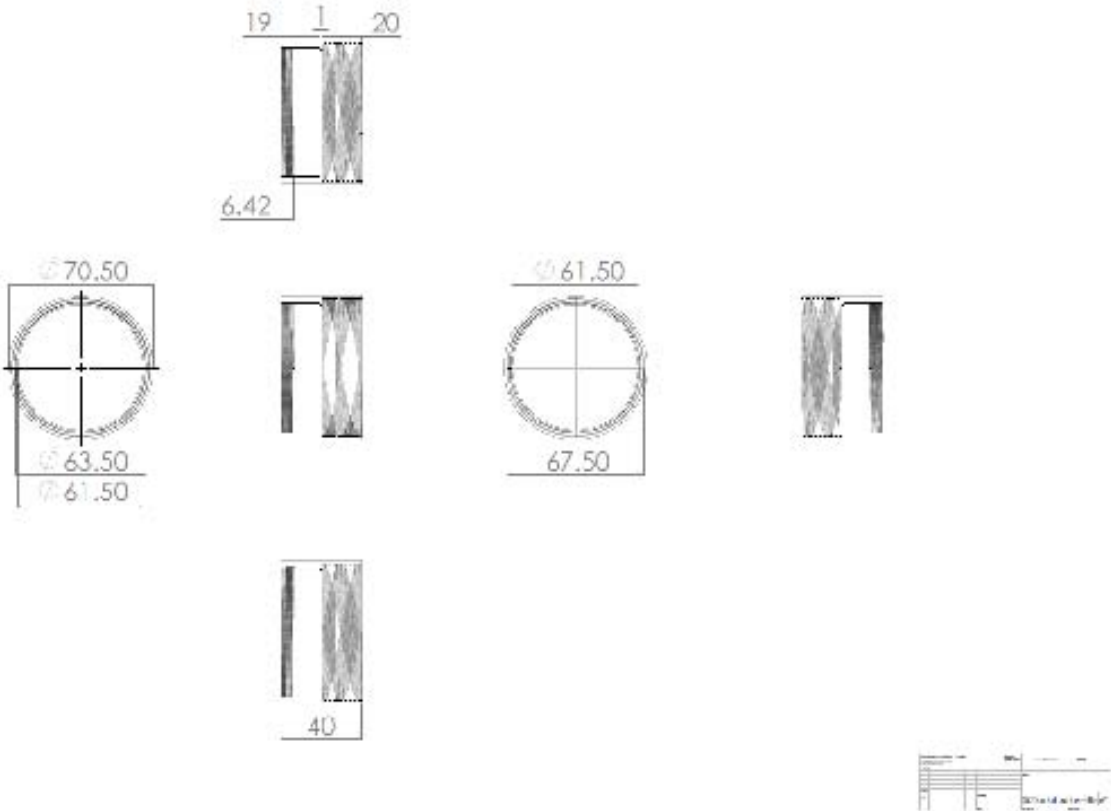


## Apéndice A2. PLANOS DEL SISTEMA ÓPTICO DISEÑADO

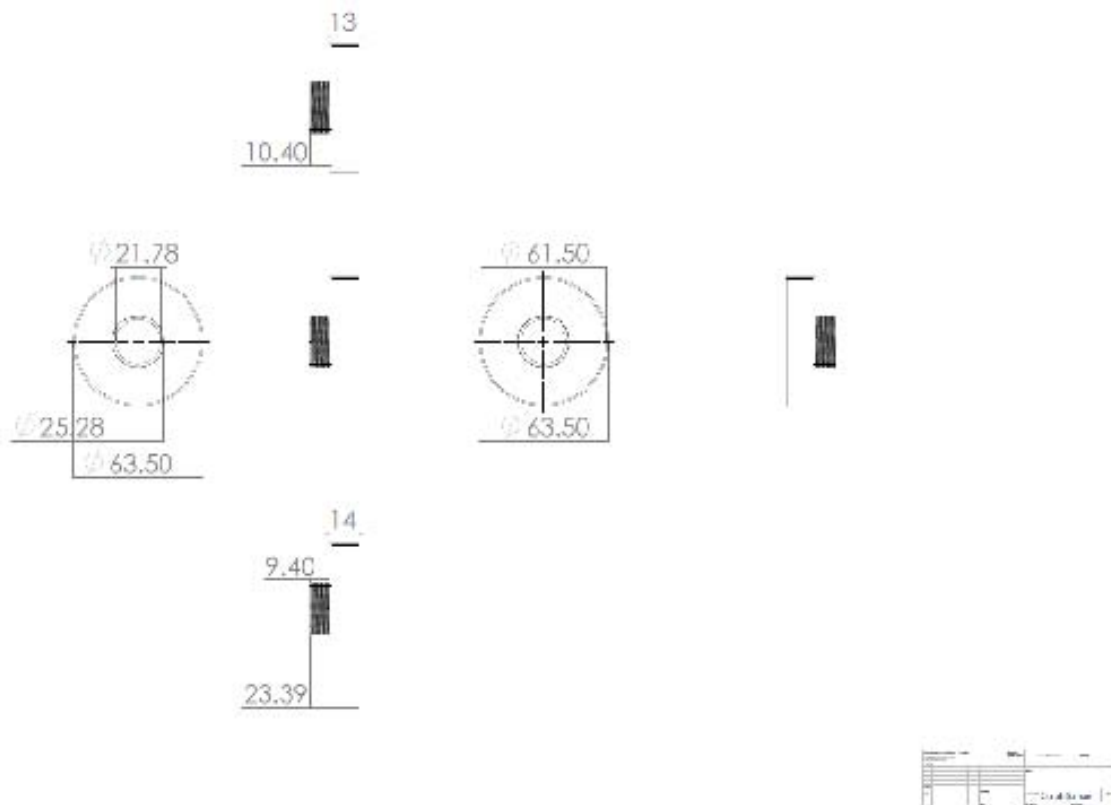
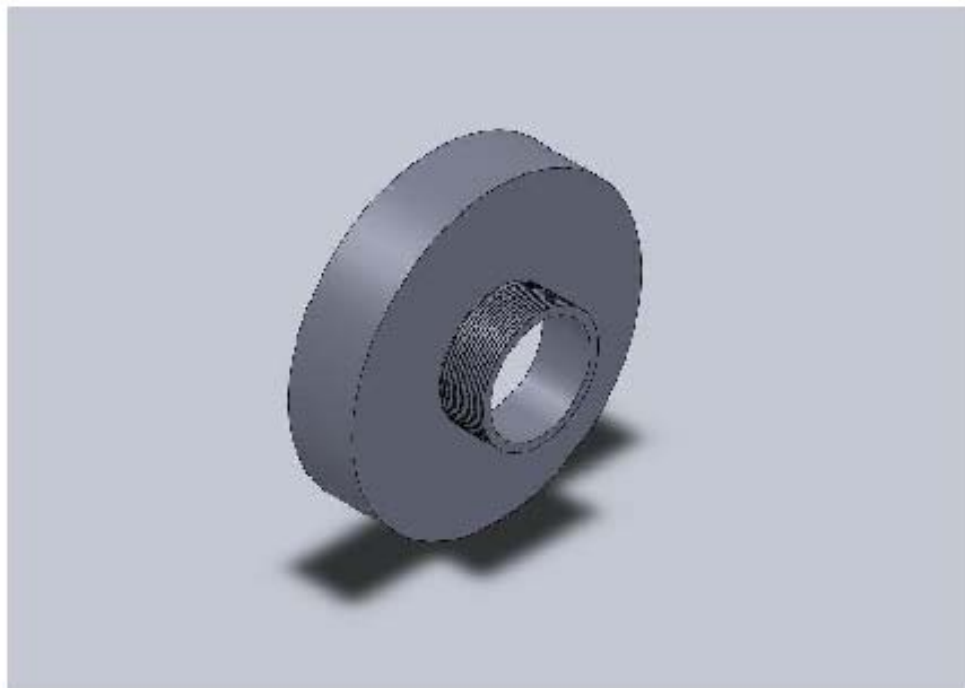
Tubo óptico del telescopio.



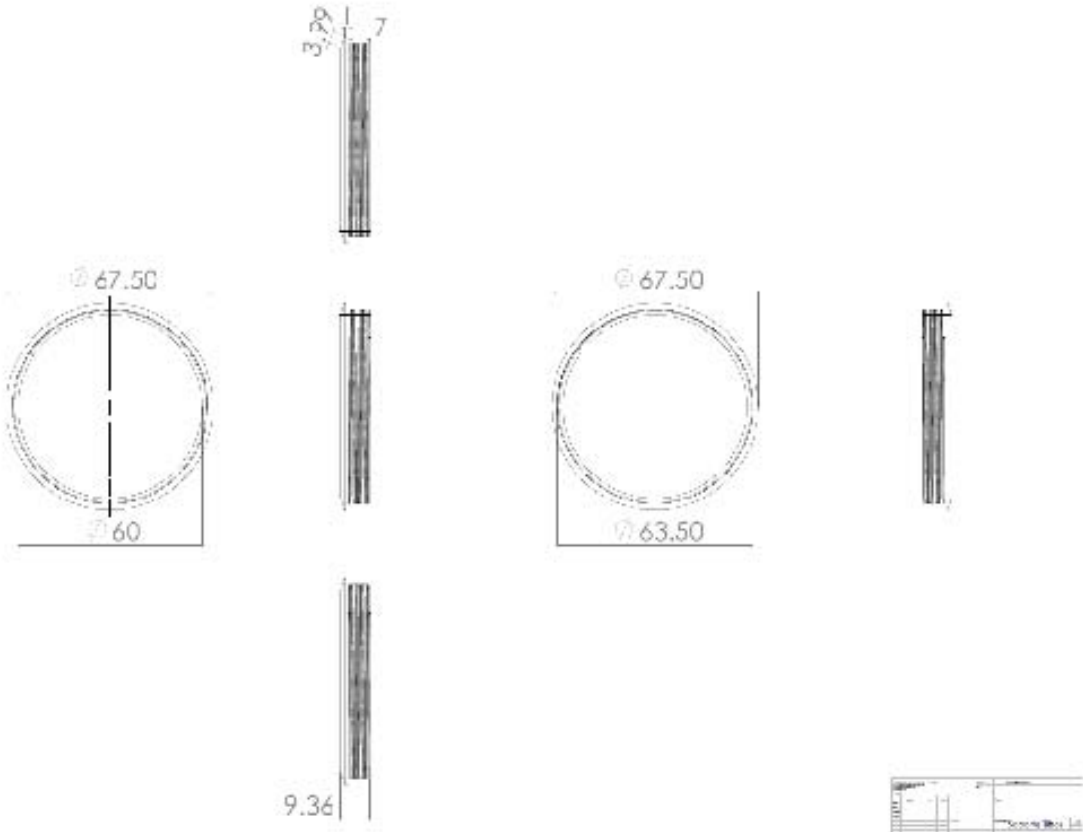
Soporte para los lentes y filtros.



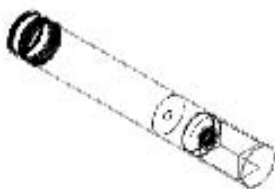
Pieza para acoplar el sensor CCD.



Pieza para aprisionar el soporte para los filtros.



Ensamble final del sistema óptico diseñado.



Item	Quantity	Description	Unit
1	1	Ensamble final del sistema óptico diseñado	

## Apéndice B1. ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA

Especificaciones de la Cámara	
Image device	Type 1 (diag. 15.3 mm) progr. scan; KODAK CCD
Effective picture elements	1928 (H) x 1084 (V)
Picture size	1920 (H) x 1080 (V) (all modes and color formats)
Cell size	7.4 $\mu\text{m}$ x 7.4 $\mu\text{m}$
Resolution depth	8 bit / 10 bit / 12 bit / 14 bit / 16 bit (High SNR mode)
Lens mount	C-Mount / M39-Moun
Digital interface	IEEE1394b, 2 x bilingual (daisy chain) ; IEEE1394b, 1 x bilingual, GOF connector (2 x optical fiber on LCLC)
Transfer rate	100 Mbit/s, 200 Mbit/s, 400 Mbit/s, 800 Mbit/s
Frame rates	Up to 31 fps (Mono8; Raw8), 21 fps (YUV 4:1:1), 16 fps (YUV 4:2:2, Raw16), 11 fps (RGB8)
Gain control	mono: Manual 0-22 dB, auto gain; color: Manual 0-20 dB, auto gain
Shutter speed	43 $\mu\text{s}$ ... ~ 67 s; auto shutter (select. AOI)
External trigger shutter	Programmable, trigger level control, single trigger, bulk trigger, programmable trigger delay
Smart features	AGC/AEC/AWB with autofunction AOI; only color: AWB/color correction/hue/saturation; real-time shading correction, LUT, 64 MB image memory, mirror, binning (only b/w), sub-sampling, High SNR, storable user sets, 2 progr. inputs, 4 progr. outputs, RS-232 port, , SIS [secure image signature], sequence mode, anti-smear mode, 4x/8x binning, 12-bit speed increase mode
Power requirements	DC 8 – 36 V via IEEE 1394 cable or 12-pin HIROSE
Power consumption	Typ. 5.5 watt (@ 12 V DC) fiber: Typ. 6.25 watt (@ 12 V DC)
Dimensions	96.8 mm x 44 mm x 44 mm (L x W x H); incl. connectors, w/o tripod and lens
Mass	250 g (without lens)
Operating temperature	+5 ... +50 °Celsius housing temperature (without condensation)
Storage temperature	-10 ... +60 °Celsius ambient temperature (without condensation)
Regulations	EN 55022, EN 61000, EN 55024, FCC Class B, DIN ISO 9022; RoHS (2002/95/EC)
Options	IR cut/pass filter (mono), protection glass (color), host adapter card, angled head, power out (HIROSE), AVT FirePackage/Direct FirePackage/Fire4Linux

## Apéndice B2.      ESPECIFICACIONES      DE      LOS      FILTROS      Y POLARIZADORES

Especificaciones Técnicas							
Filter Type:	101	102	103	106	110	113	120
Wavelength range:	visible	visible	visible	visible	visible	visible	visible
Optical density:	0.3	0.6	0.9	1.8	3	4	6
Transmission:	50%	25%	12.50%	1.60%	0.10%	0.01%	0.00%
Surface:	5/2 x 0.163	5/2 x 0.163	5/2 x 0.163	5/2 x 0.163	5/2 x 0.163	5/2 x 0.163	5/2 x 0.163
Wavefront distortion:	1 λ	1 λ	1 λ	1 λ	1 λ	1 λ	1 λ
Parallelism:	1 arc minute	1 arc minute	1 arc minute	1 arc minute	1 arc minute	1 arc minute	1 arc minute
Diameter tolerance:	+ 0 - 0.3 mm	+ 0 - 0.3 mm	+ 0 - 0.3 mm	+ 0 - 0.3 mm	+ 0 - 0.3 mm	+ 0 - 0.3 mm	+ 0 - 0.3 mm
Thickness [mm]:	2.0 ± 0.1	2.3 ± 0.1	1.65 ± 0.	1.8 ± 0.1	2.15 ± 0.1	1.7 ± 0.1	2.5 ± 0.1

Especificaciones Técnicas			
Filter Type:		AUC Circular polarizer	
Wavelength range:		380 nm – 780 nm	
Transmission:		30 % (single), 20 % (parallel pair)	
Extinction ratio (crossed pair):		4,000:1	
Surface:		5/2 x 0.16	
Wavefront distortion:		1 λ	
Parallelism:		1 arc minute	
Diameter tolerance:		+ 0 - 0.3 mm	
Thickness:		2.7 ± 0.2 mm	