

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA DETECTAR LA INCLINACIÓN DE LOS  
ESPEJOS EN UN REFLECTOR SCHEFFLER DE 8 METROS  
CUADRADOS.**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico,  
que presenta el bachiller:**

**Juan Humberto Vásquez Ortiz**

**ASESOR: Miguel Ángel Cataño Sánchez**

**Lima, diciembre del 2015**



© 2015, Juan Humberto Vásquez Ortiz

Se autoriza la reproducción total o parcial,  
Con fines académicos a través de cualquier  
Medio o procedimiento, incluyendo la cita  
Bibliográfica del documento.

## RESUMEN

El uso de recursos renovables como fuente de generación de energía es un tema estudiado por el Grupo de Apoyo al Sector Rural PUCP, grupo al que va dirigido el presente proyecto. Este tipo de energía también es conocida como energía limpia ya que para su utilización no se produce emisión de gases contaminantes. Dentro de este tipo de energía, específicamente dentro de la energía solar térmica, se encuentra el reflector solar parabólico Scheffler, que aprovecha y concentra el calor que provee el Sol. Este tipo de reflector solar es utilizado en la cocina de alimentos en general y su uso en el Perú tiene un gran potencial debido a la intensa radiación presente en gran parte del país.

El reflector solar parabólico Scheffler, al estar formado por un arreglo de espejos en toda su superficie, ve mermada su eficiencia debido a errores de inclinación al ensamblar dichos espejos. El objetivo del presente trabajo es desarrollar el diseño de un sistema que permita la detección de la inclinación los espejos que componen un reflector solar parabólico Scheffler de 8 m<sup>2</sup> de área. Este sistema determina el error en la inclinación tanto en el eje horizontal como en el eje vertical de cada espejo, mediante técnicas de visión por computadora y de barrido láser.

El documento se divide en 4 capítulos. El primero de ellos describe la problemática que será solucionada. En el segundo capítulo se presentan los requerimientos del sistema y se plantean los conceptos de solución. A continuación, y sobre la base del concepto óptimo de solución escogido, en el capítulo 3 se describe el desarrollo del sistema de detección de la inclinación de los espejos, así como sus componentes mecánicos, electrónicos y de control. En el cuarto capítulo se detalla el presupuesto requerido para implementar el sistema y, finalmente, se presentan las conclusiones que se obtienen del desarrollo del presente trabajo.

FACULTAD DE  
 CIENCIAS E  
 INGENIERÍA

 PONTIFICIA  
 UNIVERSIDAD  
 CATÓLICA  
 DEL PERÚ

**TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR  
 EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**



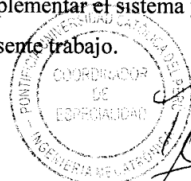
Título : Diseño de un sistema para detectar la inclinación de los espejos en un reflector Scheffler de 8 m<sup>2</sup>.  
 Asesor : Miguel Ángel Cataño Sánchez  
 Alumno : Juan Humberto Vásquez Ortiz  
 Código : 20101059  
 Tema N° : # 122  
 Fecha : 17-11-2015


**Descripción y Objetivos**

El uso de recursos renovables, como fuente de generación de energía, es un tema estudiado por el Grupo de Apoyo al Sector Rural PUCP. Este tipo de energía también es conocida como energía limpia, ya que para su utilización no se produce emisión de gases contaminantes. Dentro de este tipo de energía, específicamente dentro de la energía solar térmica, se encuentra el reflector solar parabólico Scheffler, que aprovecha y concentra el calor que provee el Sol. Este tipo de reflector solar es utilizado en la cocina de alimentos y su uso en el Perú tiene un gran potencial debido a la intensa radiación presente en gran parte del país.

El reflector solar parabólico Scheffler, al estar formado por un arreglo de espejos en toda su superficie, ve mermada su eficiencia debido a errores de inclinación al ensamblar dichos espejos. El objetivo del presente trabajo es desarrollar el diseño de un sistema que permita la detección de la inclinación de los espejos que componen un reflector solar parabólico Scheffler de 8 m<sup>2</sup> de área. Este sistema determina el error en la inclinación tanto en el eje horizontal como en el eje vertical de cada espejo, mediante técnicas de visión por computadora y de barrido láser.

El documento se divide en 4 capítulos. El primero de ellos describe la problemática que será solucionada. En el segundo capítulo se presentan los requerimientos del sistema y se plantean los conceptos de solución. A continuación, y sobre la base del concepto óptimo de solución escogido, en el capítulo 3 se describe el desarrollo del sistema de detección de la inclinación de los espejos, así como sus componentes mecánicos, electrónicos y de control. En el cuarto capítulo se detalla el presupuesto requerido para implementar el sistema y, finalmente, se presentan las conclusiones que se obtienen del desarrollo del presente trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	i
APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS .....	ii
ÍNDICE DE TABLAS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Presentación de la problemática.....	1
1.2 Descripción del problema .....	2
1.3 Objetivos del proyecto .....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
1.4 Limitaciones del proyecto.....	3
1.5 Resumen del informe .....	4
II. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA Y CONCEPTO DE SOLUCIÓN ....	5
2.1 Estado del arte.....	5
2.2 Definición de requerimientos.....	9
2.2.1 Requerimientos mecánicos .....	9
2.2.2 Requerimientos eléctrico-electrónicos.....	10
2.2.3 Requerimientos del sistema de control .....	10
2.2.4 Requerimientos de seguridad.....	10
2.3 Estructura de funciones.....	11
2.4 Conceptos de solución del sistema .....	14
2.5 Descripción del concepto óptimo de solución .....	17
III. SISTEMA MECATRÓNICO .....	20
3.1 Funcionamiento del sistema mecatrónico.....	20
3.2 Diseño electrónico y de control .....	22
3.2.1 Diagrama de bloques del sistema .....	22
3.2.2 Componentes electrónicos .....	24
3.2.3 Diagramas esquemáticos .....	30
3.2.4 Diagramas de flujo del sistema.....	32
3.2.5 Sistema de detección de inclinación .....	36

3.2.6 Técnicas de visión por computadora .....	37
3.3 Diseño mecánico .....	39
3.3.1 Planos de ensamble.....	39
3.3.2 Planos de despiece .....	43
3.3.3 Simulaciones del Soporte .....	44
IV. COSTOS .....	46
CONCLUSIONES .....	47
RECOMENDACIONES .....	48
BIBLIOGRAFIA .....	49



## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1: Especificaciones de cámara .....	24
Tabla 3.2: Especificaciones de la óptica .....	25
Tabla 3.3: Especificaciones de microcontrolador .....	26
Tabla 3.4: Especificaciones de Bluetooth .....	27
Tabla 3.5: Especificaciones de Láser Escáner .....	28
Tabla 3.6: Especificaciones de DAC8581 .....	29
Tabla 3.7: Especificaciones de Módulo Láser .....	30
Tabla 3.8: Lista de Partes de Soporte para Reflector .....	42
Tabla 4.1: Presupuesto de componentes mecánicos .....	46
Tabla 4.2: Presupuesto de componentes electrónicos .....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Energía solar incidente en el Perú .....	2
Figura 2.1: Reflector Scheffler.....	5
Figura 2.2: Mecanismo de giro de un Scheffler .....	6
Figura 2.3: Cocina Solar .....	7
Figura 2.4: Diagrama VSHOT .....	8
Figura 2.5: Diagrama TOP.....	9
Figura 2.6: Estructura de Funciones.....	13
Figura 2.7: Conceptos de solución .....	16
Figura 2.8: Diseño óptimo de solución - Vista frontal.....	18
Figura 2.9: Diseño óptimo de solución - Direccionamiento de láser .....	18
Figura 2.10: Interfaz de usuario .....	19
Figura 3.1: Funcionamiento del sistema mecatrónico.....	20
Figura 3.2: Direccionamiento del Láser.....	21
Figura 3.3: Direccionamiento del Láser a espejos .....	22
Figura 3.4: Diagrama de Bloques .....	23
Figura 3.5: Cámara.....	24
Figura 3.6: Óptica.....	25
Figura 3.7: Microcontrolador .....	26
Figura 3.8: Módulo Bluetooth.....	27
Figura 3.9:Láser Escáner.....	28
Figura 3.10:Convertidor Digital Analógico .....	29



Figura 3.11: Módulo Láser.....	29
Figura 3.12: Circuito de comunicación.....	30
Figura 3.13: Circuito de generación de señal para movimiento.....	31
Figura 3.14: Diagrama de Flujo de programa principal.....	33
Figura 3.15: Diagrama de Flujo de Subprograma para Detección de inclinación .....	34
Figura 3.16: Diagrama de Flujo de Mover láser y Capturar imagen .....	35
Figura 3.17: Resultado de aplicación de detección de bordes .....	37
Figura 3.18: Resultado de aplicación de detección de formas cuadradas .....	38
Figura 3.19: Resultado de aplicación de detección de reflejo de láser .....	39
Figura 3.20: Vista de elevación del ensamble.....	40
Figura 3.21: Vista de Planta de ensamble .....	40
Figura 3.22: Vista de elevación de Soporte para Reflector.....	41
Figura 3.23: Vista lateral de Soporte para Reflector.....	41
Figura 3.24: Vista de elevación de Soporte para Láser.....	43
Figura 3.25: Fragmento de Planos de Cartelas y Plancha Base .....	43
Figura 3.26: Análisis de Esfuerzos a estructura de cámara.....	44
Figura 3.27: Simulación de esfuerzo en apoyo crítico .....	45
Figura 3.28: Simulación de estructura completa.....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F$	: Fuerza en la armadura	[N]
$F_n$	: Fuerza normal a la superficie	[N]
$T$	: Intervalo de muestreo	[s]
$\alpha$	: Ángulo de salida horizontal del láser	[°]
$\beta$	: Ángulo de salida vertical del láser	[°]
$L$	: Longitud de línea	[m]
$\Theta$	: Ángulo de inclinación de cámara	[°]
$\Phi$	: Ángulo de enfoque de la cámara	[°]
$f$	: Distancia focal de la óptica	[°]



## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía solar térmica mediante el concentrador solar Scheffler para cocinas solares representa una gran ayuda ya que requiere, como único combustible para funcionar, al Sol, que se presenta como un recurso inagotable. Por este motivo y debido a que en gran parte del territorio nacional se presenta un alto índice de radiación solar [2], la investigación e implementación de proyectos en el área rural han aumentado en los últimos años [12]. En el presente capítulo se describe la problemática asociada al tema antes mencionado, así como el problema técnico que se busca resolver, se definen los objetivos del proyecto, las limitaciones del mismo y, finalmente, se resumen las secciones del presente documento.

### 1.1 Presentación de la problemática

La energía solar es una fuente de energía de bajo costo ampliamente estudiada en la actualidad. Entre la población rural en el Perú, más del 60% cocina con leña como fuente principal de energía [1] y a pesar de que esta cifra ha ido bajando con el pasar de los años, es el gas la fuente energética que la está reemplazando. Esto puede ser reemplazado mediante la implementación de energía solar que sea capaz de producir las temperaturas adecuadas para la cocción.

En el territorio peruano existen zonas que tienen un alto índice de incidencia de radiación anual. Cuantitativamente, es la costa sur del Perú en donde se dispone de mayor energía solar, con un promedio anual de 6,0 a 6,5 kW h/m<sup>2</sup>; mientras que en la costa norte y en gran parte de la sierra, sobre los 2 500 msnm, se dispone de 5,5 a 6,0 kW h/m<sup>2</sup> [2].

La energía solar puede contribuir con las personas dando un valor agregado a sus productos con un bajo precio de inversión y mantenimiento. A pesar de esto, la energía presente en las ciudades peruanas no se aprovecha adecuadamente. Para este trabajo, el reflector Scheffler será utilizado como instrumento de concentración de energía solar térmica en un determinado punto para su posterior aprovechamiento.

Sin embargo, como se muestra en la Figura 1.1, una inadecuada alineación de los espejos que componen al reflector Scheffler puede ocasionar la desviación de los rayos solares y, con esto, una disminución de la eficiencia del concentrador. En este sentido, la forma geométrica del receptor solar representa un factor crítico en la recolección de energía solar. Además, tanto el costo como la cantidad de energía recolectada se ven afectados directamente por la precisión de montaje del mencionado reflector.



Figura 1.1: Reflector solar Scheffler para una cocina comunitaria. Fuente: Terra.org

## 1.2 Descripción del problema

Ante la problemática mencionada en el punto 1.1, surge la necesidad de diseñar un sistema mecatrónico que sirva como asistencia al fabricante de reflectores solares del tipo Scheffler. Este sistema asistirá en el alineamiento de los espejos tanto en el eje vertical del reflector, como en el eje horizontal del mismo. De esa manera es posible

incrementar la eficiencia del reflector y aprovechar de una mejor manera la energía solar mediante mayores temperaturas y menores tiempos de cocción.

### 1.3 Objetivos del proyecto

#### 1.3.1 Objetivo general

El objetivo general es diseñar un sistema para la detección de la inclinación de los espejos que componen un reflector solar Scheffler de 8 m<sup>2</sup> de área.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- a. Recolectar información correspondiente al estado del arte que permita la determinación de los alcances del proyecto, así como las restricciones que se presentan en el diseño del mismo.
- b. Plantear requerimientos para el sistema considerando tanto las restricciones de diseño del mismo, así como aspectos electrónicos, mecánicos, de transmisión de datos, entre otros.
- c. Evaluar posibles conceptos de solución a fin de encontrar el concepto de solución óptimo del sistema.
- d. Determinar un presupuesto total del sistema, considerando el precio de los componentes utilizados, e incluyendo un aproximado del costo de fabricación de los elementos que así lo requieran.

### 1.4 Limitaciones del proyecto

A partir de la descripción del objetivo general, el diseño del sistema se centra únicamente en reflectores solares de 8 m<sup>2</sup> de área. Esto debido a que el presente diseño se centra en una necesidad del Grupo de Apoyo al Sector Rural PUCP, en donde un reflector del área mencionada se encuentra en construcción. Un reflector con un área diferente implica variaciones en el diseño debido a que los diseños de reflectores de diferentes tamaños no son proporcionales entre sí ni siguen una norma estándar.

Por otro lado, una segunda limitante del proyecto es que, para su correcta utilización, requiere de un ambiente alto (aproximadamente 3.5 m) y con buena iluminación. Estos

parámetros son fijos ya que corresponden tanto a la geometría propia del reflector Scheffler, como a requisitos para obtener capturas útiles desde la cámara.

## 1.5 Resumen del informe

El presente informe se encuentra dividido en 4 capítulos: introducción, requerimientos del sistema y concepto de solución, sistema mecatrónico y costos.

En el segundo capítulo se presenta el estado del arte, parte muy importante en el diseño en ingeniería ya que permite establecer una base teórica de la tecnología existente, así como explicar la importancia y aportaciones del diseño aquí presentado. Seguidamente se definen los diferentes requerimientos que este diseño debe cumplir para poder llegar a los objetivos trazados. Con esta información, a continuación, se describe la estructura de funciones del sistema, así como los conceptos de solución del mismo y la descripción del concepto óptimo de solución que se desarrollará.

En el tercer capítulo se describe el aspecto técnico del sistema a desarrollar. En primer lugar, se presenta una descripción del funcionamiento del sistema mecatrónico y cómo se realiza la interacción con el usuario. A continuación se detalla tanto el diseño electrónico, como el mecánico. Esto a través de diagramas de bloques del sistema, diagramas esquemáticos, diagramas de flujo, planos de fabricación y, finalmente, simulaciones del sistema.

El cuarto capítulo presenta un presupuesto para la fabricación e integración del sistema y, finalmente, se encuentran las conclusiones que se obtienen luego de desarrollar el presente trabajo.

## CAPÍTULO 2

### REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA Y CONCEPTO DE SOLUCIÓN

Si bien existe numerosa información acerca de tipos de metodología para poder llevar a cabo un aceptable diseño en ingeniería, lo que todas tienen en común es en que se requiere como paso previo al diseño, una base teórica tanto del tema en sí, como de la tecnología que existe para solucionar un determinado problema. En el presente capítulo se presenta una descripción de la tecnología e investigaciones ya existentes acerca del tema tratado, así como los requerimientos del sistema que contribuirán con el desarrollo del trabajo. Con este contexto de diseño, se presentan diferentes conceptos de solución y la elección de un concepto de solución óptimo.

#### 2.1. Estado del arte

##### El reflector Scheffler

Un reflector Scheffler representa un método de aprovechamiento de la energía solar. Este permite dirigir, mediante un arreglo parabólico de espejos, los rayos del sol a un determinado punto fijo o área en el espacio de tal manera que se incremente la temperatura en dicho punto o área. Un reflector Scheffler parabólico puede proveer, dependiendo del tamaño y la eficiencia del mismo, de calor hasta unos  $700^{\circ}$  u  $800^{\circ}$  de temperatura.

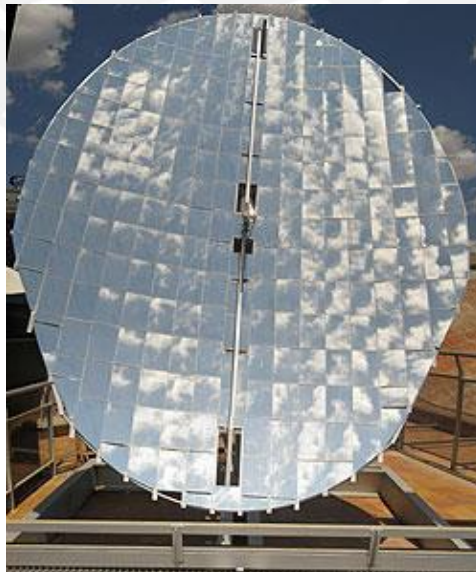


Figura 2.1. Reflector Scheffler. Fuente: [www.fundaciontierra.es](http://www.fundaciontierra.es)

El reflector Scheffler pertenece al tipo de plato parabólico entre los tipos de concentradores solares. El cálculo de su geometría es siempre variable ya que depende directamente del ambiente en donde se va a instalar y de la distancia que se requiere tener entre el punto de concentración de energía o foco y el reflector [3]. Los reflectores Scheffler se fabrican con diversos tamaños y, a pesar de que no existen tamaños estandarizados por alguna norma internacional, normalmente se fabrican con áreas de 2.4, 2.7, 8, 10 o 16 m<sup>2</sup>. Un reflector solar Scheffler cuenta con un mecanismo de seguimiento solar que le permite girar en el eje vertical y también cambiar su inclinación de acuerdo con las variaciones de la posición del Sol a lo largo de un año. Usualmente estas variaciones se realizan de manera manual pero en la actualidad ya existen proyectos para automatizar estas acciones [4].

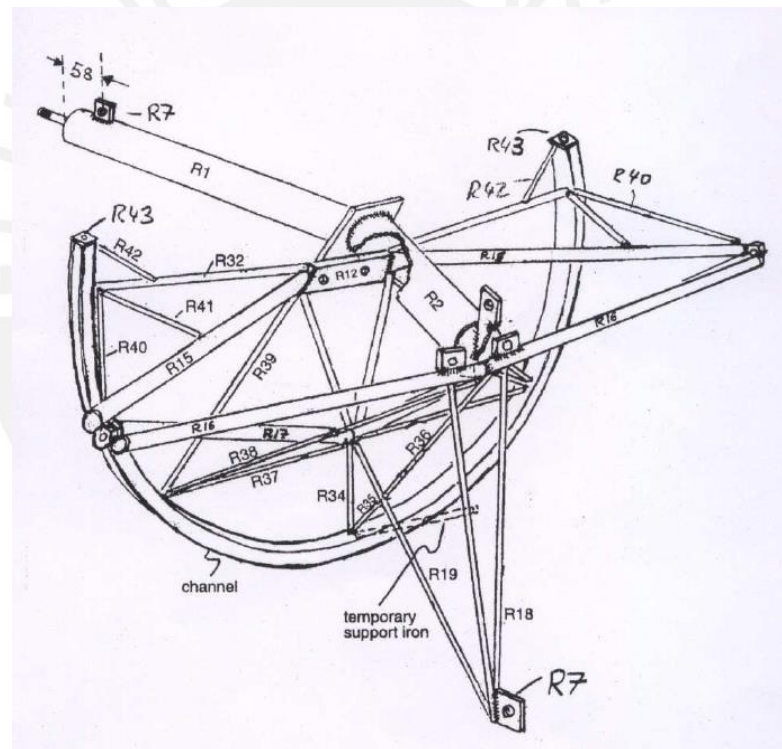


Figura 2.2. Mecanismo de giro de Scheffler. Fuente:[3]

Mediante el direccionamiento apropiado de los rayos del sol se puede concentrar el calor en un espacio debidamente acondicionado. Esto es aprovechado en aplicaciones tales como el calentamiento y/o cocción de alimentos humanos. Esto incluye el tostado de granos de café, el calentamiento de agua, entre otras.



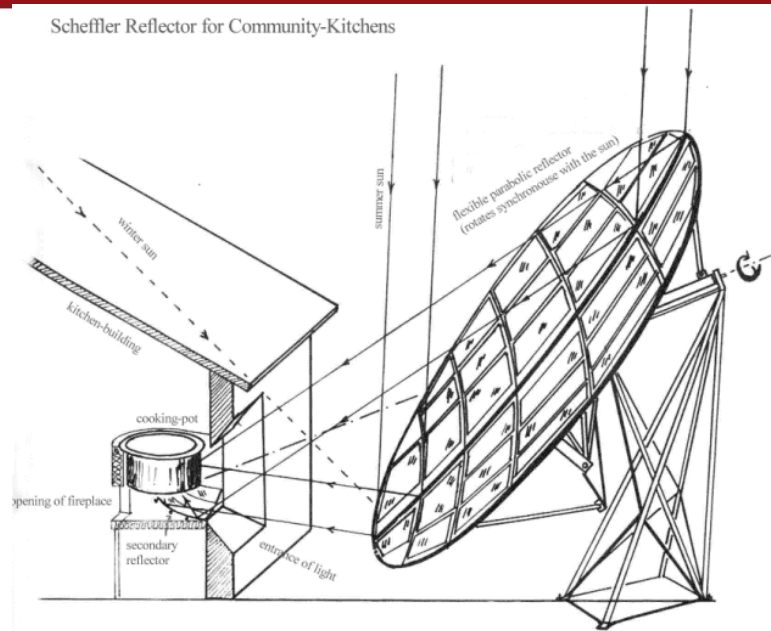


Figura 2.3: Cocina Solar. Fuente: <http://www.solare-bruecke.org>

Debido a que los reflectores tipo Scheffler utilizan únicamente los rayos de luz directos del Sol para concentrarlos en un determinado punto, se requiere un clima especial del lugar de montaje para que este funcione correctamente. Así, el Grupo de Apoyo al Sector Rural PUCP registra en el Perú proyectos aplicados en lugares de la sierra [12], donde el nivel de radiación solar es suficientemente alto [2]. A nivel mundial, el país con mayor número de aplicaciones e investigaciones de reflectores Scheffler es la India, en donde se encuentra la cocina solar más grande del mundo con una superficie de reflectores aproximada de 800 m<sup>2</sup>.

### Calibración de los reflectores

A pesar de que los errores en el ensamblaje de los espejos es muy común en reflectores Scheffler y que esto trae consigo una disminución de la eficiencia del mismo, existe poca información acerca del ajuste de los espejos que componen el Scheffler. A continuación se presentan dos investigaciones referidas a la medición de errores en la superficie de concentradores solares parabólicos, categoría a la cual pertenece el reflector Scheffler.

- **Video Scanning Hartmann Optical Testing of State of the Art Parabolic Trough Concentrators**

El artículo científico describe un proyecto de investigación que permite realizar una medición en el mismo lugar de trabajo de la desviación que puedan presentar cada uno de los espejos que compone un reflector solar Scheffler. Se describe también la Prueba óptica de escaneado por video de Hartmann (VSHOT por sus siglas en inglés) [5] y [6]. VSHOT es una prueba genérica que puede ser aplicada a diversos tipos de concentrador solar y, como se muestra en la Figura 2.4, está compuesto por un láser controlado por computadora, una cámara digital para la adquisición de imágenes y un procesamiento matemático para representar los errores en los espejos.

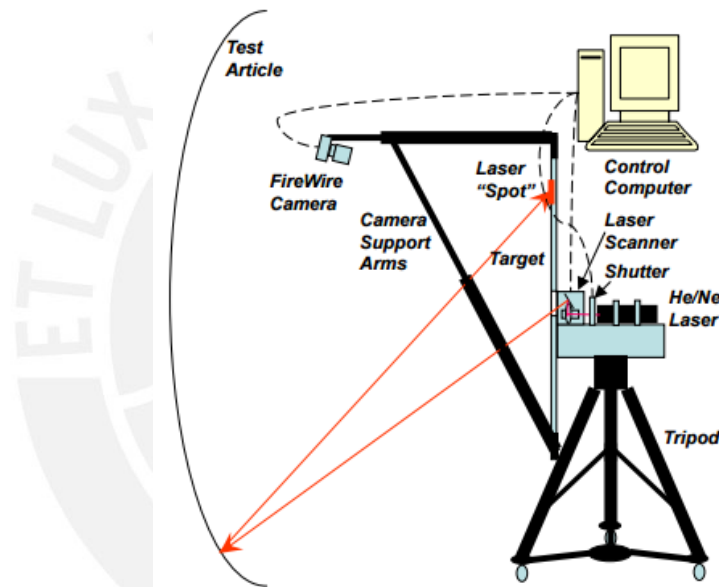


Figura 2.4 Diagrama de VSHOT. Fuente: [5]

- **Alineamiento práctico de Concentradores Solares Cilíndrico - Parabólicos [7]**

En este artículo científico se describe el uso de la técnica de Superposición fotográfica teórica (TOP por sus siglas en inglés). En la Figura 2.5 se describe gráficamente el funcionamiento de este sistema. Esta técnica implica el uso de un elemento de colección de calor (HCE por sus siglas en inglés) y un arreglo de cinco cámaras distribuidas a lo largo del eje perpendicular al eje del concentrador. De estas, una se encuentra justo sobre el eje del mismo y sirve para mantener perpendicular el eje donde se encuentra el arreglo y el eje del concentrador. El objetivo de las otras cuatro cámaras es capturar este elemento de colección de calor en el reflejo de cada espejo. Luego,

mediante una comparación de la imagen capturada y otra imagen teórica almacenada en la memoria del sistema, es posible determinar el factor de error presente en cada uno de los espejos.

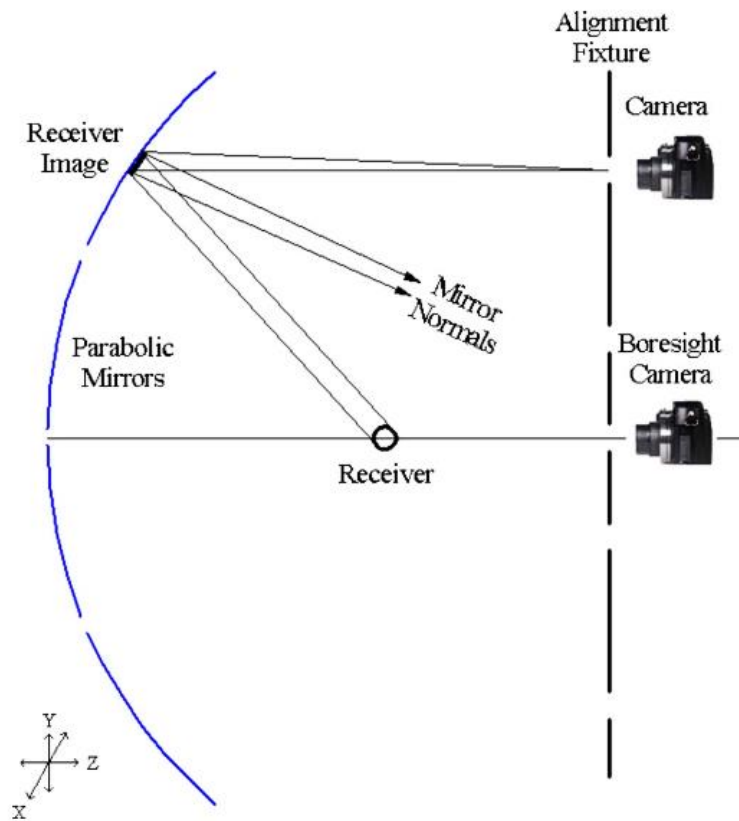


Figura 2.5. Diagrama de TOP. Fuente: [7]

## 2.2 Definición de requerimientos del sistema mecatrónico

El principal requerimiento que debe cumplir el sistema es indicar de manera precisa qué espejos se encuentran incorrectamente alineados. Del mismo modo, el sistema indica la dirección en la que el espejo se encuentra desalineado a fin de facilitar una medida correctiva por parte del usuario.

### 2.2.1 Requerimientos mecánicos

Debido a que la medición planteada se debe llevar a cabo en un ambiente cerrado, es necesario que se diseñe dos soportes por separado: Un soporte para el reflector Scheffler que se medirá, y otro diferente para acoplar el láser y su sistema de control.

Los requerimientos mecánicos que debe cumplir el soporte del reflector son los siguientes:

- Albergar correctamente el reflector Scheffler existente.
- Presentar rigidez necesaria para que el soporte no falle.

Los requerimientos mecánicos que debe cumplir el soporte para el láser son los siguientes:

- El soporte debe permitir el acople del láser de manera segura.
- El soporte debe tener los grados de libertad necesarios para lograr un movimiento alrededor del eje horizontal y vertical.

### **2.2.2 Requerimientos eléctrico-electrónicos**

- La alimentación que se escogerá para el sistema debe ser capaz de suministrar la energía eléctrica necesaria durante todo el proceso de calibración, esto implica el sistema de análisis de imágenes y los actuadores que se utilizarán.
- Los actuadores deben ser capaces de realizar los movimientos de los grados de libertad.
- El sistema de captura de imágenes debe considerar las características de resolución y velocidad mínimos que se señale en el sistema de procesamiento de imágenes.

### **2.2.3 Requerimientos del sistema de control**

- El microcontrolador usado debe tener el número adecuado de entradas y salidas requeridas para manipular los actuadores presentes.
- Debe poder procesar la imagen para verificar el correcto alineamiento de los espejos.
- Debe ser capaz de identificar individualmente los espejos que no estén correctamente alineados con la finalidad que el usuario pueda realizar el ajuste necesario.

### **2.2.4 Requerimientos de seguridad**

- El soporte del reflector debe asegurar un correcto ajuste de tal manera que el reflector quede fijo y su uso no represente un peligro para el usuario.

### 2.3 Estructura de funciones

En la Figura 2.6 se presenta la estructura de funciones del sistema. El sistema se divide a partir del procesamiento que se lleva a cabo en la computadora, y el que se lleva a cabo en el microcontrolador.

En el diagrama, se puede apreciar las siguientes entradas presentes en el sistema: energía, variables del ambiente y también información del usuario. La entrada de energía permite alimentar con corriente eléctrica a los distintos componentes electrónicos del sistema. Las variables del ambiente se refieren a los datos que los sensores pueden captar y la información que aportan estos al sistema. En este caso se tiene como único sensor a la cámara encargada de capturar imágenes correspondientes al reflejo del láser en la superficie determinada. Finalmente, la información del usuario se refiere a los datos que necesita el sistema para poder llevar a cabo la detección de la inclinación de los espejos. Entre los datos requeridos se encuentra una fotografía del reflector posicionado en el soporte y un comando que permitirá el inicio de la detección.

Como variables de salida del sistema se tiene al número total de espejos verificados, la proporción de espejos que están incorrectamente alineados y la identificación individual de los espejos que presenten estos errores. Además se considera también como variables de salida del sistema al calor, ruido o vibraciones propias del uso de actuadores o consumo de corriente eléctrica.

La estructura de funciones se subdivide en funciones que cumplen las siguientes partes del sistema: la parte de procesamiento, la parte mecánica, el conjunto de actuadores, la parte de suministro de energía y la de los sensores.

En el bloque de Procesamiento, es necesario destacar las funciones de Calcular posiciones de espejos, Calcular el alineamiento de los espejos y Posicionar láser. La función Calcular posiciones de espejos valida la imagen ingresada por el usuario y mediante un procesamiento de imágenes puede determinar el espaciado y las posiciones de cada espejo que compone el reflector. La función Calcular alineamiento de los espejos utiliza las coordenadas obtenidas de cada reflexión obtenidas por medio

de la cámara. Con estas coordenadas, el sistema calcula un promedio de posiciones verticales u horizontales obtenidos de cada columna o fila, respectivamente; para posteriormente hallar el error en la inclinación de cada espejo. La función posicionar láser hace uso de las posiciones de cada espejo, variables que deben estar almacenadas previamente. Con la ayuda de un algoritmo matemático, es capaz de dirigir adecuadamente el rayo láser a fin de que incida en un determinado espejo. Cabe mencionar que esta última función es realizada por el microcontrolador.

En el bloque de Actuadores se describe principalmente a la transformación de energía mecánica en eléctrica y el accionamiento del láser. Esta primera función es necesaria para poder brindar los dos grados de libertad que se requieren para hacer incidir el rayo láser en un espejo determinado.

En el bloque de Sensores del sistema se incluye a la cámara. Esta cámara será la encargada de capturar imágenes de la superficie reflectora a la vez que el láser es reflejado por un espejo. Esta tarea debe ser llevada a cabo con el número total de espejos y debe estar debidamente sincronizada. Además, es preferible que esta captura de imágenes sea lo bastante rápida como para que la detección de la inclinación de los espejos no tome demasiado tiempo al usuario.

La parte mecánica está compuesta por los soportes que albergarán los distintos componentes del sistema, entre ellos la cámara, el láser, los actuadores, los componentes electrónicos, entre otros. En esta parte, se excluye algún tipo de soporte o mesa para la computadora ya que se asume que el usuario cuenta con un lugar donde apoyar este artefacto.

Finalmente, en el bloque de energía, se presenta a las funciones de brindar energía eléctrica tanto a sensores, actuadores, láser y procesadores tanto de la computadora como del microcontrolador.

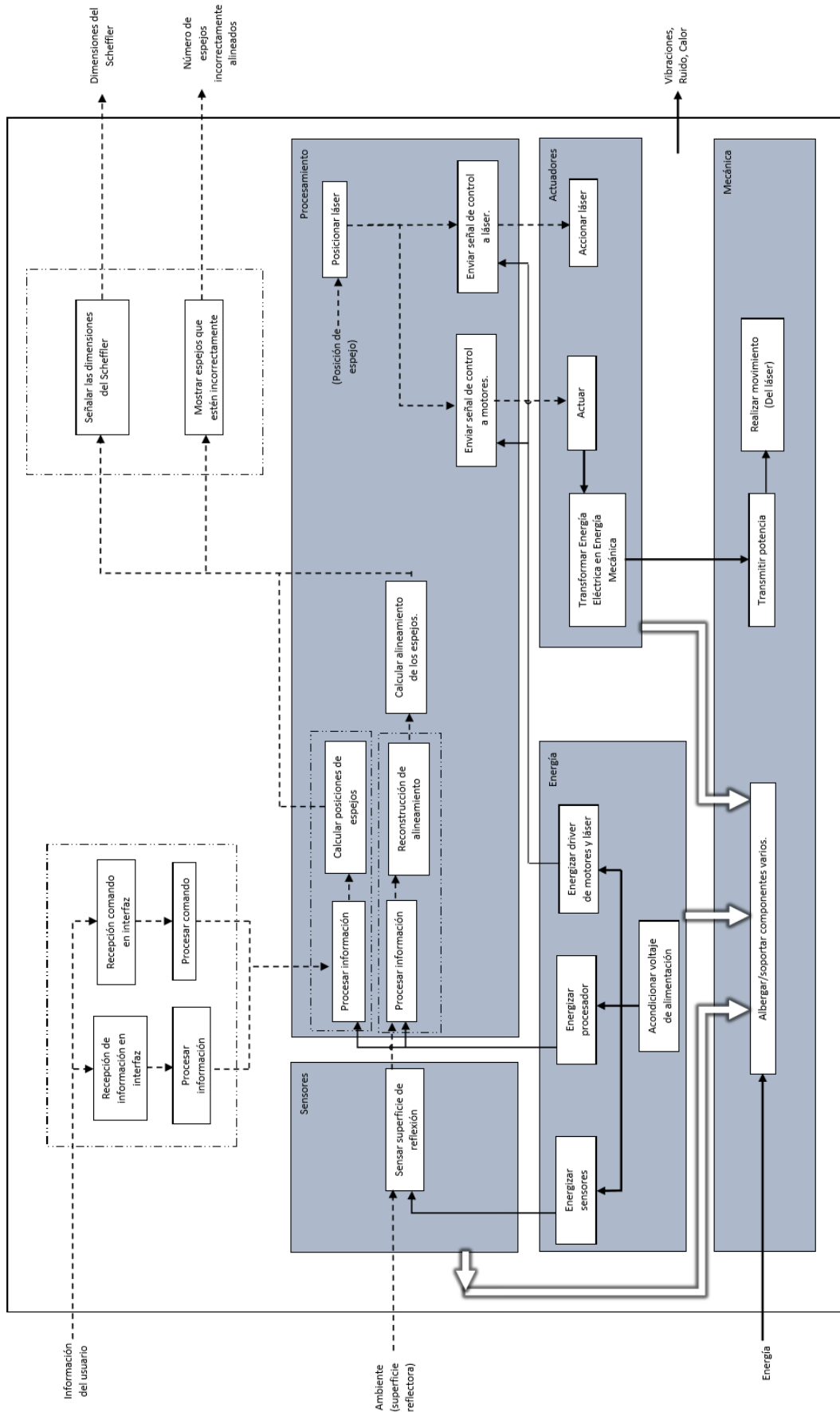


Figura 2.6. Estructura de funciones del sistema. Fuente: Propia.

## 2.4 Conceptos de solución del sistema

En esta sección se describen los tres conceptos de solución del sistema. Estos conceptos son planteados a partir de la realización de una matriz morfológica, en donde se analizan determinados componentes, materiales o posicionamientos que permitan llevar a cabo de manera satisfactoria las funciones del sistema descritas en la sección anterior. Tanto la matriz morfológica, como el análisis de las soluciones para encontrar a la solución óptima se presentan en el Anexo A.

### **Solución 1:**

La primera alternativa de solución consiste en la fabricación de un soporte de acero para el reflector Scheffler de tal manera que este tenga orientación vertical. Esto permite que la superficie en la que se reflejan los rayos láser sea horizontal y pueda reemplazarse por un techo de color uniforme. Debido a que el sistema está diseñado para albergar un tamaño determinado de reflector Scheffler ( $8 \text{ m}^2$ ), el soporte deberá ajustar su tamaño para albergar adecuadamente al reflector. En este caso el cálculo de las posiciones de los espejos se realizará mediante el ingreso de una fotografía del reflector instalado en el soporte por parte del usuario. La transmisión de datos entre los sensores (01 cámaras con sensor tipo CMOS) y el procesador que se encuentra en la computadora se realizará mediante cables. La dirección del láser hacia un determinado espejo se realiza mediante un módulo que incluye un Galvanómetro. Dicho módulo denominado también Láser-Escáner, permite un movimiento preciso del láser en el plano X-Y a una distancia determinada por el fabricante que depende del modelo que se escoja. Los comandos a este Láser-Escáner son enviados mediante un microcontrolador basado en Arduino, el mismo que se comunica con la computadora mediante una conexión Bluetooth. Finalmente todo el sistema se encuentra alimentado mediante una fuente DC. En la Figura 2.7 (a) se presenta un bosquejo del concepto de solución 1.

### **Solución 2:**

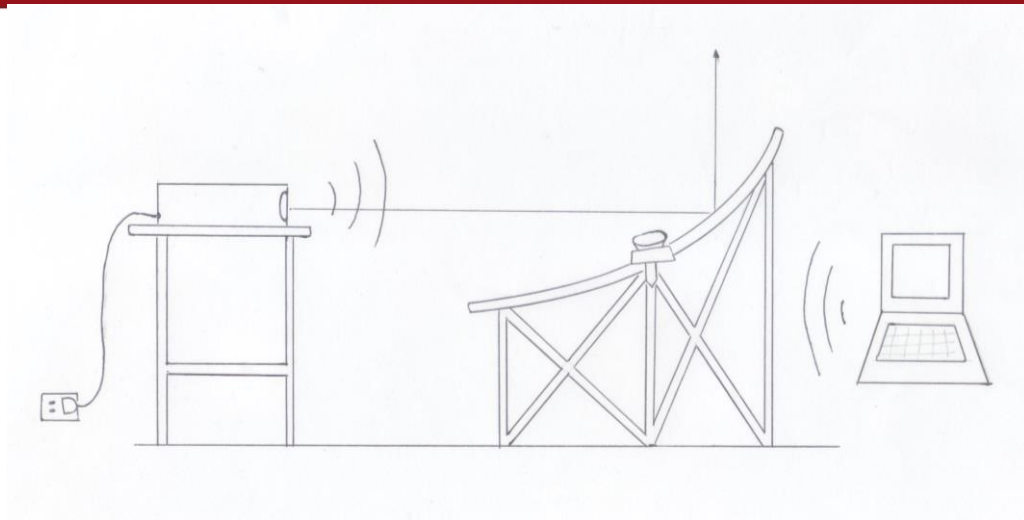
La segunda alternativa de solución es contraria a la primera alternativa en la orientación horizontal del soporte, lo cual permite que los rayos se reflejen en una superficie vertical. En esta alternativa se utilizaría Aluminio como material, lo cual limita ciertos aspectos en la construcción del soporte tales como la soldadura, que es



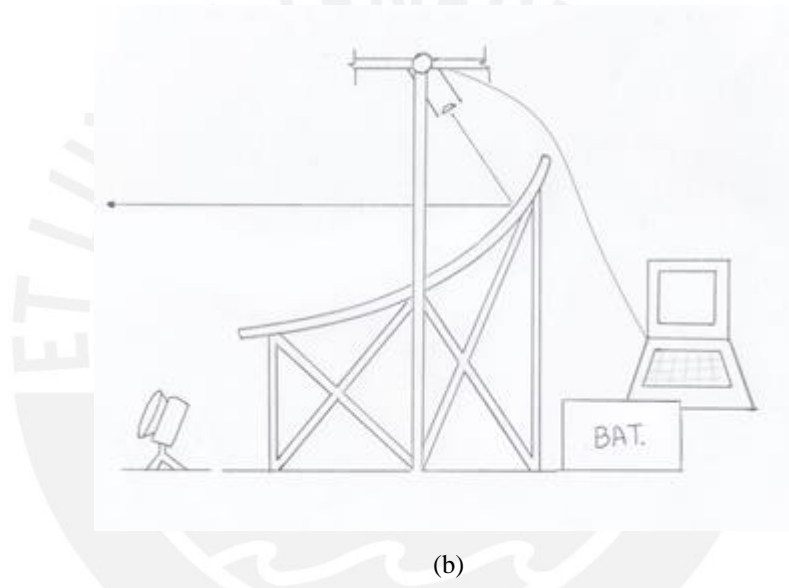
más costosa en este material. Debido a que el sistema está diseñado para albergar un tamaño determinado de reflector Scheffler ( $8 \text{ m}^2$ ), el soporte deberá ajustar su tamaño para albergar adecuadamente al reflector. En este caso el cálculo de las posiciones de los espejos se realizará automáticamente mediante la captura de una imagen por parte del sistema. La transmisión de datos entre los sensores (02 cámaras con sensor tipo CCD) y el procesador que se encuentra en la computadora se realizará mediante cables. La dirección del láser hacia un determinado espejo se realiza mediante un motor tipo Servo. Dicho motor se acopla al láser mediante engranajes y el movimiento del mismo se encuentra comandado por un microcontrolador Arduino. Este microcontrolador está conectado también a la computadora mediante cables. Finalmente todo el sistema se encuentra alimentado mediante una batería, lo cual permite que el sistema sea independiente de la existencia de un suministro eléctrico siempre y cuando la batería se encuentre cargada. En la Figura 2.7 (b) se presenta un bosquejo del concepto de solución 2.

### **Solución 3:**

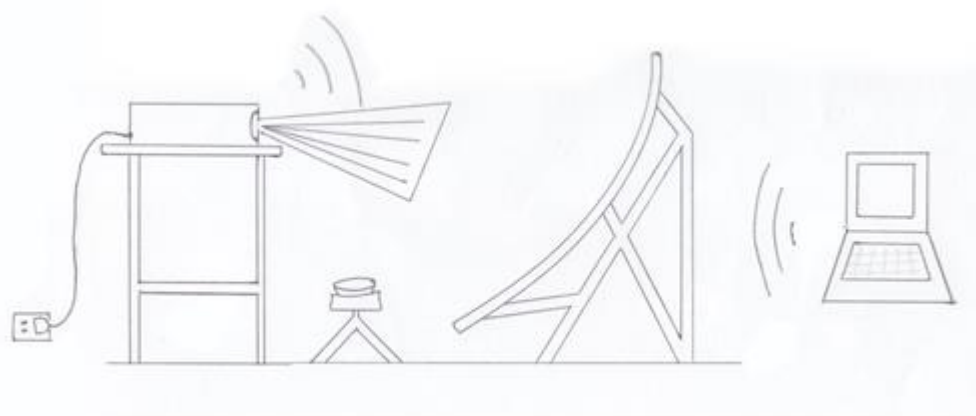
Como tercera opción se plantea un soporte para el reflector Scheffler de tal manera que este tenga orientación vertical y se aproveche el soporte construido para el uso del reflector. Debido a esto, el cálculo de las posiciones de los espejos se realiza mediante el ingreso de una fotografía al sistema. La transmisión de datos entre los sensores (01 cámara con sensor tipo CMOS) y el procesador que se encuentra en la computadora se realizará mediante cables. La dirección del láser hacia un determinado espejo se realiza utilizando un actuador lineal y un láser de tipo línea. Dicho actuador está comando por un microcontrolador. Esto tiene como consecuencia que es necesario diseñar y fabricar una tarjeta que albergue a un microcontrolador que puede ser PIC o ATmega. Este microcontrolador debe contar con un módulo Bluetooth para la comunicación de datos con la computadora. Finalmente todo el sistema se encuentra alimentado mediante una fuente DC. En la Figura 2.7 (c) se presenta un bosquejo del concepto de solución 3.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.7 Conceptos de solución. Fuente: Propia.

## 2.5 Descripción del concepto óptimo de solución

El presente proyecto presenta un sistema de detección de la inclinación de espejos en un concentrador solar del tipo parabólico Scheffler, mostrado en la Figura 2.8. El principal propósito del sistema es el de ayudar a los fabricantes de concentradores Scheffler a aumentar la eficiencia de sus productos mediante un correcto alineamiento del arreglo de espejos y, por consiguiente, la orientación de rayos solares sobre el área deseada.

El sistema consta de un soporte de perfiles de acero para el disco parabólico, además de un láser encargado de proyectar un punto sobre cada espejo, que a su vez refleja el rayo en una superficie plana para su inspección. El láser necesita 02 grados de libertad para poder llegar a cubrir toda la superficie en dos dimensiones del reflector solar. Este movimiento se logra mediante el uso de un módulo conocido comúnmente como Láser-Escáner, el cual consta de dos motores DC acoplados a dos espejos que direccionan de manera precisa el rayo láser hacia un punto deseado. El detalle del sistema de direccionamiento de láser se muestra en la Figura 2.9. El cálculo de las coordenadas de este punto deseado se determina mediante el procesamiento de una imagen que es introducida como dato por parte del usuario. Dicha imagen debe ser tomada del reflector ya instalado en el soporte y permite, además, determinar la cantidad de espejos que contiene el reflector a analizar, así como las posiciones de los mismos.

La inspección se realizará mediante una cámara basada en un sensor CMOS conectada a una computadora, que mediante un software se encargará del procesamiento de imágenes. Cuando se haya completado de escanear un espejo, la computadora enviará una señal al microcontrolador para que el láser gire el ángulo necesario y se pueda escanear el siguiente espejo.

Cabe mencionar que toda la información es procesada por la computadora mediante el programa Matlab®. La forma de interacción entre la computadora y el usuario se da a través de una interfaz del programa mostrada en la Figura 2.10. La computadora es capaz, al término del escaneo de todo el reflector, de indicar al usuario qué espejos no

se encuentran debidamente alineados, así como la dirección a la cual deben ser girados para que su inclinación sea la correcta.

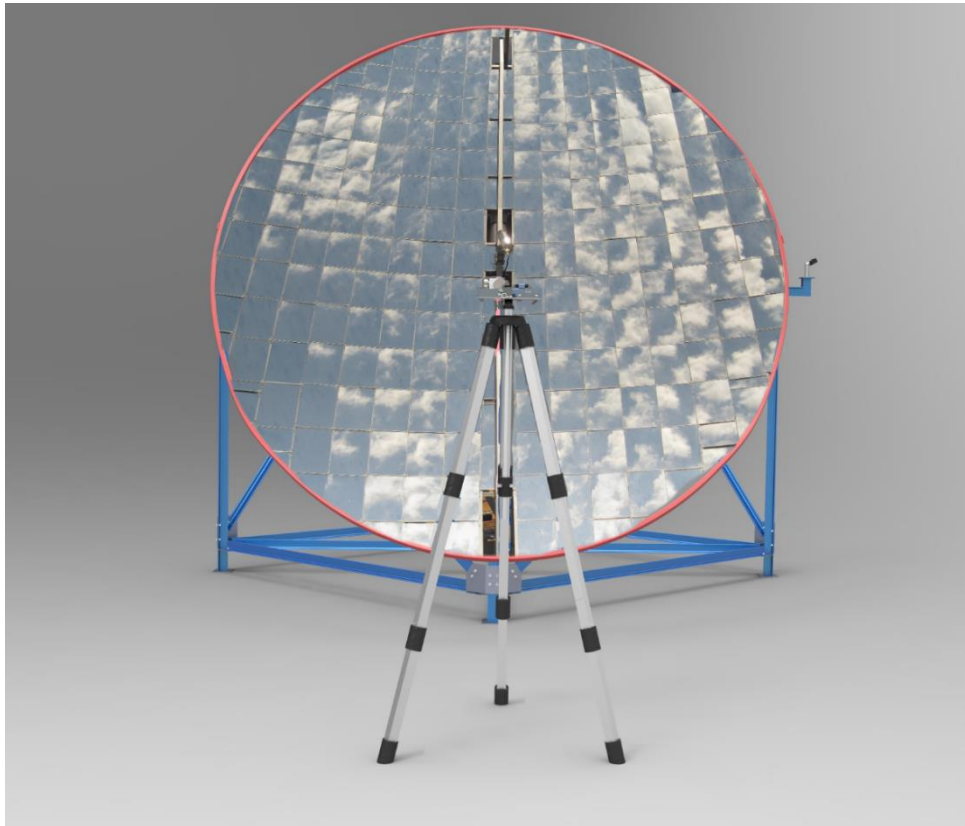


Figura 2.8 Diseño Óptimo de Solución - Vista Frontal. Fuente: Propia.

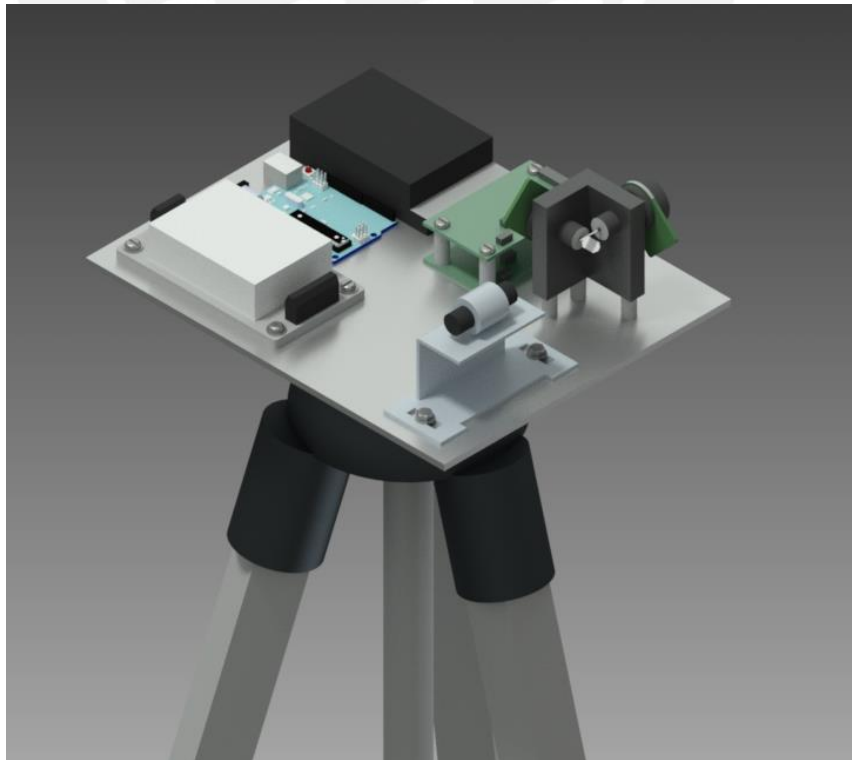


Figura 2.9 Diseño Óptimo de Solución – Detalle de direccionamiento de láser. Fuente: Propia.

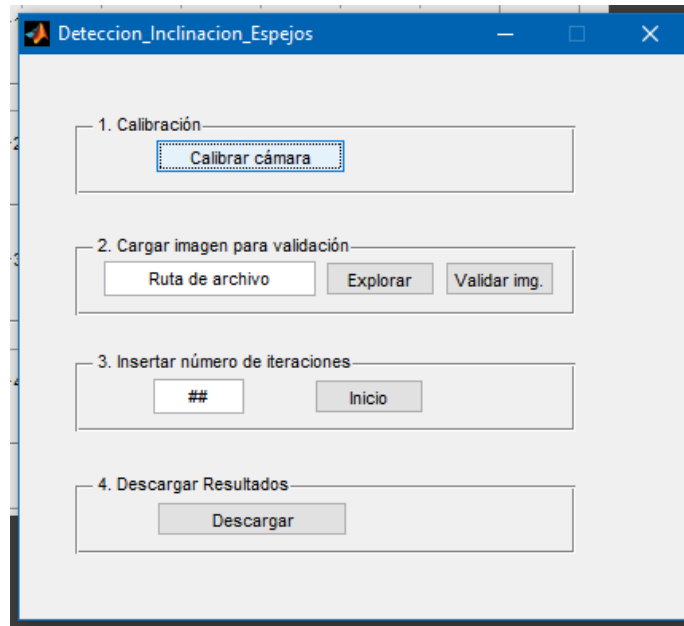
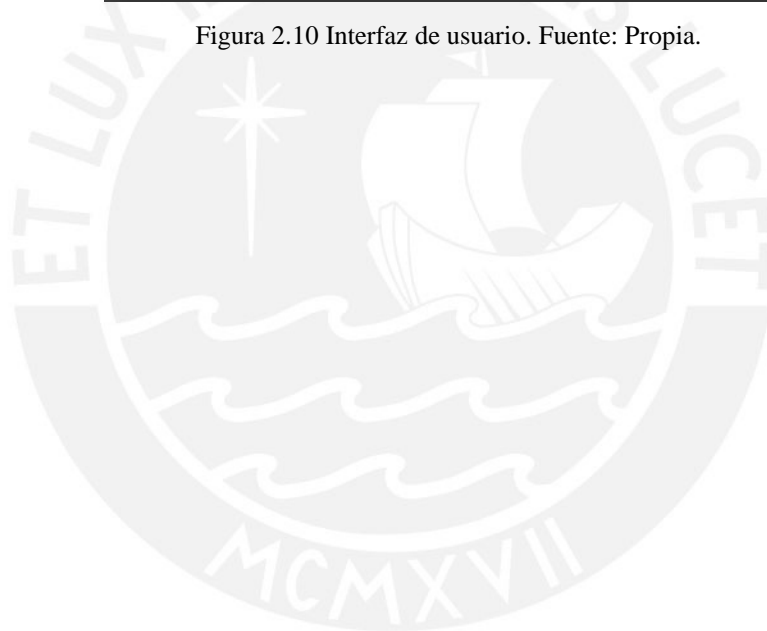


Figura 2.10 Interfaz de usuario. Fuente: Propia.



## CAPÍTULO 3

### SISTEMA MECATRÓNICO

En el presente capítulo, se explica el desarrollo del sistema mecatrónico. Para tal fin, se muestra en primer lugar el funcionamiento del sistema. A continuación se describen los componentes del sistema que corresponden a la parte electrónica y mecánica del mismo. Finalmente, se explica el funcionamiento del sistema de detección de la inclinación de espejos; así como las técnicas de visión por computadora que utilizará el proyecto. Cabe mencionar que todos los cálculos relacionados a este capítulo se encuentran en el Anexo D.

#### 3.1 Funcionamiento del sistema mecatrónico

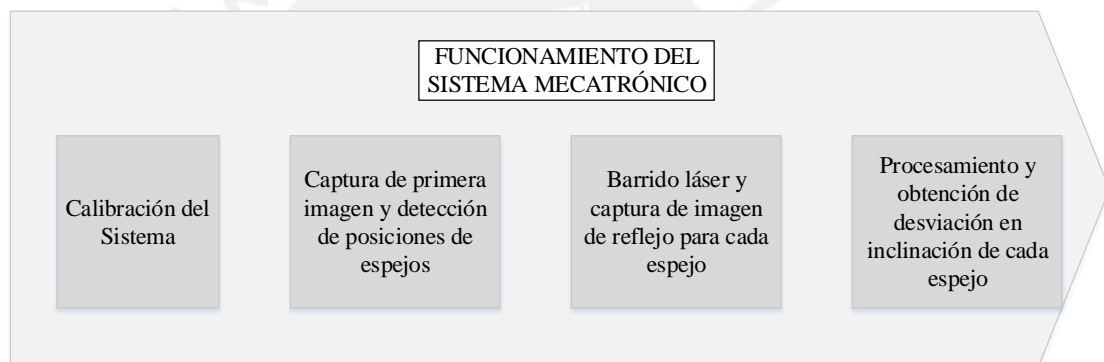


Figura 3.1 Funcionamiento del sistema mecatrónico. Fuente: Propia

Inicialmente, el sistema requiere ser calibrado. Esto incluye, por un lado, calibrar el Sistema Galvanométrico de Escaneo Láser por única vez; y, por el otro, calibrar la cámara cada vez que se realice una medición. En el Anexo B se describen los procesos de calibración para ambos casos.

El siguiente paso para llevar a cabo la detección de inclinación de espejos de un reflector Scheffler de 8 m<sup>2</sup>, es posicionar dicho reflector en el soporte. Previamente, el soporte debe estar localizado en un ambiente que reúna las condiciones adecuadas para el correcto funcionamiento del sistema. Estas son: ambiente techado con cielo raso a una altura no menor a 3.5 m, el ambiente debe poseer un suelo con superficie uniforme, el ambiente debe contar con una mesa o algún lugar disponible para colocar una computadora. Una vez posicionado el reflector, se debe posicionar el trípode que

contiene al láser centrado con el soporte y a una distancia de 1 m. Luego de esto, el usuario debe capturar una fotografía desde el punto donde se encuentra el láser.

El sistema se inicia y en la computadora se requiere ingresar y validar la fotografía capturada, el número de iteraciones deseadas y un comando de inicio de detección. Luego de esto, la computadora envía las coordenadas X e Y al microcontrolador y este se encarga de convertir dichos valores en señales de voltaje para que el módulo de Laser Scanner dirija el haz de luz. Este proceso se muestra en las Figuras 3.2 y 3.3. Con la ayuda del módulo, el rayo láser es posicionado en la primera fila de la primera columna y se envía una señal a la computadora para capturar la fotografía. Este proceso se repite fila por fila y columna por columna hasta tener un barrido completo de los espejos del reflector Scheffler. Debido a que la cámara es capaz de capturar hasta 7 imágenes por segundo, y que el reflector Scheffler de 8 m<sup>2</sup> tiene aproximadamente 250 espejos [3] en cada iteración requerida por el usuario, el sistema demoraría aproximadamente 36 segundos en realizar un barrido del reflector.

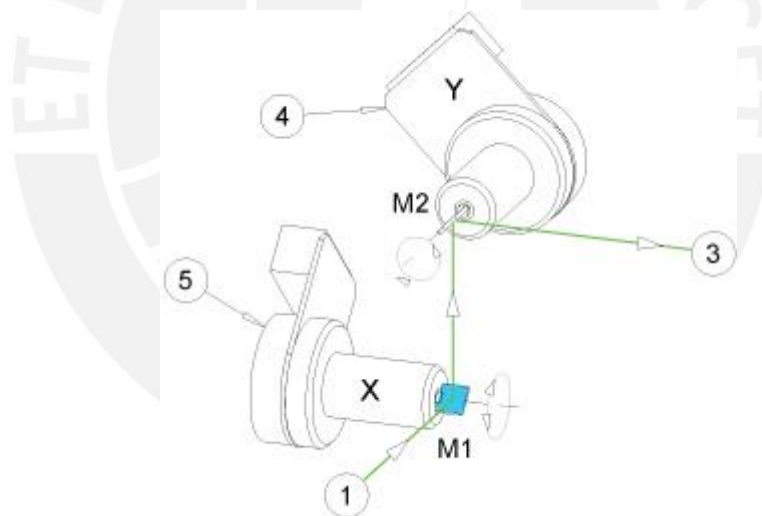


Figura 3.2 Direccionamiento de Láser mediante Galvanómetro. Fuente: LEYBOLD Photonics

Luego de haber capturado las imágenes correspondientes a los reflejos de cada espejo del reflector, la computadora realiza un procesamiento de imágenes en donde aísla el punto de laser del resto de la imagen y calcula las coordenadas de su centroide. Para cada columna y cada fila por separado, calcula la desviación del reflejo con respecto a una media también calculada.

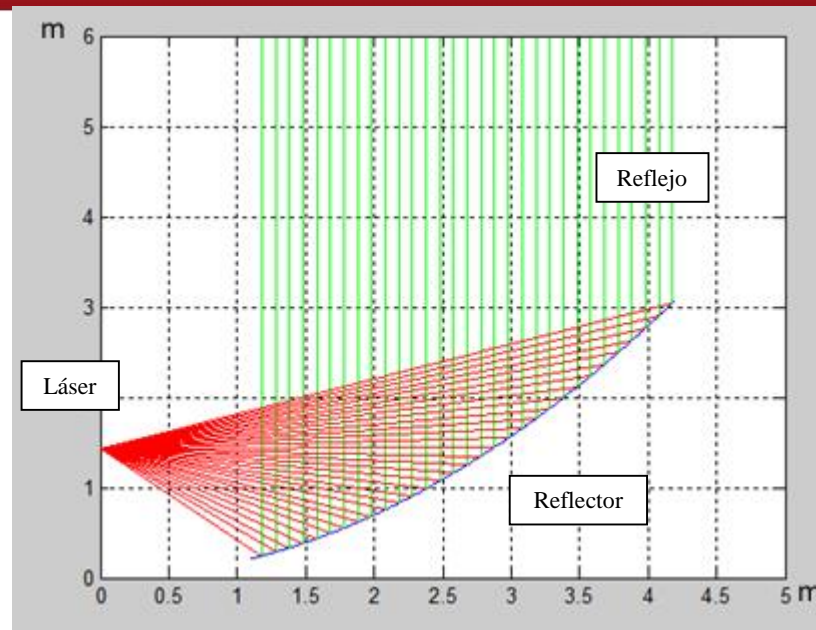


Figura 3.3 Direccionamiento de laser a espejos. Fuente: Propia.

Una vez finalizado el cálculo, se presenta qué espejos presentan errores en la inclinación, así como el lado hacia el cual el espejo se encuentra erróneamente inclinado, teniendo como referencia sus ejes tanto vertical como horizontal.

### 3.2 Diseño electrónico y de control

En la presente sección se detalla diagrama de bloques del sistema, los componentes que se utilizarán y sus respectivos diagramas esquemáticos. Además se describe el diagrama de flujo del sistema, la estrategia del sistema para poder determinar los errores en la inclinación de los espejos y las técnicas de visión por computadora que se utilizará en el proyecto.

#### 3.2.1 Diagrama de bloques del sistema

En la Figura 3.4 se muestra el Diagrama de bloques del sistema. En él se presenta las diversas relaciones existentes entre los componentes del sistema, como son la fuente de energía, cámara, computadora, el microcontrolador, convertidor digital analógico, láser y Galvanómetro. Este diagrama se encuentra agrupado de acuerdo a la configuración espacial del sistema, en donde se diferencia la cámara conectada a la computadora, del resto de componentes. La computadora envía las posiciones de cada



espejo al microcontrolador mediante un Módulo Bluetooth. Posteriormente, el microcontrolador convierte estas posiciones espaciales en voltajes proporcionales. Finalmente, debido a que el driver del módulo galvanométrico recibe voltajes analógicos, es necesario el uso de un convertidor analógico digital que cumpla dicha función.

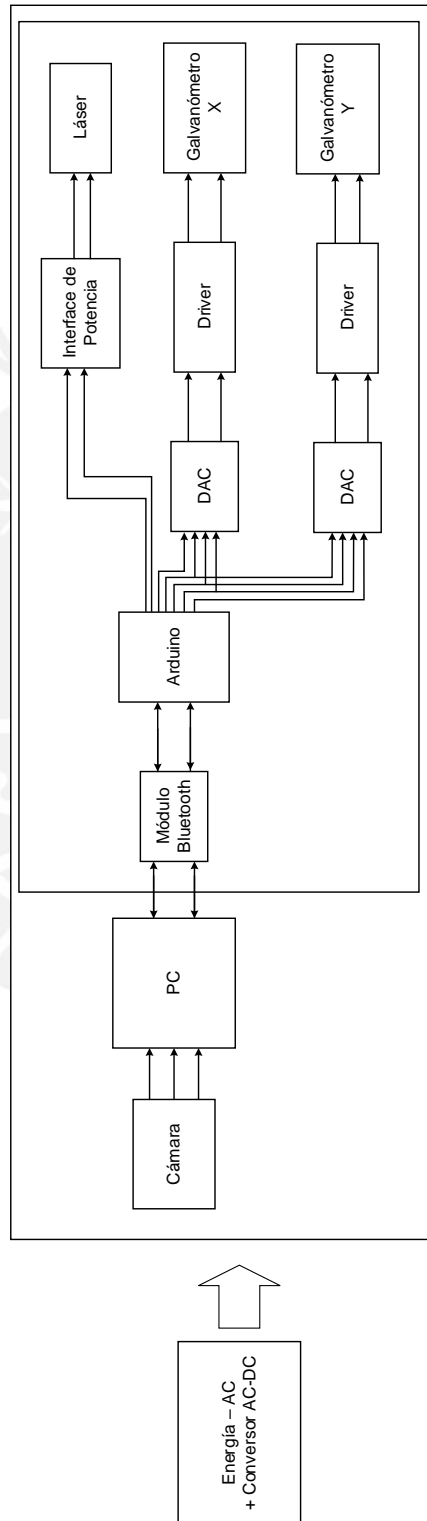


Figura 3.4: Diagrama de Bloques del Sistema. Fuente: Propia.

### 3.2.2 Componentes electrónicos

A continuación se presentan las características de cada componente electrónico seleccionado, así como sus características más importantes.

#### Cámara USB DMK 72AUC02-F

La cámara DMK 72AUC02 de marca Imaging Source, es una cámara monocroma con resolución de 2592x1944 píxeles (5MP). Esta cámara será utilizada para capturar cada reflejo del láser sobre la superficie reflectora durante el barrido del láser. Posee un sensor CMOS MT9P031 con formato 1/2.5". Esta cámara es capaz de capturar hasta 7 imágenes por segundo y puede ser conectada directamente a la computadora mediante su salida USB 2.0. Además, tiene integrada la unidad para poder encajar un lente M12. Estas características hacen que sea la cámara adecuada para el sistema ya que, al poseer sensor CMOS, tiene como ventaja que es rápida y no necesita una tarjeta adaptadora en la computadora. Cabe resaltar que el motivo de selección de una cámara con autoenfoco es la ligera variación que existirá entre las diferentes superficies de reflejo del láser que depende de la altura del cielo raso del ambiente en donde se realice la medición. En la parte inferior de la cámara se encuentra un agujero roscado de tamaño M6 que facilita su montaje al soporte del sistema.



Figura 3.5. Cámara DMK 72AUC02-F. Fuente: Imaging Source

Tabla 3.1. Especificaciones de Cámara. Fuente: Imaging Source.

Sensor	CMOS MT9P031
Formato	1/2.5"
Resolución	2592x1944px.(5MP)

Tamaño de pixel	2.2 $\mu\text{m}$ (ancho) x 2.2 $\mu\text{m}$ (alto)
Interfaz	USB 2.0
Voltaje	4.5 a 5.5 VDC
Capturas por segundo	7
Montaje de Lente	M12 x 0.5
Dimensiones	36x36x25 mm
Peso	50 g

### Óptica de la cámara: Lente TBL-2.9C (5MP)

La óptica del sistema cumple un rol muy importante en la captura de imágenes, donde es el lente la parte fundamental. La distancia focal que debe tener el lente está determinada directamente por la geometría del sistema ya que determina el área que podrá ser capturada por la cámara. En el Anexo D se detalla los cálculos realizados a fin de seleccionar adecuadamente el lente que se usará en la captura de imágenes. Como resultado de estos cálculos se estima que la cámara debe ser capaz de capturar un área de 2852 x 3051 mm a una distancia de 1706 mm. Para este propósito, es necesario contar con un lente de una distancia focal de 2.9 milímetros. Por tanto se ha seleccionado el lente de tipo tarjeta TBL – 2.9C de Imaging Source, el cual posee una óptica que cumple con este requisito y, que además, es compatible con la cámara seleccionada.



Figura 3.6. Lente tipo tarjeta. Fuente: Imaging Source.

Tabla 3.2. Especificaciones de la óptica seleccionada. Fuente: Imaging Source

Formato	1 / 2.5"
Distancia focal	2.9 mm
Distancia focal trasera	5.02 mm

Iris	2.0
Diámetro	14 mm
Longitud	15.3 mm
Masa	6 g

### Arduino Uno R3

En el diagrama de bloques se observa que es necesario un microcontrolador que esté en comunicación en todo momento con la computadora para que pueda posicionar el láser de manera adecuada en cada espejo, además de prender y apagar el láser cuando sea necesario. Para esto es necesario contar con por lo menos 6 salidas digitales, 3 de las cuales serán utilizadas para enviar información de manera serial hacia los convertidores Analógico-Digitales.

Teniendo en cuenta que el microcontrolador Arduino cuenta con el número suficiente de salidas digitales y PWM, además de que posee librerías ya implementadas para el envío de información serial a través de sus pines digitales (SPI por sus siglas en inglés), se considera a este como la opción más adecuada.

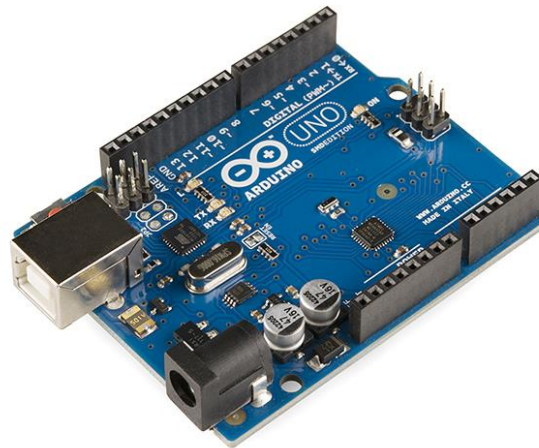


Figura 3.7 Arduino UNO. Fuente: [www.idelectronica.com](http://www.idelectronica.com)

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de entrada	7-12 V
Número de Pines Entrada/Salida	14
Corriente por Pin	20 mA
Velocidad de reloj	16 MHz

### Módulo Bluetooth HC-05

Para la comunicación entre la computadora y el microcontrolador, a fin de que los datos de posiciones de los espejos puedan ser enviados correctamente, se hace uso de un módulo Bluetooth. Esto debido a que la computadora estará conectada mediante un cable USB a la cámara y, asimismo, que la cámara y el láser se encuentran separadas espacialmente. Cabe mencionar que se selecciona este módulo en particular debido a que es compatible con el microcontrolador deseado. El módulo HC-05 se conecta a los puertos de transmisión y recepción de datos seriales de Arduino. Este módulo cuenta con Bluetooth 2.0 con tasa de datos elevada y es capaz de transmitir a una velocidad de hasta 3 Mbps.

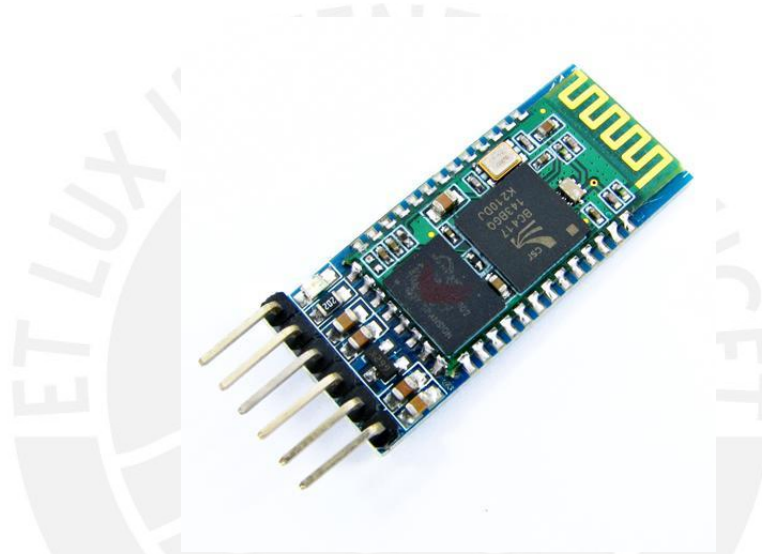


Figura 3.8. Módulo Bluetooth HC-05. Fuente: [www.botsciense.net](http://www.botsciense.net)

Tabla 3.4. Especificaciones

Voltaje de operación	1.8-3.6 V
Antena integrada	
Distancia de operación	5-10 m

### Sistema Galvanométrico para Escaneado Láser.

Para direccionar el rayo láser en una dirección determinada y que, de esta manera, el haz de luz incida sobre un determinado espejo del reflector, se usará el Sistema Galvanométrico para Escaneado Láser. Este sistema cuenta con dos galvanómetros, un soporte y un driver para cada galvanómetro. Los motores que usa el galvanómetro son motores DC con rotación limitada. Estos se encargan de la rotación de espejos ligeros que dirigen el haz de luz láser en dos direcciones ortogonales.

La principal ventaja de este módulo es que incluye el circuito para controlar los motores con una señal de entrada de voltaje que varía entre  $-5V$  y  $+5V$ . Este circuito, conocido como Servo Driver, se encarga de amplificar la señal de entrada y transmite corriente eléctrica al motor para producir movimiento en un rango proporcional a la señal de entrada.

Además, el Driver cuenta con un detector de posición que permite conocer la posición del rotor. En particular, este driver utiliza capacitores que, por principio, el valor de la corriente que pasa por él es proporcional al valor de su capacitancia, cuando un voltaje AC es aplicado al capacitor.



Figura 3.9. Galvanómetro con motores. Fuente: [www.lasercentury.com](http://www.lasercentury.com)

Tabla 3.5: Especificaciones Galvanómetro. Fuente: [www.lasercentury.com](http://www.lasercentury.com)

Voltaje de entrada de señal	$\pm 5V$
Voltaje requerido	$+15V/1.0A$ , $-15V/0.6A$
Ángulo óptico	$\pm 30^\circ$
Velocidad de escaneado	$>15Kpps$

### Convertidor Digital-Analógico

Debido a que en el microcontrolador seleccionado se cuenta solamente con salidas digitales y a que la señal requerida para controlar el galvanómetro es un voltaje analógico que varía entre  $+5V$  y  $-5V$ , es necesario el uso de un convertidor de señal de digital a analógica (DAC por sus siglas en inglés). Se selecciona el modelo DAC8581 de la marca Texas Instruments debido a que es capaz de generar un voltaje bipolar a la salida, lo cual simplifica el diseño. Además, este DAC, posee 16-bits a la entrada, los mismos deben ser enviados de manera serial desde el microcontrolador.

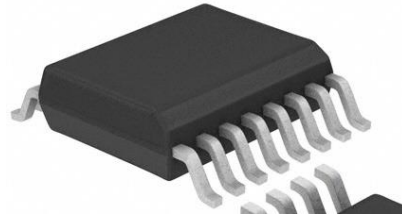


Figura 3.10. Convertidor Analógico Digital (Imagen referencial). Fuente: Digikey.

Tabla 3.6. Especificaciones de DAC8581

Resolución	16 Bits
Voltaje de Salida	+5 V
Voltaje de alimentación	-12 V a 12 V
Voltaje de señal en la entrada (Alta)	3.5 – 5 V

### Módulo Láser MICRO 650NM 5MW

El dispositivo láser escogido será el Módulo MICRO con 650nm y 5mW de potencia. Se escoge este tipo de láser, situado en la clase IIIa según la norma IEC-60825-1 [13], ya que no representa peligro para el usuario, siempre y cuando se tomen las medidas de uso recomendadas. Además, debido a que cuenta con una baja Divergencia de Haz ( $5 - 10^\circ$ .mm), el rayo láser reflejado no tendrá un diámetro mayor de 10mm, así que será fácilmente visible para la cámara. El encendido y apagado del láser será controlado mediante una salida digital del microcontrolador.



Figura 3.11. Módulo Láser MICRO 650NM 5MW. Fuente: Digikey.

Tabla 3.7. Características de Módulo Láser MICRO. Fuente: Digikey.

Longitud de onda	650 nm
Voltaje de Entrada	2.7 V
Corriente de alimentación	40 mA
Potencia	5 mW
Divergencia de Haz	5 – 10 °mm
Clase	IIIa

### 3.2.3 Diagramas esquemáticos

En esta sección se presentarán los diagramas esquemáticos divididos según la función que realizan. El diagrama esquemático del sistema general se presenta en el Anexo F.

#### Circuito de comunicación entre microcontrolador y módulo Bluetooth.

El módulo Bluetooth escogido para la comunicación de datos entre la computadora y el microcontrolador se conecta en forma serial al microcontrolador. Además se incluye un LED indicando que la conexión con la computadora se ha realizado de manera exitosa.

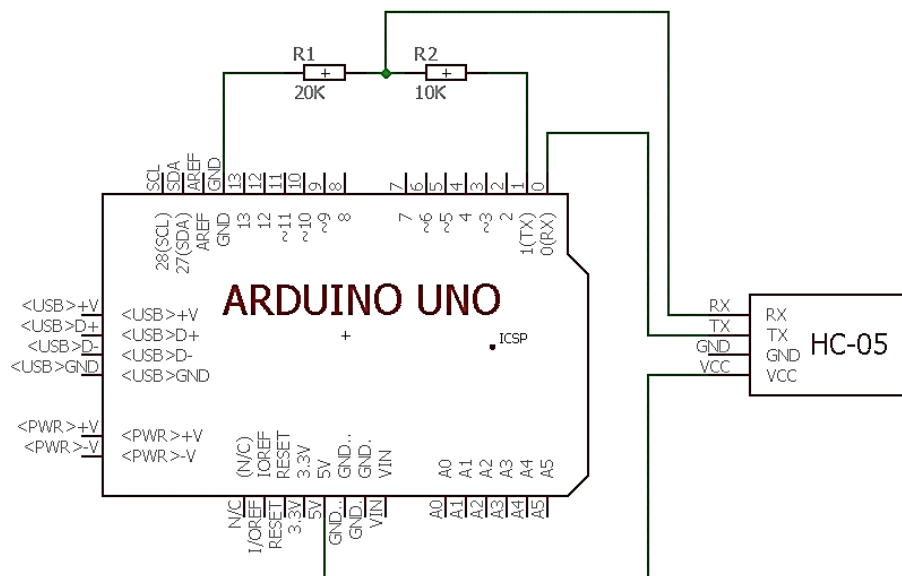


Figura 3.12 Circuito de comunicación entre microcontrolador y módulo Bluetooth. Fuente: Propia



### Circuito de generación de señal analógica para control de Galvanómetro.

De acuerdo a las especificaciones del Módulo de Galvanómetro, este necesita una señal de entrada de voltaje analógico en el rango de -5 V a 5 V. Para la generación de este voltaje se utiliza un Convertidor Digital-Analógico que convierte bits digitales suministrados en forma serial. Es posible utilizar las mismas salidas digitales del microcontrolador para tal propósito a excepción del pin CS, que define la activación de cada uno de los convertidores. Cabe mencionar que se utiliza un convertidor para cada eje de rotación del Galvanómetro (X e Y).

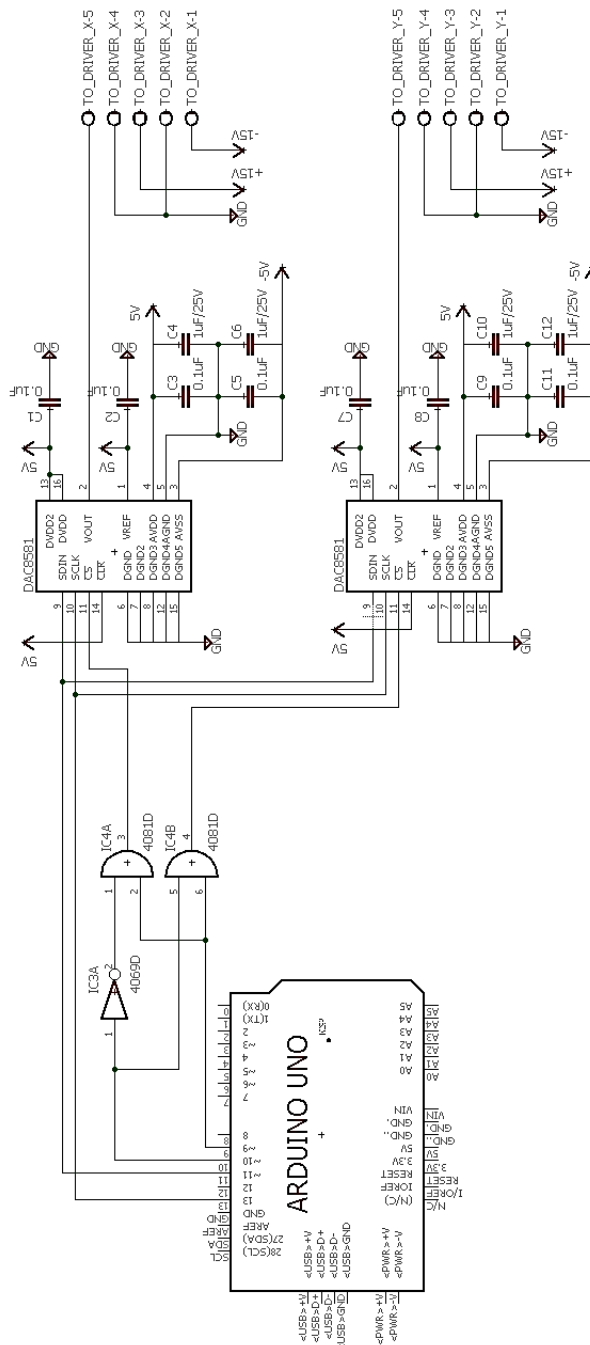


Figura 3.13 Circuito de generación de señal analógica para control de Galvanómetro. Fuente: Propia

### 3.2.4 Diagramas de flujo del sistema

En la presente sección, son descritos el diagrama de flujo del programa principal del sistema, así como de las subfunciones que se utilizan. La Figura 3.14 (a) muestra el diagrama de flujo general del sistema. Dentro del mismo, se aprecian las siguientes subfunciones: calibración manual de la cámara, determinar posiciones de los espejos, determinar la inclinación de los mismos, y, finalmente, mostrar los resultados.

En la subfunción “Determinar posiciones de los espejos” se calculan las posiciones a donde posteriormente tendrá que ser dirigido el láser. Esta subfunción recibe como variable de entrada el parámetro inicial que introduce el usuario, el cuales es, como fue descrito en la sección 3.1, una foto del reflector ya posicionado. Esta subfunción se puede apreciar en la Figura 3.14 (b).

La subfunción Determinar inclinación de los espejos se presenta en la Figura 3.15 y es el proceso más importante que lleva a cabo el sistema. Esta subfunción incluye un adecuado posicionamiento del láser, descrito en la Figura 3.16 (a); así como la captura de imágenes para cada posición del láser, mostrado en la Figura 3.16 (b); y el procesamiento de las imágenes a fin de encontrar errores en las inclinaciones de cada espejo del reflector.

Cabe mencionar que el sistema de detección de la inclinación en los espejos se encuentra ampliamente descrito en la sección 3.2.5, mientras que todas las técnicas de procesamiento de imágenes mencionadas en los diagramas, son descritas en el apartado 3.2.6.

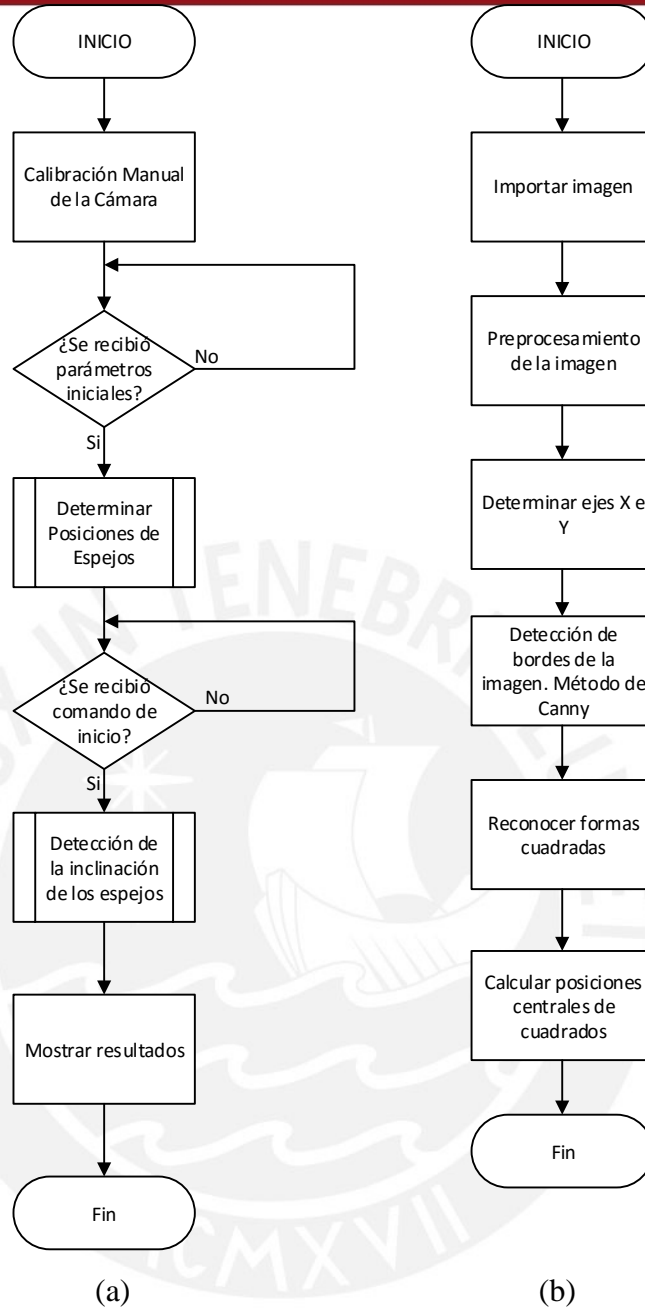


Figura 3.14. Diagramas de Flujo Principal y Determinar posiciones de espejos. Fuente: Propia.

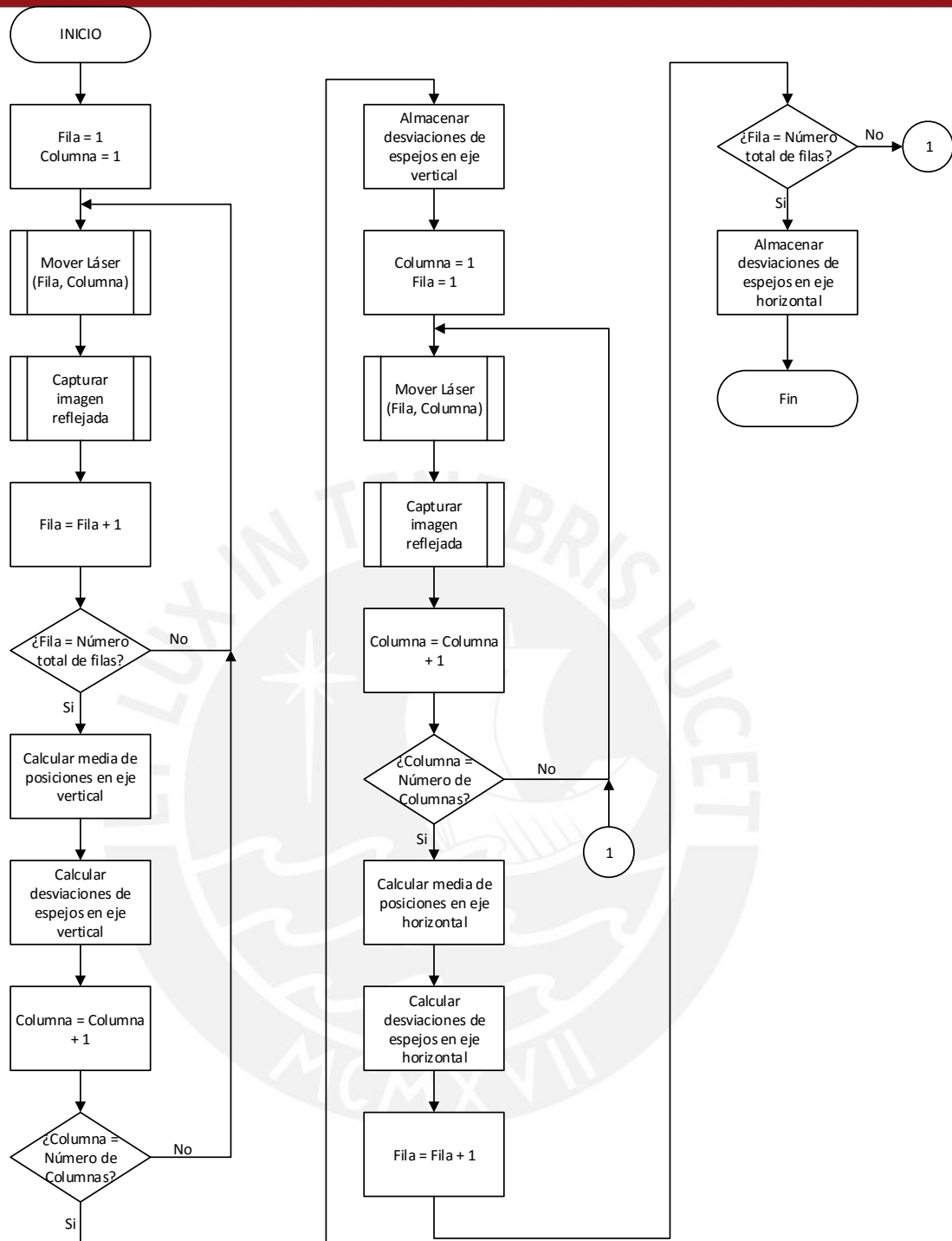


Figura 3.15. Diagrama de Flujo de Detección de inclinación de espejos. Fuente: Propia.

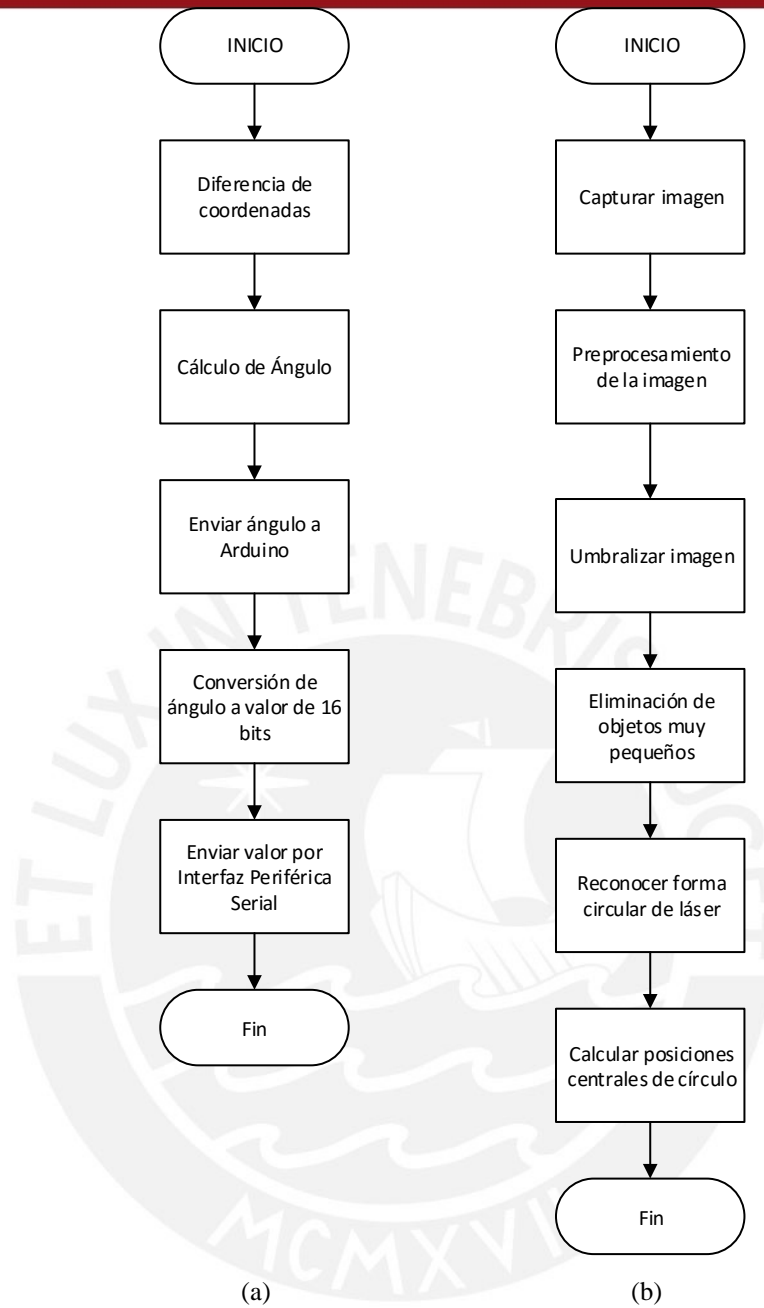


Figura 3.16. Diagrama de flujo de Mover Láser y Capturar Imagen Reflejada. Fuente: Propia.

### 3.2.5 Sistema de detección de inclinación

Para poder determinar la inclinación de cada espejo, el sistema se basa en un análisis estadístico de las coordenadas de los puntos de laser reflejados en la superficie reflectora. Adicionalmente, es importante resaltar que para el siguiente apartado, se asume que ya se ha llevado a cabo tanto la calibración inicial del sistema, detallada en la sección 3.1; como también el barrido láser y captura de imágenes correspondientes al reflejo de cada espejo del reflector, incluyendo el pre procesamiento de las imágenes a fin de aislar el punto de láser reflejado.

A continuación, el sistema calcula el centroide de cada punto de láser de cada imagen que se tiene en los datos. Esto permitirá aislar el reflejo del punto láser y también se tendrá una referencia de éste con el sistema de coordenadas global que fue definido durante la calibración. Seguidamente, el sistema calcula la posición del centroide de cada punto con respecto al mencionado sistema de coordenadas. Estos datos serán almacenados en la memoria de la computadora.

Luego, el sistema procesa los datos obtenidos columna por columna. Para los datos de cada columna, se tomará en cuenta únicamente la coordenada “X” de cada posición obtenida. Así, con las coordenadas “X” de la columna, el sistema calcula el promedio de posiciones en esta coordenada de los espejos del sistema, y a continuación determina, mediante sustracción de coordenadas, el valor de error que presenta cada espejo individualmente.

Una vez que se termina de calcular la desviación de todos los espejos en la coordenada “X”, el sistema analiza nuevamente todo el reflector. Este segundo análisis se realiza fila por fila y se siguen los mismos pasos descritos para las columnas, con la diferencia que, en lugar de tomar en cuenta la coordenada “X”, se toma en consideración la coordenada “Y”.

Finalmente, con los valores de las desviaciones en ambos ejes descritos anteriormente y con la posición ideal que debería tener, se calcula el ángulo que debería corregirse en cada espejo para minimizar el error en la inclinación del mismo.

### 3.2.6 Técnicas de visión por computadora

En el sistema se utiliza diversas técnicas de procesamiento de imágenes que permitirán, en la primera etapa de la detección, reconocer la posición de cada espejo en el reflector. Adicionalmente, se hace uso de estas técnicas para reconocer la posición del láser reflejado sobre una superficie reflectora.

Para reconocer la posición de cada espejo se utilizan las siguientes técnicas de procesamiento de imágenes:

- **Reconocimiento de bordes por el método de Canny**

El reconocimiento de bordes es una técnica presente en la librería de Matlab y está disponible para su utilización mediante el comando “edge”. El método de Canny se resume en tres grandes pasos: obtención del vector gradiente en cada pixel de la imagen; adelgazamiento del ancho de cada borde; e histéresis para reducir la posibilidad de aparición de bordes falsos. En la Figura 3.15 se puede apreciar el resultado de aplicar la detección de bordes por este método. Este algoritmo se escogió debido a que es útil para detectar todos los bordes de la imagen, ya sean fuertes o débiles; además de que permite una velocidad alta de procesamiento debido a la sencillez de sus operaciones.[18]

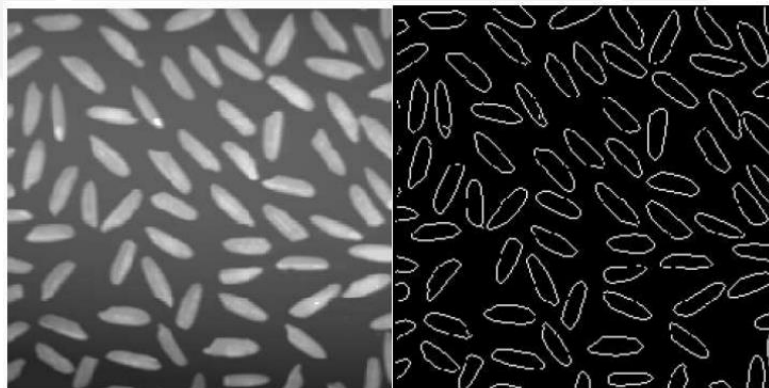


Figura 3.17. Resultado de aplicación de detección de bordes. Fuente: [18].

- **Reconocimiento de formas cuadradas y obtención de su centroide**

Luego de contar con una imagen umbralizada que tenga los bordes definidos, es necesario encontrar tanto las formas cuadradas presentes en la imagen, como sus respectivos centroides. Esto se logra mediante la comparación de imágenes-máscara, esto es, imágenes con tamaños de cuadrados predefinidos que la computadora

superpone en la imagen. Cuando esta superposición alcanza una coincidencia, se marca el centro del cuadrado y se almacena la posición del mismo en la computadora. En la Figura 3.16 se muestra el resultado de aplicar este método.

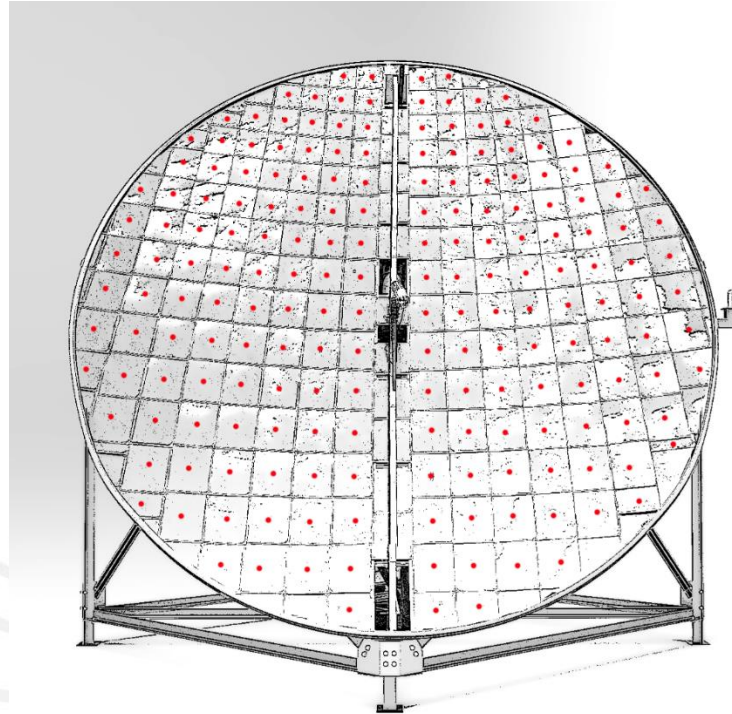


Figura 3.18. Resultado de aplicación de detección de formas cuadradas. Fuente: Propia.

- **Reconocimiento de reflejo láser**

Debido a que la captura del reflejo del láser sobre la superficie reflectora se realiza espejo por espejo, la computadora debe aislar solamente un pequeño círculo. Este procesamiento es posible mediante la umbralización de la imagen, actividad que convierte la imagen a color en una blanco y negro o binaria. A continuación, se elimina el ruido o elementos pequeños de la imagen mediante un acercamiento morfológico de la imagen. Esta operación, que en la librería de Matlab puede ser encontrada como “`imclose`”, realiza una erosión de la imagen en donde elimina los objetos no deseados. Finalmente, se obtiene una imagen a blanco y negro con un círculo en ella. A diferencia de la técnica de reconocimiento de cuadrados, esta vez no se sabe con seguridad qué tamaño tendrá el círculo, así que se puede hacer uso del comando “`regionprops`” a fin de encontrar el centroide del mismo. En la Figura 3.17 (a) y (b) se puede apreciar la imagen antes y después de aplicar las operaciones descritas en esta sección.





Figura 3.19. (a) Fotografía antes de procesar. (b) Resultado del procesamiento (Colores Invertidos).

Fuente: Propia.

### 3.3 Diseño mecánico

En la presente sección son descritos los planos que representan el diseño mecánico del sistema. Ese diseño incluye partes de los planos principales de ensamble y de despiece, además de presentar también las simulaciones realizadas por computadora. Cabe mencionar que el juego completo de planos, con su tamaño y escala correcta, se encuentran en el Anexo G; mientras que las simulaciones completas se encuentran en el Anexo E.

#### 3.3.1 Planos de ensamble

##### Ensamble general

En la Figura 3.15 se representa la vista de elevación del ensamblaje general. Las dimensiones máximas que alcanza el sistema son 4317 x 3310 x 3439 mm. Como se aprecia en la figura, el sistema se encuentra dividido entre el soporte para el reflector, que incluye a la cámara; y el soporte del Láser, que incluye al Módulo Galvanómetro y el microcontrolador. En la figura no se muestra también el marco del reflector Scheffler, ya que este no está incluido en el proyecto.

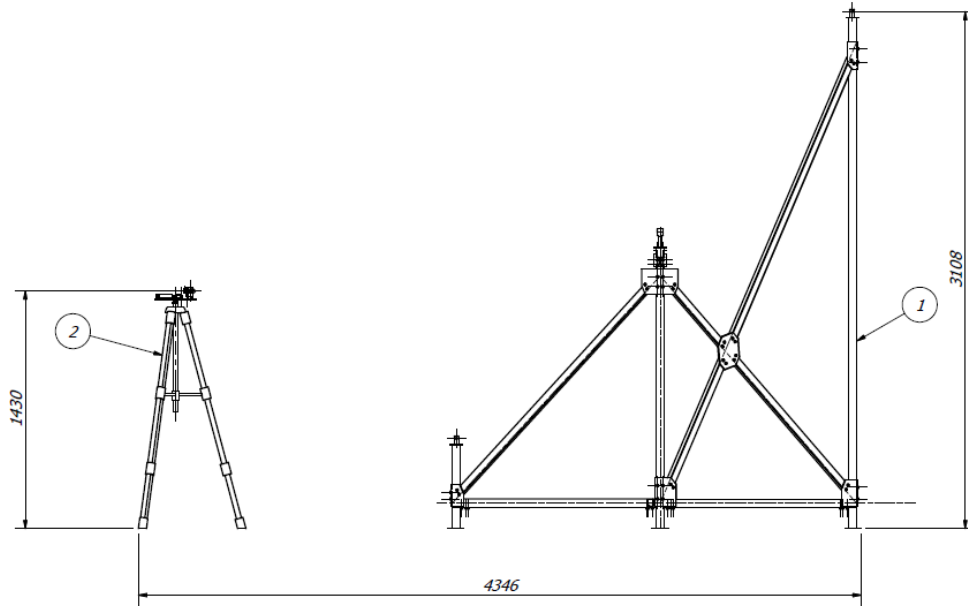


Figura 3.20. Vista de elevación de ensamble general. Fuente: Propia.

Adicionalmente, en la Figura 3.16 se muestra la vista de planta del ensamble general. Tanto las vistas de elevación como de planta nos ayudan para tener una idea del espacio en total que ocupará el sistema. La separación del Láser al reflector se debe a que el sistema debe acercarse el máximo posible al foco del reflector para hacer que las mediciones sean más precisas.

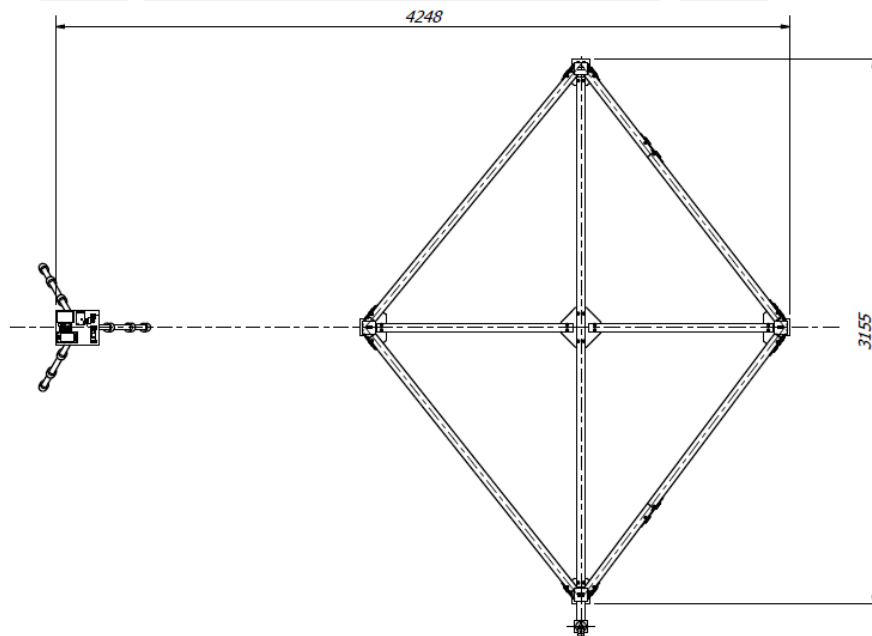


Figura 3.21. Vista de Planta de ensamble general. Fuente: Propia.

### Ensamble de soporte para Reflector

En las Figuras 3.17 y 3.18 se presenta la vista de planta y lateral del Reflector. Este soporte fue diseñado a partir de las dimensiones existentes en el Manual de Construcción del Reflector Scheffler [3]. Adicionalmente, el material de este soporte es Acero ASTM A36 y está fabricado a partir de perfiles T de 2" x 2" x 1/4" y plancha de 4 mm de espesor para las cartelas. El uso del perfil T brinda rigidez al soporte además de una buena resistencia mecánica.

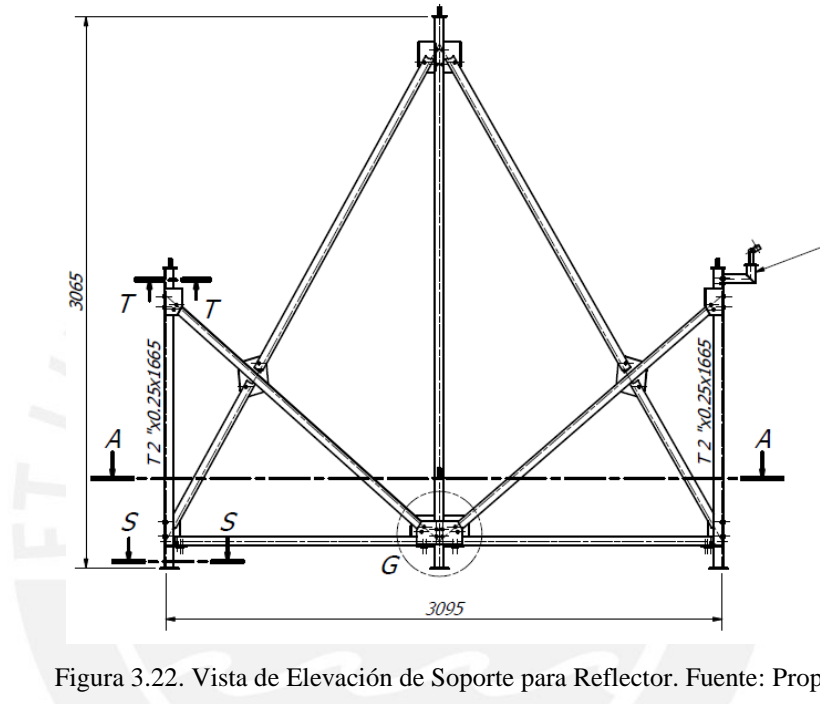


Figura 3.22. Vista de Elevación de Soporte para Reflector. Fuente: Propia

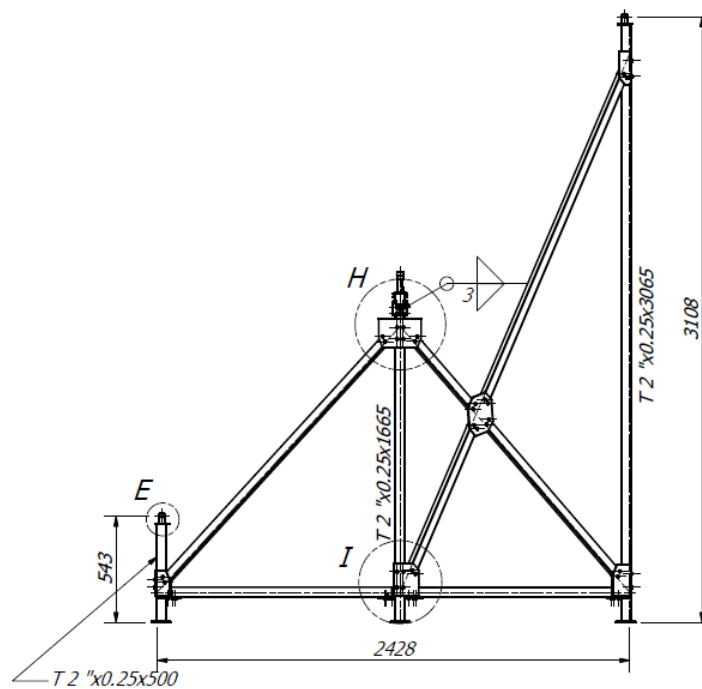


Figura 3.23. Vista Lateral de Soporte para Reflector. Fuente: Propia

En la Tabla 3.8 se describe y enumera la lista de componentes necesarios para la fabricación del soporte para el reflector Scheffler. En dicha tabla se describe también el material y, de existir, el estándar para poder realizar la compra de partes.

Tabla 3.8 Lista de partes de Soporte para Reflector. Fuente: Propia.

ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	ESTÁNDAR	MATERIAL
1	2	T 2 "x 0.25 x 1665	ASTM A6M	ASTM A36
2	1	T 2 "x 0.25 x 3065	ASTM A6M	ASTM A36
3	1	T 2 "x 0.25 x 500	ASTM A6M	ASTM A36
4	2	T 2 "x 0.25 x 1810	ASTM A6M	ASTM A36
5	2	T 2 "x 0.25 x 1860	ASTM A6M	ASTM A36
6	2	T 2 "x 0.25 x 1070	ASTM A6M	ASTM A36
7	1	T 2 "x 0.25 x 2950	ASTM A6M	ASTM A36
8	2	T 2 "x 0.25 x 2185	ASTM A6M	ASTM A36
9	2	T 2 "x 0.25 x 985	ASTM A6M	ASTM A36
10	2	T 2 "x 0.25 x 2120	ASTM A6M	ASTM A36
11	2	T 2 "x 0.25 x 2270	ASTM A6M	ASTM A36
12	1	BASE DE CÁMARA		
13	104	PERNO M6 X 25	ANSI B18	AISI 304
14	208	ARANDELA M6	ANSI B18	AISI 304
15	104	TUERCA M6	ANSI B18	AISI 304

### Ensamble de soporte para Láser y otros componentes

En la Figura 3.19 se presenta la vista de planta del segundo soporte. Es necesario mencionar que el trípode mostrado será comprado y se adaptará la base mostrada en la parte superior. Esta base es la encargada de albergar los componentes electrónicos, además del láser y el Módulo Galvanómetro. Debido a que el láser se debe encontrar alineado con el Módulo Galvanómetro, son requeridos extensores para aumentar la altura del Módulo Galvanómetro.

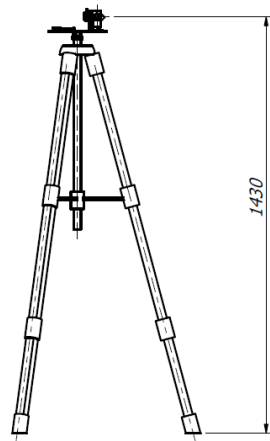


Figura 3.24. Vista de Elevación de Soporte para Láser. Fuente: Propia

### 3.3.2 Planos de despiece

#### Planos de despiece de cartelas y base

Entre los planos de despiece del proyecto se encuentran los correspondientes a las cartelas y planchas base en el soporte para reflector. En la Figura 3.20 se muestra un ejemplo de cada uno de estos tipos de pieza obtenida a partir de una plancha de acero ASTM A36 de 4 mm.

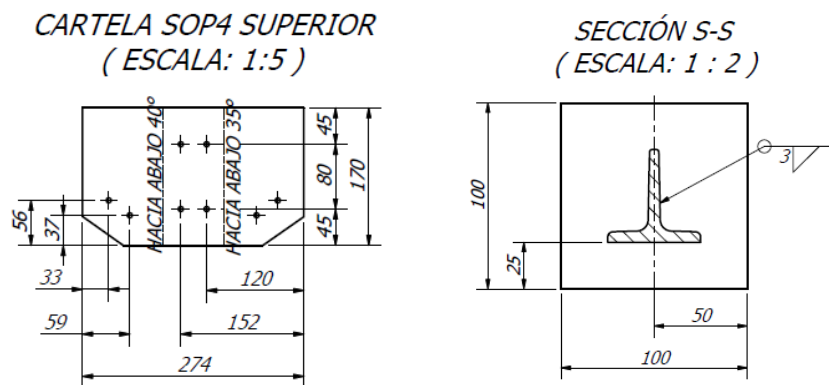


Figura 3.25. Planos de Cartelas y Plancha Base. Fuente: Propia.

### 3.3.3 Simulaciones de resistencia del Soporte.

Las simulaciones por computadora ayudan a comprobar que las consideraciones de diseño son correctas y nos brindan información más precisa sobre el prototipo como el lugar de mayor esfuerzo o mayor desplazamiento.

En la Figura 3.21 se muestra la simulación de esfuerzos realizada a la estructura encargada de albergar la cámara. Esta consiste en un brazo compuesto por los mismos perfiles del Soporte de Reflector, y que se encuentra empernado a dicho soporte. Se aprecia que los esfuerzos presentes son muy bajos, esto se debe a que el peso de la cámara es muy bajo (Menor a 100 g).

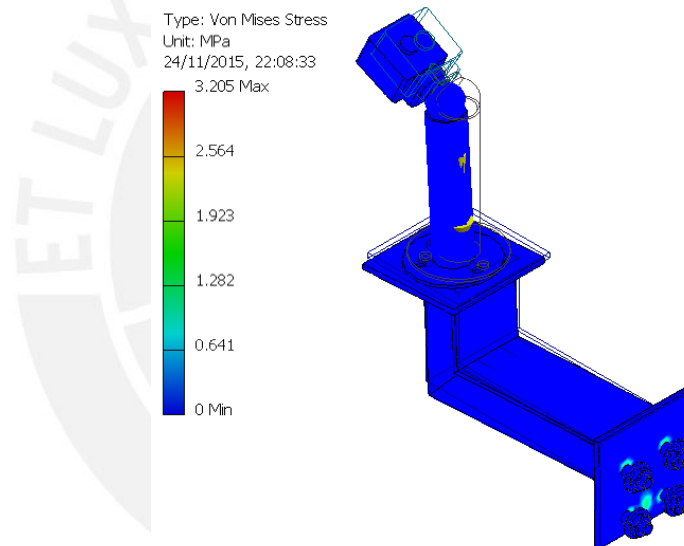


Figura 3.26 Análisis de Esfuerzos realizado a estructura de cámara. Fuente: Propia

En la Figura 3.22 se representa la simulación de esfuerzos realizada a los apoyos que albergan al reflector Scheffler. Teniendo en cuenta el peso del reflector, se efectuó la simulación en el apoyo que soporta la mayor fuerza. A partir de este análisis, se obtiene que el esfuerzo máximo que soporta el apoyo es de 8.5 MPa, que corresponde a un factor de seguridad de 15 (Ver Anexo E).

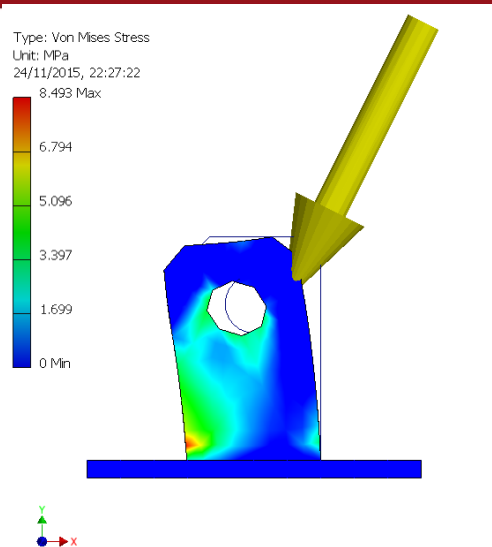


Figura 3.27 Simulación de esfuerzo en apoyo crítico. Fuente: Propia.

Finalmente, en la Figura 3.23 se presenta la simulación del soporte completo. En él se observa que el máximo esfuerzo en la estructura es de 214 MPa y se encuentra localizado en la base de la estructura, específicamente en el perno que sostiene a la barra de la base. Este valor se puede aceptar ya que a partir del análisis de la zona donde se produce, se puede recomendar agregar un perno más a la unión en caso este falle. Además, este valor de esfuerzo representa un factor de seguridad de 1.8 en el Soporte.

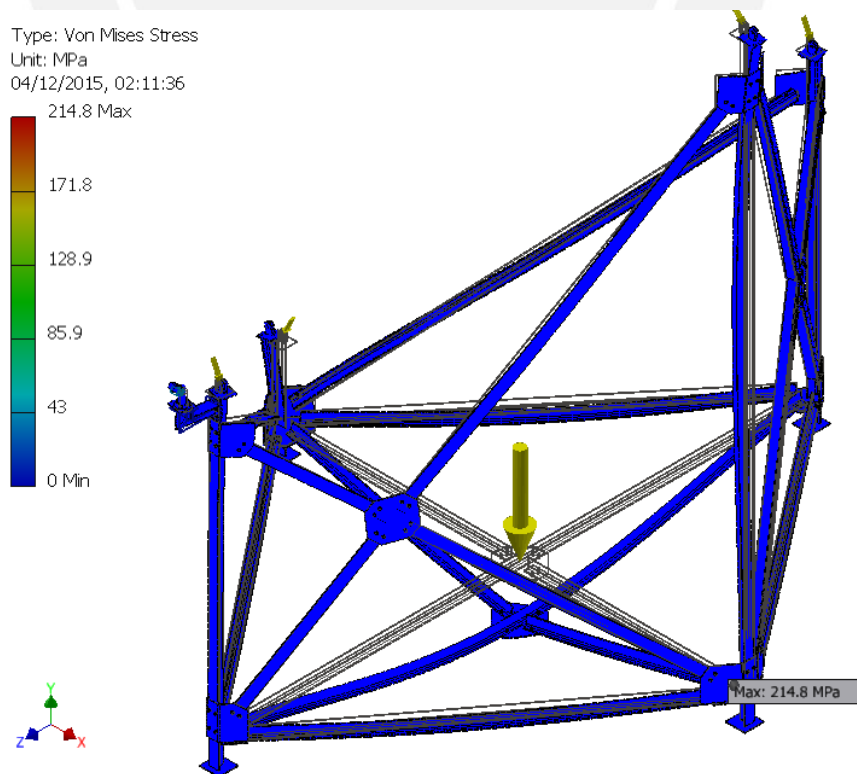


Figura 3.28 Simulación a estructura completa. Fuente: Propia.

## CAPÍTULO 4

### COSTOS

En este capítulo, se presentan los costos del presente proyecto. Para esto, se presentan las siguientes secciones: el presupuesto de componentes mecánicos detallado en la Tabla 4.1; y el de componentes electrónicos, en la Tabla 4.2. Adicionalmente se considera el costo de fabricación de los componentes. Las cotizaciones y costos obtenidos se encuentran en el Anexo H.

Tabla 4.1 Presupuesto de componentes mecánicos

Cantidad	Nombre	Precio Unit.	Total
8	T 2 x 2 x 1/4 " x 6m ASTM A36	90	720
1	Plancha 2 m x 1 m x 4 mm espesor ASTM A36	40	40
150	Perno M6x25	0.1	15
300	Arandela M6	0.02	6
150	Tuerca M6	0.04	6
1	Trípode 1.5 m de altura máxima	US\$ 30	105
Total			892

Tabla 4.2 Presupuesto de componentes electrónicos

Cantidad	Nombre	Precio Unit.	Total
1	DMK AFUP031-M12 USB Cámara	469	469
1	TBL 2.9 C 5 MP Lente	28	28
1	SCN804 Escáner	100	100
1	RLM12-650D-010 - Láser Diodo	20	20
1	BK-12 Ø12mm Bracket	15	15
1	Arduino UNO	30	30
1	HC-05 Bluetooth Module	15	15
2	Convertidor Analógico Digital	5	10
1	ECL30UD02-T Convertidor AC-DC	39	39
	Envío		100
		\$	826
	Total	S/.	2891

Adicionalmente, se calcula que para el precio de fabricación del sistema, por tratarse de trabajos de soldadura, taladrado y plegado de plancha metálica, no sobrepasará de S/. 500.00 por lo que se toma este valor como referencia. Sumando los valores obtenidos se tiene un costo de implementación del proyecto de S/. 4283.



## CONCLUSIONES

- El sistema propuesto cumple con los requerimientos mecánicos, electrónicos y de control presentados. Esto permitiría identificar, una vez implementado el proyecto, errores en la alineación de cada espejo de un reflector Scheffler.
- Para determinar errores en la inclinación de los espejos de un reflector Scheffler se desarrolla un método basado en la incidencia de un haz de luz láser sobre cada espejo y la captura del reflejo del mismo sobre una superficie. Adicionalmente, mediante técnicas de visión por computadora se establece comparaciones entre los datos para cada fila o columna, según corresponda, a fin de determinar el error en la inclinación de cada espejo.
- El sistema para la detección de la inclinación de los espejos de un reflector Scheffler considera un sistema con una fabricación sencilla ya que los componentes electrónicos que utiliza se encuentran con facilidad en el mercado y, adicionalmente, el proceso de fabricación de piezas mecánicas no involucran procesos complejos de manufactura.
- El costo que implica implementar el sistema es bajo ya que se tuvo en cuenta este criterio al momento de seleccionar los componentes. Además, a menos que no sea posible, se escogió uniones empernadas en lugar de soldadas, lo cual brinda al sistema la capacidad de ser desmontada para reparaciones o para almacenarla.

## RECOMENDACIONES

- Debido a que no existe un estándar de fabricación de Reflectores Scheffler, el soporte debe adecuarse a manuales realizados para su construcción, los mismos que son modificados de acuerdo al fabricante. Esto genera una desventaja para el presente proyecto ya que de contar con un reflector estándar se podría ampliar el proyecto a que se ajuste a diferentes tamaños de reflector.
- La elevada altura que presenta el sistema montado representa la limitante crítica para el uso del sistema ya que puede ser complicado encontrar un ambiente adecuado. Además debido también a esta causa, se toma en el desarrollo del proyecto a la superficie reflectora como el cielo raso de un ambiente. Estas desventajas podrían mejorarse, y de esta manera incrementar el potencial del sistema, si se acondicionara un ambiente específicamente para la calibración de reflectores, teniendo en cuenta las medidas requeridas.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI)  
2013 *Hogares Por Tipo De Energía O Combustible Que Más Utilizan Para Cocinar*. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática. Consulta: 9 de setiembre de 2015.  
[http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1173/cap04/cap04029.xls](http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1173/cap04/cap04029.xls)
- [2] SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA SENAMHI  
2003 *Atlas De Energía Solar En El Perú*. Consulta: 10 de setiembre de 2015.  
[http://www.senamhi.gob.pe/pdf/atlas\\_solar.pdf](http://www.senamhi.gob.pe/pdf/atlas_solar.pdf)
- [3] GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL  
s/f *The 8 m2 Scheffler Reflector*. [Construction Manual]. Lima.
- [4] LEUENBERGER, Matthias  
s/f *Tracking-System for Scheffler-Reflectors of 8 or 10 m<sup>2</sup> Mechanical Clockwork*. [Manual]. Consulta: 20 de octubre de 2015.  
<http://www.solare-bruecke.org/Bauanleitungen/clockworkmanualv3.pdf>
- [5] WENDELIN, MAY, GEE  
2006 “Video Scanning Hartmann Optical Testing of State-of-the-Art Parabolic Trough Concentrators” En NREL. Consulta: 28 de Octubre de 2015.  
<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39590.pdf>
- [6] JONES Scott, NEAL Daniel, GRUETZNER James, HOUSER Richard, EDGAR Robert  
1996 “VSHOT: A Tool for Characterizing Large, Imprecise Reflectors.” Albuquerque, New Mexico. Consulta: 23 de setiembre de 2015.

- [7] DIVER Richard, MOSS Timothy  
2007 “Practical Field Alignment of Parabolic Trough Solar Concentrators” En  
Journal of Solar Energy Engineering. Consulta: 10 de Octubre de 2015.  
[http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/TOPCAT\\_SOL-05-1198.pdf](http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/TOPCAT_SOL-05-1198.pdf)
- [8] BARRIGA GAMARRA, Benjamín  
2013 *Métodos de Diseño en Ingeniería Mecánica*. Lima: Pontificia Universidad  
Católica del Perú.
- [9] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE  
1997 VDI-2225. Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches  
Konstruieren Vereinfachte Kostenermittlung. Düsseldorf, Noviembre.
- [10] MUNIR, A., O. HENSEL y W. SCHEFFLER  
2010 “Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator  
for a médium temperature applications”. *Science Direct*. Aislingen,  
Alemania. Consulta: 04 de setiembre de 2015.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10002021>
- [11] MANAKOV, Alkhazur, Hans-Peter SEIDEL e Ivo Ihrke  
2011 “A Mathematical Model and Calibration Procedure for Galvanometric  
Laser Scanning Systems”. En *Vision, Modeling and Visualization*  
Consulta: 16 de octubre de 2015.  
<http://people.mmci.uni-saarland.de/~amanakov/download/vmv11a.pdf>
- [12] GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL PUCP  
2012 Nuestros Proyectos. Consulta: 10 de Setiembre de 2015.  
[http://gruporural.pucp.edu.pe/nuestros\\_proyectos/](http://gruporural.pucp.edu.pe/nuestros_proyectos/)
- [13] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION IEC  
1993 *IEC-60825-1*. Safety of Laser Products. Geneve, Suiza.

- [14] BOUGUET, Jean-Yves  
2015 Camera Calibration Toolbox for Matlab. Consulta: 18 de Noviembre de 2015.  
[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)
- [15] SOLARE BRÜCKE  
2015 Los Reflectores Scheffler. Consulta: 03 de Septiembre de 2015.  
[http://www.solare-bruecke.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2&Itemid=2&lang=es](http://www.solare-bruecke.org/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=2&lang=es)
- [16] INSTITUTO TÉCNICO DE LA ESTRUCTURA DE ACERO  
2015 Estructuras Metálicas. Veintidós volúmenes. Gipuzkoa: ITEA. Consulta 15 de noviembre.  
[https://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Acero/Textos/TOMO13.pdf](https://www.uclm.es/area/ing_rural/Acero/Textos/TOMO13.pdf)
- [17] ZEHNDER, Rene, James BURGE and Chunyu ZHAO  
1991 “Use of computer generated holograms for alignment of complex null correctors”. En *SPIE*, vol. 1396. Consulta: 20 de septiembre de 2015.  
[http://www.gmto.org/Resources/GMT-ID-01447-SPIE2006\\_6273-112\\_v3c.pdf](http://www.gmto.org/Resources/GMT-ID-01447-SPIE2006_6273-112_v3c.pdf)
- [18] VALVERDE REBAZA, Jorge  
2007 “Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny”. Trujillo: Escuela Académico Profesional de Informática – Universidad Nacional de Trujillo. Consulta: 26 de marzo de 2016.  
[https://www.researchgate.net/publication/267240432\\_Deteccion\\_de\\_bordes\\_mediante\\_el\\_algoritmo\\_de\\_Canny](https://www.researchgate.net/publication/267240432_Deteccion_de_bordes_mediante_el_algoritmo_de_Canny)