

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE
IRRADIANCIA DIRECTA EN PIRANÓMETROS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA
MECATRÓNICA**

AUTOR

Gerardo Raúl Quispe Ochoa

ASESOR

Ph.D. Jan Amaru Palomino Töfflinger

Lima, Diciembre, 2020

RESUMEN

Actualmente, se utiliza el piranómetro como instrumento de medición de la irradiancia global (suma de las irradiancias directa y difusa). Sin embargo, los distintos tipos de irradiancia tienen un distinto rendimiento en las tecnologías de paneles fotovoltaicos que recientemente se están estudiando. Por lo tanto, el rendimiento de un panel está ligado a las cantidades de irradiancia de cada tipo y, por ende, deben ser cuantificadas para la evaluación del rendimiento de los paneles fotovoltaicos. Entonces se propone el diseño conceptual de un sistema de filtrado de irradiancia directa en piranómetros para que un usuario pueda cuantificar de forma automatizada estos tres tipos de irradiancia con un solo piranómetro.

Anterior al diseño conceptual, se realiza un estudio del fundamento teórico sobre la radiación solar y las tecnologías existentes comerciales para la problemática. Luego, la lista de requerimientos es planteada según exigencias del laboratorio de paneles fotovoltaicos de la sección de Física de la PUCP y de la aplicación. En base a esta lista, se desarrollan los conceptos de solución siguiendo la metodología de diseño mecatrónico VDI 2206 y metodología de diseño de productos VDI 2221. Posteriormente, los conceptos de solución son evaluados técnica y económicamente según la metodología VDI 2225. Finalmente, se concluye con el desarrollo del concepto de solución óptimo del sistema. Este cumple con la propuesta de diseño de este documento y se encuentra listo para un próximo diseño de ingeniería.

INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	i
INDICE DE CONTENIDO	ii
INDICE DE TABLAS	iv
INDICE DE FIGURAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	3
1.1. PROBLEMÁTICA	3
1.2. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIÓN	9
1.3. ALCANCE	9
1.4. OBJETIVOS	9
1.5. METODOLOGÍA APLICADA.....	10
II. ESTADO DEL ARTE	12
2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO	12
2.1.1. Energía solar	12
2.1.2. Radiación solar	15
2.1.3. Declinación solar	16
2.1.4. Tiempo solar verdadero	17
2.1.5. Dirección de la radiación solar directa	18
2.2. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA	20
2.2.1. Modelos comerciales	20
2.2.2. Patentes	23

2.3.	SENSORES	26
2.3.1.	Sensores de desplazamiento angular	26
2.3.2.	Sensores de contacto.....	27
2.4.	ACTUADORES Y MECANISMOS	28
2.4.1.	Motores eléctricos.....	29
2.4.2.	Mecanismos de reducción de velocidad angular	30
III.	DISEÑO CONCEPTUAL	32
3.1.	LISTA DE REQUERIMIENTOS.....	32
3.2.	BLACK BOX	36
3.3.	LISTA DE FUNCIONES	39
3.4.	MATRIZ MORFOLÓGICA.....	45
3.5.	CONCEPTOS DE SOLUCIÓN	49
3.6.	EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA	56
3.6.1.	Criterios de evaluación	56
3.6.2.	Evaluación técnica.....	58
3.6.3.	Evaluación económica.....	60
3.6.4.	Gráfico técnico-económico.....	61
3.6.5.	Concepto de solución óptimo	62
	CONCLUSIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA	66
	ANEXOS	69

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2. 1: Tabla comparativa de modelos comerciales	23
Tabla 2. 2: Tabla comparativa de patentes.....	25
Tabla 2. 3: Tabla comparativa de sensores para velocidad angular.....	27
Tabla 2. 4: Tabla comparativa de motores.....	30
Tabla 2. 5: Tabla comparativa de transmisión	31
Tabla 3. 1: Soluciones escogidas en el dominio mecánico.....	46
Tabla 3. 2: Soluciones escogidas en el dominio de sensores.....	46
Tabla 3. 3: Soluciones escogidas en el dominio de actuadores	47
Tabla 3. 4 : Soluciones escogidas en el dominio de energía	47
Tabla 3. 5: Soluciones escogidas en el dominio de control	48
Tabla 3. 6: Soluciones escogidas en el dominio de interfaz	48
Tabla 3. 7: Criterios técnicos	57
Tabla 3. 8: Criterios económicos 1 de 2	57
Tabla 3. 9: Criterios económicos 2 de 2	58
Tabla 3. 10: Evaluación técnica 1 de 2	58
Tabla 3. 11: Evaluación técnica 2 de 2	59
Tabla 3. 12: Evaluación técnica – Resumen y ponderación	59
Tabla 3. 13: Evaluación económica	60
Tabla 3. 14: Evaluación económica - Resumen y ponderación.....	61

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. 1: Costo total promedio para proyectos fotovoltaicos instalados para servicios públicos.....	4
Figura 1. 2: Crecimiento anual promedio del uso de energías renovables en OECD entre 2000-2018	4
Figura 1. 3: Eficiencia de módulos por marcas (1976-present).....	5
Figura 1. 4: Factores que influyen en rendimiento de módulos fotovoltaicos.....	5
Figura 1. 5: Irradiación mensual en Lima, Perú.....	7
Figura 1. 6: Irradiancia global, directa y difusa espectral en una superficie horizontal.	7
Figura 1. 7: Respuesta espectral de células basadas en distintos materiales fotovoltaicos.....	8
Figura 2. 1: Variación de la radiación recibida fuera de la atmósfera terrestre	14
Figura 2. 2: Espectro de radiación solar en la tierra	14
Figura 2. 3: Tipos de radiación solar	16
Figura 2. 4: Variación de la declinación durante un año	17
Figura 2. 5: Coordenadas del sol relativas al observador en tierra en un punto O	19
Figura 2. 6: RSB-01S Rotating Shadow Band montado con un MS-711	21
Figura 2. 7: RSR-01 Radiometer Shadow Ring.....	21
Figura 2. 8: SPN1 Piranómetro Solar para Radiación Global Difusa.....	22
Figura 2. 9: STR-21G-S2 Sistema de Monitorización Solar	23
Figura 2. 10: Patente para soporte y banda para piranómetro.....	24
Figura 2. 11: Patente para un sensor de radiación solar difusa, directa y total.....	25
Figura 2. 12: Sensor de fin de carrera	28
Figura 3. 1: Black box del sistema.....	37
Figura 3. 2: Dominio mecánico	39

Figura 3. 3: Dominio de sensores	40
Figura 3. 4: Dominio de actuadores	41
Figura 3. 5: Dominio de energía	42
Figura 3. 6: Dominio de control.....	43
Figura 3. 7: Dominio de interfaz.....	44
Figura 3. 8: Concepto de solución 1, vista general	50
Figura 3. 9: Concepto de solución 1, vista de componentes	50
Figura 3. 10: Concepto de solución 1, parte posterior	51
Figura 3. 11: Concepto de solución 2, vista general	52
Figura 3. 12: Concepto de solución 2, vista de componentes	52
Figura 3. 13: Concepto de solución 2, parte posterior	53
Figura 3. 14: Concepto de solución 3, vista general	54
Figura 3. 15: Concepto de solución 3, esfera deslizante.....	54
Figura 3. 16: Concepto de solución 3, vista de componentes	55
Figura 3. 17: Concepto de solución 3, parte posterior	55
Figura 3. 18: Gráfico técnico-económico entre los conceptos de solución	62
Figura 3. 19: Concepto de solución óptimo, vista general.....	63
Figura 3. 20: Concepto de solución óptimo, vista de componentes.....	64
Figura 3. 21: Concepto de solución óptimo, vista posterior	64

LISTA DE SÍMBOLOS

G_0 : Valor de la constante solar en el día n [W/mm^2]

n : Día del año numerado desde el primero de enero ($n=1$) hasta el 31 de diciembre ($n=365$)

ρ : Factor de corrección de la distancia Sol-Tierra

TSV: Tiempo solar verdadero

TE: Tiempo estándar

L_s : Longitud del meridiano estándar para la hora local [$^\circ$]

L_e : Longitud local [$^\circ$]

E : Ecuación del tiempo [min]

Θ_z : Ángulo cenital [$^\circ$]

ϕ : Latitud [$^\circ$]

δ : Declinación [$^\circ$]

ω : Tiempo solar verdadero [$^\circ$]

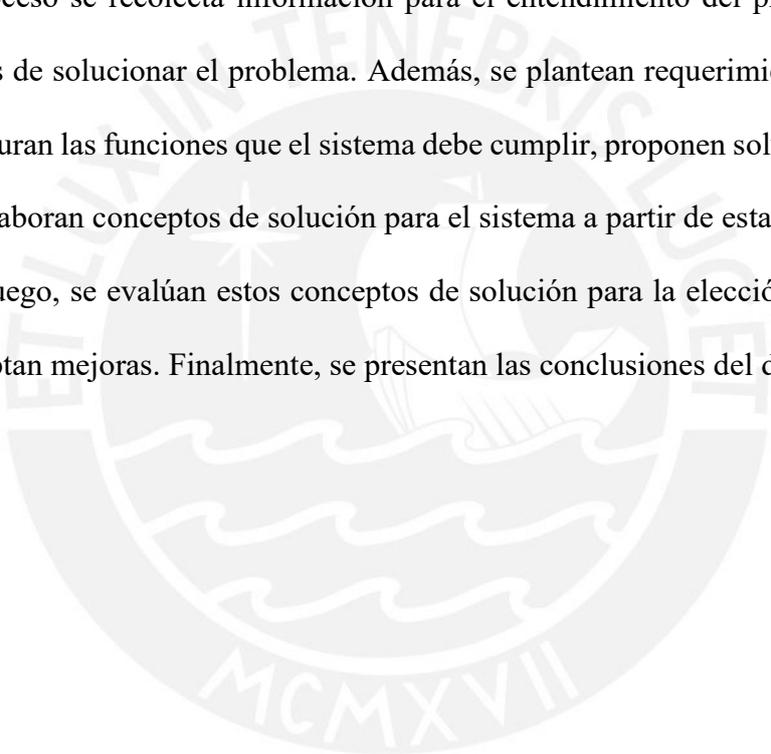
γ_s : Ángulo azimutal [$^\circ$]

INTRODUCCIÓN

La humanidad demanda cada vez más energía eléctrica para el funcionamiento de las actividades de diversos sectores (industrial, doméstico, agrícola, etc.), y cada vez es más común solicitar que la fuente de esta energía sea sostenible en el tiempo. Es entonces que el uso de tecnologías fotovoltaicas para la generación de energía eléctrica entra como una solución. Esta energía, que proviene desde el sol hasta el panel, sufre de transformaciones al entrar a la atmósfera terrestre y dejar de viajar por el vacío. De estas transformaciones, surgen las clasificaciones como irradiancia directa e irradiancia difusa. Estos tipos de irradiancia tienen un efecto distinto dependiendo de la tecnología que se emplee para su transformación. Sin embargo, al momento de adquirir un panel fotovoltaico, este tiene detalles sobre su generación de potencia medidos en condiciones estándares de medida (CEM). Ante esto, la tecnología adquirida puede tener un rendimiento menor o incluso mayor al medido en CEM. Para estudiar este efecto, se evalúa el rendimiento de las distintas tecnologías de paneles bajo distintas condiciones ambientales reales, las cuales son variantes en el tiempo (entre estas condiciones la irradiancia global, directa y difusa). Para conocer dichas condiciones ambientales se utilizan diversos sensores y, en específico, para sensar la irradiancia se utiliza un piranómetro. Aunque no basta con usar simplemente un piranómetro, pues si ese fuese el caso, solo se sensaría la irradiancia global. Para la medición de la irradiancia difusa en base a un instrumento de

medición de irradiancia global, es decir, un piranómetro; se requiere de accesorios que filtren el efecto de la irradiancia directa sobre este instrumento. Para el caso de la irradiancia directa, se utilizan los pirheliómetros o se puede calcular hallando la diferencia entre la irradiancia global y la irradiancia difusa.

En este documento se plantea el diseño conceptual de un sistema para el filtrado de irradiancia directa sobre un piranómetro desde la problemática hasta un diseño conceptual. Durante este proceso se recolecta información para el entendimiento del problema y de las maneras posibles de solucionar el problema. Además, se plantean requerimientos del sistema a diseñar, estructuran las funciones que el sistema debe cumplir, proponen soluciones para esas funciones y se elaboran conceptos de solución para el sistema a partir de estas soluciones para las funciones. Luego, se evalúan estos conceptos de solución para la elección de la mejor de estas y se le adaptan mejoras. Finalmente, se presentan las conclusiones del documento.



CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

En el presente capítulo se analizan los temas relacionados a la problemática de las investigaciones en la eficiencia de paneles solares y se plantea una solución a esta. Asimismo, se presentan los alcances del diseño y los objetivos que cumplirá este.

1.1 PROBLEMÁTICA

El aprovechamiento de la energía solar para el consumo eléctrico es una poderosa alternativa de las energías renovables para el reemplazo de las energías generadas convencionalmente a partir de combustibles fósiles. Esta tecnología representa un bajo impacto ambiental y, como se observa en la Figura 1.1, el costo por kW ha ido disminuyendo mientras que cada vez los proyectos ofrecen mayor potencia (el diámetro del círculo indica la capacidad de potencia del proyecto y la línea negra el promedio de costos para ese año). De esta manera, se ha masificado el uso de celdas fotovoltaicas a través de los años y esto se puede comprobar con su crecimiento anual promedio respecto otras fuentes de energía mostrado en la Figura 1.2.

Este crecimiento es consecuencia de las nuevas demandas energéticas que nacen por el desarrollo de la sociedad (Velasco, 2009).

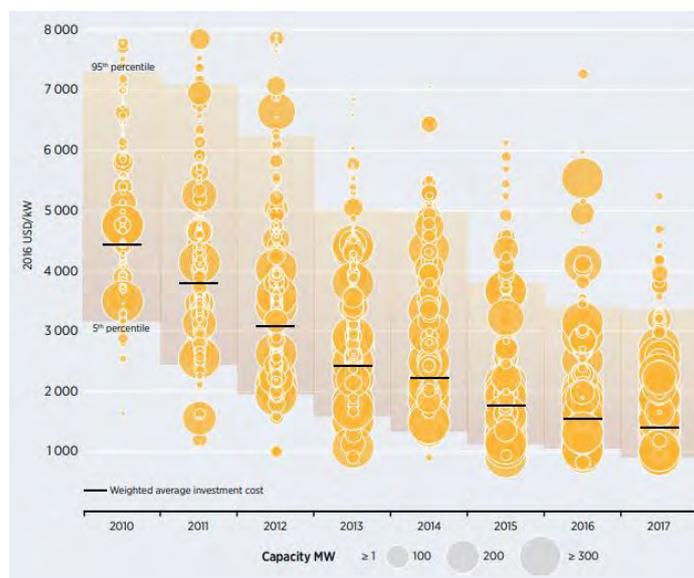


Figura 1. 1: Costo total promedio para proyectos fotovoltaicos instalados para servicios públicos ¹

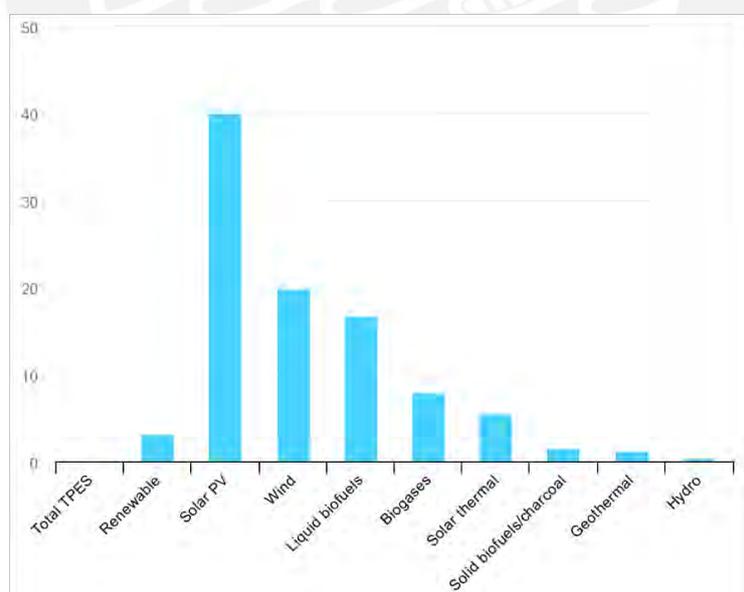


Figura 1. 2: Crecimiento anual promedio del uso de energías renovables en OECD entre 2000-2018 ²

¹ Fuente: Renewable Power Generation Costs in 2017 (IRENA, 2018)

² Fuente: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-annual-growth-rates-of-renewables-supply-in-oecd-2000-2018> (Consulta: 17/06/20)

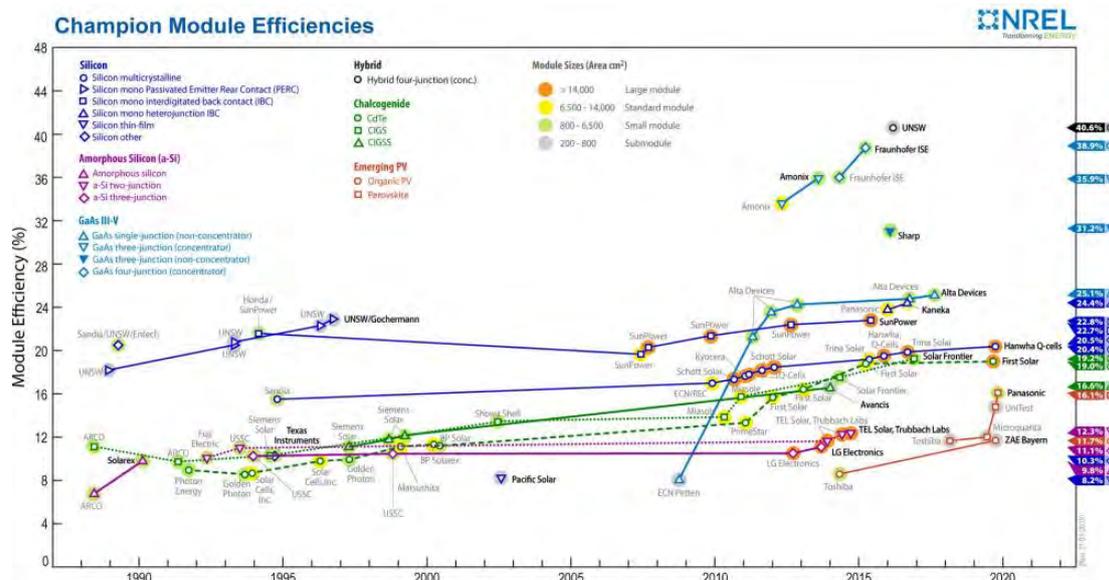


Figura 1. 3: Eficiencia de módulos por marcas (1976-present)³

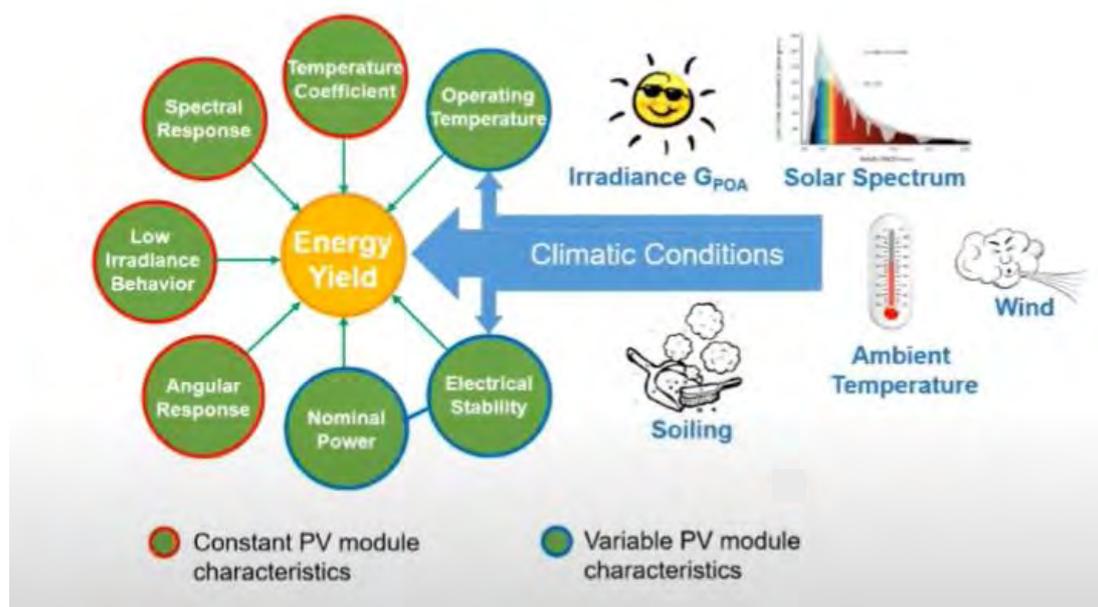


Figura 1. 4: Factores que influyen en rendimiento de módulos fotovoltaicos⁴

³ Fuente: <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html> (Consulta: 17/06/20)

⁴ Adaptado de Understanding the energy yield of PV modules (Schweiger et al., 2017)

Sin embargo, la energía solar que reciben los paneles no es transformada totalmente en energía eléctrica, sino es afectada por una eficiencia que, como se observa en la Figura 1.3, las investigaciones han apuntado a aumentar desde su invención. Se debe considerar además, que estas eficiencias fueron medidas en condiciones estándares de medida (CEM), que se definen como 1000 W/m^2 de irradiancia, con un espectro de AM 1,5 y una temperatura de 25°C en la celda fotovoltaica; no obstante, estas no son condiciones a las que realmente estará un panel durante su funcionamiento ni, como se ve en la Figura 1.4, todos los factores que realmente afectan el rendimiento de este (Whitaker & Newmiller, 1998).

Los factores externos, a excepción del polvo, son climáticos (irradiancia, temperatura, distribución espectral y viento) y dependen de la locación y época del año (Schweiger et al., 2017). Un ejemplo es de esta variación a lo largo de las épocas del año se encuentra en la Figura 1.5, donde existe una alta energía mensual recibida por metro cuadrado durante el verano; mientras que dicha energía disminuye notablemente durante los meses de invierno. Luego, como se aprecia en la Figura 1.6, los componentes directo y difuso tienen distribuciones espectrales distintas cada uno. Entonces, debido a que la ciudad de Lima, Perú tiene una cobertura de nubes entre 40% (en verano) y 90% (en invierno), es muy importante considerar el espectro difuso, que en el 2015 ocupó un mínimo del 45% de la irradiancia mensual limeña (Figura 1.5), pues este es causado por la dispersión de la luz en estas masas nubosas (Nicholson, 2011).

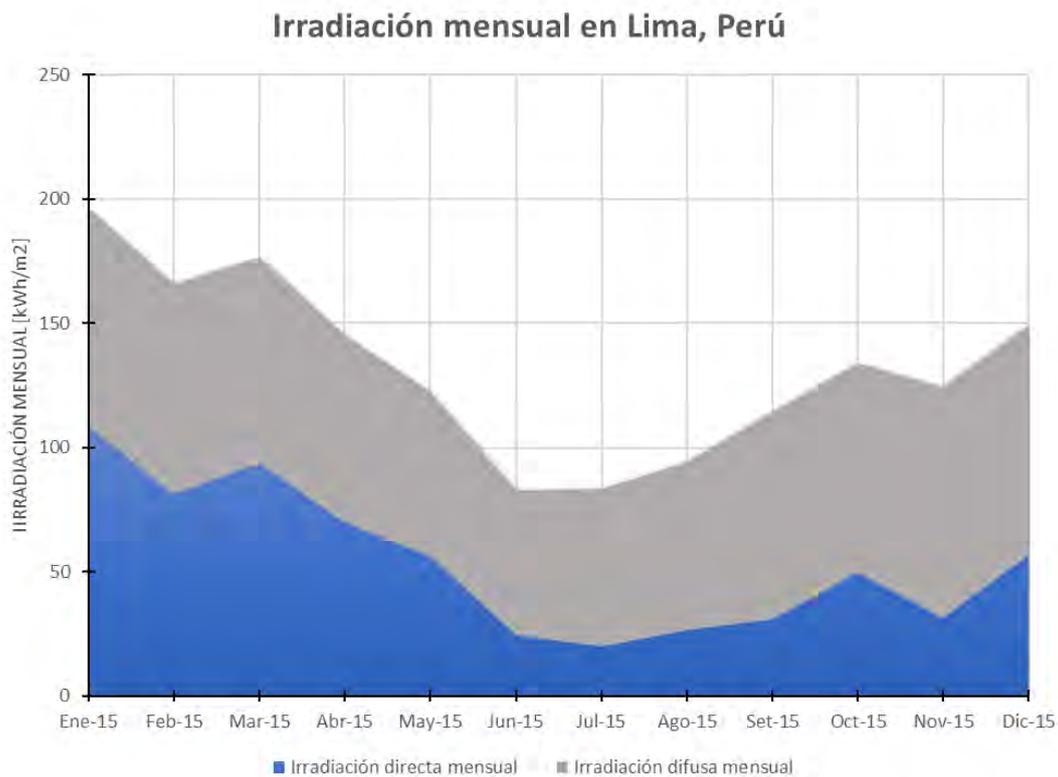


Figura 1. 5: Irradiación mensual en Lima, Perú⁵

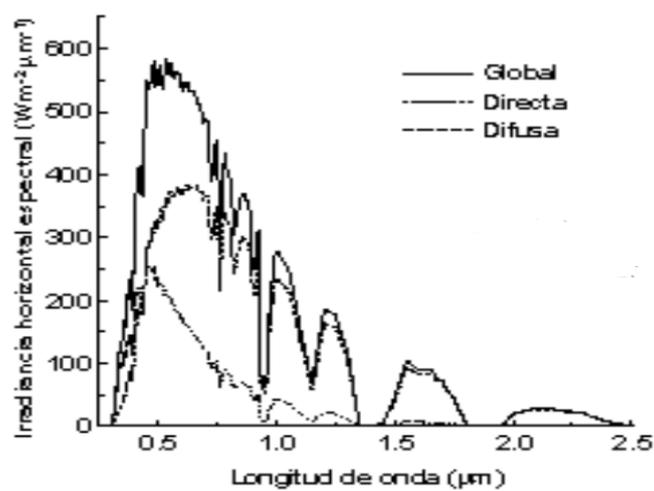


Figura 1. 6: Irradiancia global, directa y difusa espectral en una superficie horizontal⁶.

⁵ Adaptado de https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html (Consulta: 30/11/20)

⁶ Fuente: Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica (Wright, 2016)

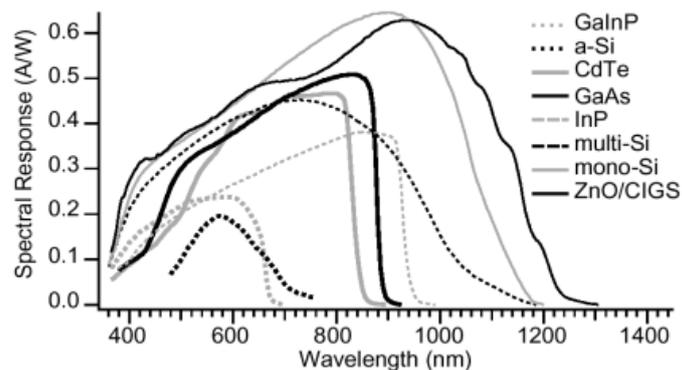


Figura 1. 7: Respuesta espectral de células basadas en distintos materiales fotovoltaicos⁷

Los factores internos constantes son características propias del material del cual está hecho el panel o su diseño como el coeficiente de temperatura, la respuesta espectral, el comportamiento a baja irradiancia y la respuesta angular. Entre estas características, la que más resalta es la respuesta espectral, pues esta determina en qué rango de longitudes de onda del espectro opera mejor el panel, tal como se ve en la Figura 1.7 que muestra las respuestas espectrales de distintos materiales.

De los factores externos e internos, se puede deducir de la Figura 1.6 y la Figura 1.7 que algunos materiales tienen una mejor respuesta ante una mayor irradiancia difusa. Esto se debe a que el espectro difuso tiene, en su mayoría, cortas longitudes de onda y los materiales que mejor absorban y conviertan la energía solar de este rango serán los beneficiados con esta condición. Debido a esto, algunos paneles otorgan una potencia mayor en Lima que la evaluada en CEM, mientras que otros paneles tienen el efecto inverso (Conde et al., 2019). Así, uno de los requerimientos para la evaluación óptima de rendimiento de paneles en una locación, es la cuantificación de los componentes de irradiancia directa y difusa en esta misma, y no solo la cuantificación de la irradiancia global.

⁷ Fuente: Fundamentos de la conversión fotovoltaica: La célula solar (Balenzategui, 2008)

1.2 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

Debido a la problemática planteada en la sección anterior, el presente documento propone el diseño de un sistema que filtre la irradiancia directa sobre un piranómetro cuando el usuario lo requiera. De esta manera, las estaciones meteorológicas convencionales serán capaces de medir no solo la irradiancia global, sino también la irradiancia difusa y calcular la irradiancia directa con la resta de las anteriores, sin tener la necesidad de adquirir sensores meteorológicos adicionales.

1.3 ALCANCE

A continuación, se presentan los alcances del trabajo de investigación:

- Se diseñará conceptualmente un sistema automatizado que permita la medición de irradiancia difusa a partir de un piranómetro
- El diseño debe adecuarse a las instalaciones del Laboratorio de Paneles Fotovoltaicos existente en la Sección de Física de la PUCP
- El sistema no debe afectar la medición de la irradiancia global del piranómetro

1.4 OBJETIVOS

A continuación, se describen el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo de investigación.

Objetivo general.

- Diseñar conceptualmente un sistema que filtre la irradiancia directa en un piranómetro cuando el usuario lo requiera. Con ello, el usuario será capaz de medir las irradiancias global y difusa, luego, calcular la irradiancia directa

Objetivos específicos.

- Realizar un estudio al fundamento teórico de la radiación solar y al estado de la tecnología de sistemas meteorológicos comerciales
- Definir la metodología a emplear para el diseño del sistema
- Diseñar tres conceptos de solución al problema
- Realizar una evaluación técnico-económica a los conceptos
- Elaboración de un concepto de solución óptimo

1.5 METODOLOGÍA APLICADA

El diseño conceptual del sistema se planteará en distintas etapas desde la perspectiva de la metodología de diseño mecatrónico VDI 2206 y metodología de diseño de productos VDI 2221; además, para la selección de soluciones óptimas se realizará mediante el método planteado por la norma VDI 2225.

Como primera etapa, se define la problemática y se propone una solución para esta. Además, se incluye el alcance de la solución propuesta y se fija el objetivo general y específicos

para lograr el diseño. Esta etapa ha sido desarrollada a lo largo de este capítulo y contribuye a fijar la mira del diseño.

Como segunda etapa, se investiga sobre la teoría relevante para el sistema, se documenta acerca de máquinas o investigaciones anteriores que aporten de manera total o parcial a solucionar la problemática. Con la información de este capítulo uno obtiene los conocimientos suficientes para un óptimo diseño.

Como última etapa, se procede establecer las exigencias que requiere el diseño en ámbitos mecánicos, eléctricos e informáticos, se determina las funciones que el sistema debe de realizar para lograr su función principal. Posteriormente, se realiza una matriz morfológica incluyendo distintos principios de solución por cada función. Luego, se plantean conceptos de solución como conjunto de principios de solución de la matriz morfológica y se evalúan con criterios técnico-económicos para una solución óptima. Finalmente, se elabora un concepto de solución óptimo basado en los resultados de la evaluación anterior y se elaboran conclusiones del diseño.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se explica el fundamento teórico a considerar para el sistema y las tecnologías que se deben considerar para el diseño. Además, se presentan sensores, actuadores y mecanismos relevantes para el diseño.

2.1 FUNDAMENTO TEÓRICO

En la siguiente sección se analiza sobre la radiación solar y cómo se obtiene su dirección hacia la superficie terrestre.

2.1.1. Energía solar

La energía radiante proveniente del Sol tiene su origen, principalmente, en las fusiones de cuatro átomos de hidrógeno. Dicha energía se emite a un ritmo de $3,8 \times 10^{26}$ W hacia todas direcciones. Si se divide la anterior potencia por la superficie con centro en el Sol y radio igual a la distancia media Sol-Tierra = $1,49 \times 10^{11}$ m, se tendrá que se reciben $1353 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

(Constante solar G_0) como potencia de la radiación solar promedio fuera de la atmósfera. Esta potencia varía alrededor de factor de corrección, como se aprecia en la ecuación 2.1 y en la Figura 2.1, a causa de la variación de la distancia Sol-Tierra, ya que es una trayectoria elíptica (Jutglar, 2004).

$$G_0(n) = \frac{3,8 \times 10^{26}}{4\pi(1,49 \times 10^{11} \rho(n))^2} = \frac{1353}{\rho(n)^2} [\text{Wm}^{-2}] \quad (2.1)$$

Donde:

G_0 : Valor de la constante solar en el día n

n : Día del año numerado desde el primero de enero ($n=1$) hasta el 31 de diciembre ($n=365$)

ρ^2 : Factor de corrección de la distancia Sol-Tierra

La expresión para el factor de corrección con el error más bajo (0,01%) fue desarrollada en 1971 por Spencer y se muestra en la siguiente ecuación 2.2.a (Duffie & Beckman, 2013):

$$\rho^2 = (1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B)^{-1} \quad (2.2.a)$$

Donde:

$$B = (n - 1) \frac{2\pi}{365} [\text{rad}] \quad (2.2.b)$$

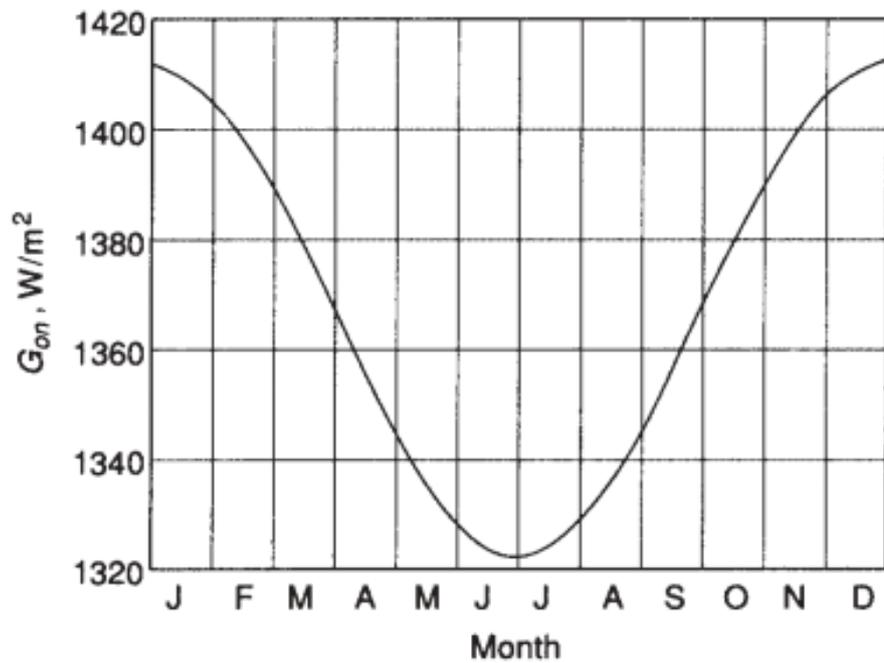


Figura 2. 1: Variación de la radiación recibida fuera de la atmósfera terrestre⁸

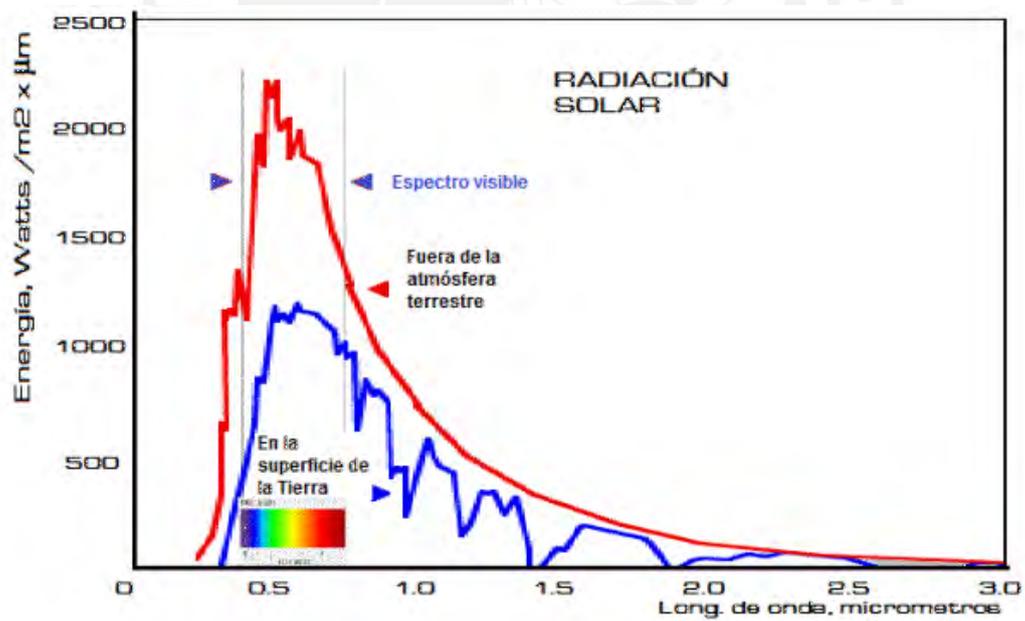


Figura 2. 2: Espectro de radiación solar en la tierra⁹

⁸ Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes (Duffie & Beckman, 2013)

⁹ Fuente: http://www.ecoefecto.com/tecnologia_fv.htm (Consulta: 04/05/20)

2.1.2. Radiación solar

La energía descrita anteriormente se transmite en forma de ondas electromagnéticas hasta la tierra. Estas tienen longitudes de onda comprendidas entre 250 y 6000 nm formando así el espectro solar, que no es más que la distribución de la potencia por unidad de superficie por unidad de intervalo de longitud de onda frente a la longitud de onda como se aprecia en la Figura 2.2. Esta radiación electromagnética interactúa con las moléculas de los gases de la atmósfera que es donde comienzan los fenómenos en esta. Una parte de la radiación es reemitida al espacio por la atmósfera; por ende, la gráfica del espectro solar decae. Los siguientes fenómenos (dispersión y reflexión), o ausencia de estos, dan lugar a los tipos de radiación que serán recibidos por los paneles, pues ya pasaron a través de la atmósfera terrestre y cuya suma conforma la radiación global (Velasco, 2009). Estos tipos de radiación son los apreciados en la Figura 2.3:

- Radiación directa: Aquella que parece proceder directamente del Sol. Tiene una dirección bien definida.
- Radiación difusa: Aquella producida por el fenómeno de dispersión en el cielo. Las moléculas de agua, polvo y aerosoles presentes en el aire generan que la luz que incide en ellos se disperse en varias direcciones.
- Radiación reflejada o albedo: Aquella que es reflejada por la superficie terrestre u objetos en esta. Su intensidad depende de la reflectancia del objeto en el cual la luz incide directamente y tiene un bajo o nulo impacto sobre superficies horizontales elevadas.

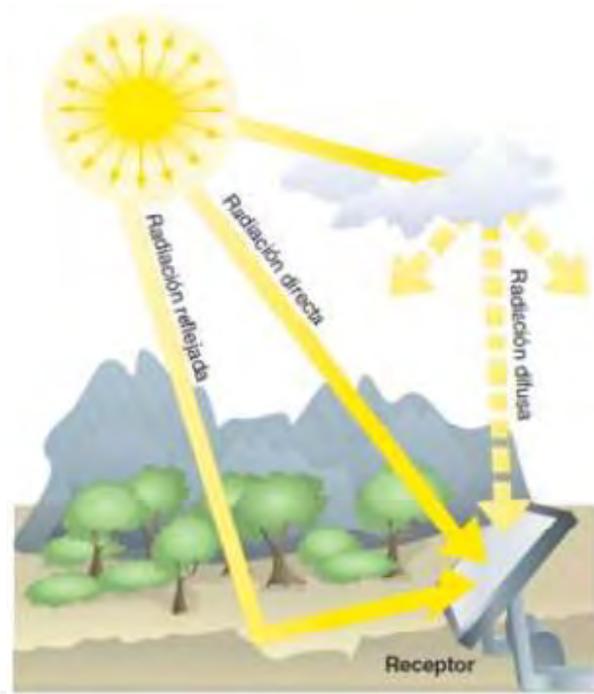


Figura 2. 3: Tipos de radiación solar¹⁰

2.1.3. Declinación solar

Es la posición angular del sol al mediodía respecto al ecuador con el positivo hacia el norte como se ve en la Figura 2.4. Este ángulo es causado por la inclinación del eje de la tierra ($23,45^\circ$) y su traslación alrededor del Sol. La ecuación con el menor error ($<0,035^\circ$) fue también publicada por Spencer y es la siguiente (Iqbal, 1983).

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B + 0.000907 \sin 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B \quad (2.3)$$

Donde:

B se calcula mediante la ecuación 2.2.b.

δ : Declinación [$^\circ$]

¹⁰ Fuente: Energía Solar Fotovoltaica (Adler et al., 2013)

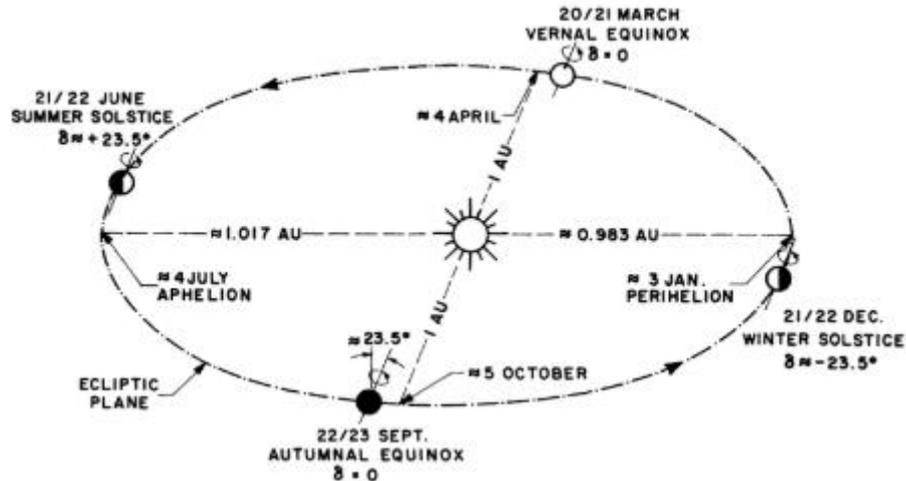


Figura 2. 4: Variación de la declinación durante un año¹¹

2.1.4. Tiempo solar verdadero

Tiempo basado en el movimiento aparente del sol a través del cielo con el mediodía como inicio del día (0:00). Esta es la hora usada en todas las relaciones angulares con el sol y no necesariamente coincide con la hora local. Para hallar el tiempo solar verdadero se utiliza la ecuación 2.4 (Duffie & Beckman, 2013).

$$TSV = TE + \frac{4min}{1^\circ} (L_s - L_e) + E \quad (2.4)$$

Donde:

TSV: Tiempo solar verdadero

TE: Tiempo estándar

L_s: Longitud del meridiano estándar para la hora local [°]

L_e: Longitud local [°]

E: Ecuación del tiempo [min]

¹¹ Fuente: An Introduction To Solar Radiation (Iqbal, 1983)

Para la Ecuación del tiempo utilizamos la expresión planteada por Spencer:

$$E=229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)[min] \quad (2.5)$$

Donde:

B se calcula mediante la ecuación 2.2.b.

E: Ecuación del tiempo [min]

2.1.5. Dirección de la radiación solar directa

El ángulo en el cual la radiación incidirá directamente la superficie terrestre se define a partir de los valores de la Figura 2.5 (Duffie & Beckman, 2013)

- Ángulo cenital (θ_z): Ángulo entre la vertical y la línea que va al sol. Es el ángulo de incidencia de la radiación directa.
- Altitud solar (α_s): Ángulo entre el plano horizontal y la línea que va al sol. Es el complemento del ángulo cenital.
- Ángulo azimutal o azimut (γ_s): Ángulo entre la línea norte-sur y la proyección de la línea que va al sol en el plano horizontal. Desplazamientos hacia el este desde el sur son negativos y al oeste desde el sur son positivos.
- Ángulo horario (ω): Es el ángulo equivalente al tiempo solar verdadero en radianes.

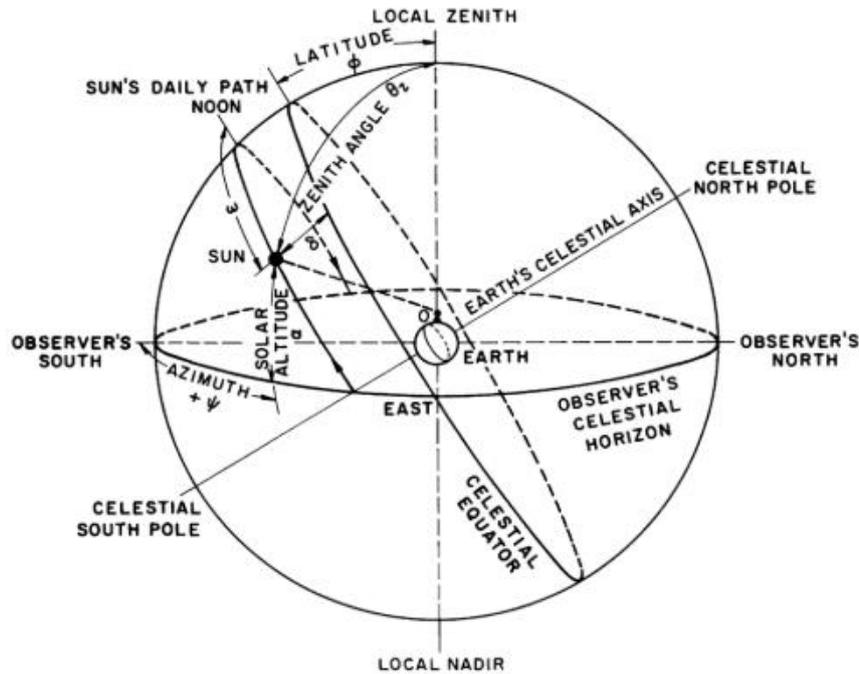


Figura 2. 5: Coordenadas del sol relativas al observador en tierra en un punto O¹²

Los ángulos mencionados se pueden relacionar con ángulos conocidos para su posterior cálculo como se puede ver en las siguientes ecuaciones:

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta \quad (2.6.a)$$

$$\gamma_s = \text{signo}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos\theta_z \sin\phi - \sin\delta}{\sin\theta_z \cos\phi} \right) \right| \quad (2.7)$$

Donde:

θ_z : Ángulo cenital [°]

ϕ : Latitud [°]

δ : Declinación [°]

ω : Tiempo solar verdadero [°]

γ_s : Ángulo azimutal [°]

¹² Fuente: An Introduction To Solar Radiation (Iqbal, 1983)

2.2. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

En la siguiente sección se analizan modelos comerciales existentes, patentes y tesis que cumplan la función del sistema que se plantea desarrollar.

2.2.1. Modelos comerciales

Se enlistan a continuación modelos comerciales que se aplican a la problemática planteada. Luego, se realiza una comparación entre estas en la Tabla 2.1.

RSB-01S Rotating Shadow Band.

Accesorio marca EKO para espectroradiómetros con una banda en forma de media luna para obstaculizar toda la ruta del sol durante el día (ver Figura 2.6). Posee un sensor GPS para no depender del ingreso de datos sobre locación, fecha y hora. Posee un ángulo de cobertura de 5° (ángulo del campo de captación de irradiancia de piranómetro que es bloqueado por el sistema), un error en el posicionamiento de hasta 2°, pesa 13 kgf y su comunicación es a través de un RS422 a USB. Se identifica el uso de motores como actuadores en el sistema y un sistema de sensado de posición angular para el control de la posición de la banda de sombreado. Se requeriría un solo piranómetro para la medición de irradiancia global y difusa; posteriormente se restarían para calcular la irradiancia directa (EKO INSTRUMENTS Co., 2019).



Figura 2. 6: RSB-01S Rotating Shadow Band montado con un MS-711¹³

RSR-01 Anillo de sombreado.

Accesorio marca EKO para piranómetros con un anillo inclinado ancho y ajuste manual (ver Figura 2.7). Posee un ángulo de cobertura de $13,6^\circ$, pesa 10,5 kgf y los cálculos para el ajuste los debe de hacer el usuario de acuerdo a su manual. Además, dichos ajustes deben realizarse periódicamente y la frecuencia depende de la latitud. Se requerirían 2 piranómetros para las mediciones de irradiancia global (sin el accesorio) y de irradiancia difusa (con el accesorio); posteriormente se restarían para calcular la radiación directa (EKO INSTRUMENTS Co., 2012a).



Figura 2. 7: RSR-01 Radiometer Shadow Ring¹⁴

¹³ Fuente: <https://eko-eu.com/es/products/energ%C3%ADa-solar> (Consulta: 04/05/20)

¹⁴ Fuente: <https://eko-eu.com/es/products/energ%C3%ADa-solar> (Consulta: 16/05/20)

SPN1 Piranómetro Solar para Radiación Global Difusa.

Piranómetro con anillos de sombreado internos, no requiere ajustes adicionales ni señales de entrada (ver Figura 2.8). Calentadores internos mantienen una alta temperatura en la cúpula para eliminar el rocío y nieve. El instrumento presentado es suficiente para las mediciones de irradiancia global, difusa y directa (Webb, 2014).



Figura 2. 8: SPN1 Piranómetro Solar para Radiación Global Difusa ¹⁵

STR-21G-S2 Sistema de Monitorización Solar.

Sistema meteorológico marca EKO que incluye una estructura, dos piranómetros, un pirheliómetro, un seguidor solar y un sistema de sombra (ver Figura 2.9). Además, permite implementarle un espectralradiómetro. El sistema tiene un peso 14,5 kgf sin los sensores meteorológicos instalados, posee un motor de paso y una comunicación RS232. Con este sistema se pueden medir directamente las irradiancias directa, difusa y global (EKO INSTRUMENTS Co., 2012b).

¹⁵ Fuente: <https://www.alphaomega-electronics.com/en/41-sensors-probes#/page-31> (Consulta: 25/12/20)



Figura 2. 9: STR-21G-S2 Sistema de Monitorización Solar¹⁶

Tabla 2. 1: Tabla comparativa de modelos comerciales

	RSB-01S Rotating Shadow Band	RSR-01 Anillo de sombreado	SPN1 Piranómetro Solar para Radiación Global Difusa	STR-21G-S2 Sistema de Monitorización Solar
Marca	EKO	EKO	DELTA T	EKO
Mide irradiancia global	Sí (en secuencia)	No (requiere de un piranómetro adicional)	Sí (en paralelo)	Sí (con piranómetro)
Mide irradiancia difusa	Sí (en secuencia)	Sí	Sí (en paralelo)	Sí (con piranómetro)
Mide irradiancia directa	No (pero se calcula)	No (pero se calcula)	Sí (en paralelo)	Sí (con pirheliómetro)
Consumo de corriente [mA]	6,8 mA	0 (No requiere)	2mA (Sin considerar calentador)	800 mA
Alimentación [V]	110-230 VAC	0 (No requiere)	5-15VDC	21-32VDC
Requiere atención manual	No	Sí	No	No
Masa	13 kg	10,5 kg	940 g	14,5 kg
Precio	9775 € sin impuestos	2575 € sin impuestos	5883 € sin impuestos	16995 € sin impuestos

Nota. Tomado de “INSTRUCTION MANUAL RSB-01”, por EKO INSTRUMENTS Co., 2019; “SPN1 Technical Fact Sheet v1.2d”, por Webb, 2014; “INSTRUCTION MANUAL RSR-01”, por EKO INSTRUMENTS Co., 2012a; “INSTRUCTION MANUAL SUN TRACKER SERIES”, por EKO INSTRUMENTS Co., 2012b.

¹⁶ Fuente: <https://eko-eu.com/es/products/energ%C3%ADa-solar> (Consulta: 16/05/20)

Solar radiation sensor - US 6,417,500 B1.

Inventada por John Graham Wood, consiste en una cúpula con 7 sensores dentro y anillos de sombra fijos dentro. De acuerdo con la patente, la lectura mínima de los 7 sensores es la mitad de la radiación difusa, la resta entre la máxima lectura y la mínima es la radiación directa. La radiación global sería, por ende, la suma entre la máxima y mínima lectura (Graham, 2002).

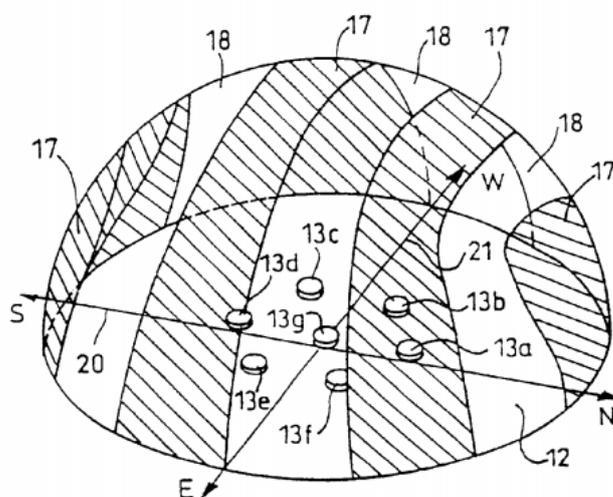


Figura 2. 11: Patente para un sensor de radiación solar difusa, directa y total¹⁸

Tabla 2. 2: Tabla comparativa de patentes

	<i>Shadow band pyranometer with shadow band</i>	<i>Solar radiation sensor</i>
Componentes electrónicos	Motor y sensor	Sensores
Ventaja	Adaptable a cualquier piranómetro	No requiere de accesorios adicionales
Desventaja	Bloquea una parte de la radiación difusa	Bloquea gran parte de la radiación difusa

Nota. Tomado de “United States Patent (Patent No. US 9,329,256 B2)”, por Dolce, R., & AccuFlux Inc., 2016; “United States Patent (Patent No. US 6,417,500 B1)”, por Graham, 2002.

¹⁸ Extraído de Patente US 6,417,500 B1 (Graham, 2002)

2.3. SENSORES

El sistema requiere conocer la posición del objeto usado para crear la sombra. Para lograr esto se estudiarán los sensores que se utilizan con este fin. Se describen brevemente y se comparan cualitativamente.

2.3.1. Sensores de desplazamiento angular

Dispositivos que convierten el movimiento angular en señal eléctrica. Estos son necesarios para conocer cuánto ha rotado un eje y, por medio de relaciones geométricas, establecer la posición de la sombra. Se pueden encontrar de distintos tipos en el mercado como los siguientes.

Encoder óptico incremental.

Se basa en una fuente de luz, un receptor y un disco con agujeros. El disco se acopla al eje que queremos caracterizar. A medida que gira los agujeros permiten el paso de luz de manera intermitente y generar un pulso eléctrico (DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS, 2017).

Encoder óptico absoluto.

Se basa en los mismos principios que el anterior, pero tiene varias pistas codificadas para que cada señal del *encoder* corresponda a una sola posición de la revolución del eje. Además, no requiere de dispositivos adicionales para realizar el *homing* (procedimiento para establecer

un sistema de referencia), pues el sensor ya indica la posición angular del eje (DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS, 2017).

Encoder magnético incremental.

Se usan dos sensores de efecto Hall alrededor del eje con imanes para detectar la variación del campo magnético y sentido de este. Con este sensor podemos determinar, además de la velocidad de giro, la dirección de giro (Navarro Collado, 2010).

Tabla 2. 3: Tabla comparativa de sensores de desplazamiento angular

	Óptico incremental	Óptico absoluto	Magnético
Resolución	Alta	Media	Alta
Puede trabajar bajo condiciones de suciedad	No	No	Si
Disponibilidad en el mercado	Muy alta	Alta	Alta
Robustez	Baja	Alta	Alta
¿Requiere homing?	Sí	No	Sí

Nota. Tomado de “¿QUÉ ES UN ENCODER, CUÁLES SON SUS TIPOS Y PARA QUÉ SIRVEN?”, por DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS., 2017; “Diseño e implementación de sensores de las variables de estado de un helicóptero”, por Navarro Collado, 2010.

2.3.2. Sensores de contacto

Son sensores que detectan la posición de un elemento móvil mediante el accionamiento mecánico (Grupo Novelec, 2018). Estos sensores son útiles para conocer la posición de la sombra ya que al iniciar se dirigirá a un estado fijado.

Sensor de fin de carrera.

Sensores que contienen un interruptor normalmente abierto, normalmente cerrado o un conmutador y cambian su estado cuando se entra en contacto con su cabezal. El contacto normalmente abierto solo hace contacto cuando cabezal es accionado, mientras que el contacto normalmente cerrado se separa del circuito cuando se acciona el cabezal. Las características para escoger uno son su tipo de accionamiento, tipo de conector, número de contactos, durabilidad y su tiempo de respuesta.



Figura 2. 12: Sensor de fin de carrera ¹⁹

2.4. ACTUADORES Y MECANISMOS

El sistema requiere posicionar un objeto en el espacio para provocar una sombra que cubra la zona deseada. Debido a esto, se proponen dichas tecnologías para generar un movimiento en el sistema.

¹⁹ Fuente: <https://paletosdelaelectronica.wordpress.com/2015/01/25/interruptores-fin-de-carrera-i/>
(Consulta:16/05/20)

2.4.1. Motores eléctricos

Actuadores que transforman la energía eléctrica en energía mecánica rotativa. Debido a que el sistema necesitará moverse, estos serán encargados de proporcionar la fuerza para ello. Algunos de los tipos de motores relevantes para el movimiento de sistemas son.

Motores sin escobillas.

Son motores que no utilizan escobillas para conmutar la polaridad del rotor. Debido a esto tienen una menor pérdida por fricción, una eficiencia mayor y producen mucho menos ruido. Además, su disipación de calor es mejor pues los bobinados están en la carcasa y requieren menor mantenimiento. Requieren de un control automatizado (Yedamale & Microchip Technology, 2003).

Motores de paso.

Motor basado en un motor sin escobillas que puede rotar con incrementos angulares precisos, sostener un torque al estar quieto y es controlable. No requiere retroalimentación (control de lazo abierto) y se caracterizan con pasos por revolución. Cada activación de los bobinados representa un paso y dicho paso un ángulo girado. (Fay, 2019).

Servomotores.

Actuador eléctrico que integra un motor, normalmente a CC, una caja reductora y la electrónica de control. De esta manera permite desplazarse a cualquier posición dentro de su rango de operación y mantenerse en este de acuerdo a una señal de entrada (Sánchez Muñoz, 2017).

Tabla 2. 4: Tabla comparativa de motores

	Sin escobillas	De paso	Servomotores
Precisión	Depende del sistema de control	Alta	Alta
¿Requiere hardware adicional?	Sistema de control y puente H	Puentes H o Driver	No
Disponibilidad en el mercado	Alta	Media	Alta
Robustez	Baja (Se eleva con control automático)	Alta	Alta

Nota. Tomado de “Pasos por revolución y ángulo de paso en motores paso a paso”, por Fay, 2019; “Evaluación experimental de servo motores para robótica aérea”, por Sánchez Muñoz, 2017; “AN885 Brushless DC Motor Fundamentals”, por Yedamale & Microchip Technology, 2013.

2.4.2. Mecanismos de reducción de velocidad angular

Los motores pueden ofrecer velocidades más altas que las que el sistema requiere y, dicha velocidad, puede ser reducida a partir de mecanismos conocidos. Además, al reducir dicha velocidad también se aumenta la precisión del posicionamiento, si se controla el desplazamiento del motor y se aplican relaciones geométricas para determinar el desplazamiento del eje final. Los mecanismos relevantes para el este diseño son las siguientes.

Sistema de engranajes.

Conformado por engranajes rectos o helicoidales. Son los más duraderos y resisten altas cargas, pues esta se distribuye sobre varios ejes. El trabajo gradual de los engranajes helicoidales les permite ser más silenciosos que el sistema de engranajes rectos (Compañía Levantina de Reductores S.L., 2019a).

Sistema de engranajes planetarios.

Conformado por un engranaje sol, un porta-planetas, la corona y los engranajes. Este sistema tiene una alta precisión y repetibilidad, eficiencia elevada, gran durabilidad y menores niveles sonoros (Compañía Levantina de Reductores S.L., 2019b).

Sistema tornillo sinfín-corona.

Conformado por la transmisión de un tornillo sin fin hacia una corona dentada. Este sistema tiene altos ratios de reducción, un eje de salida a 90° y requiere menor espacio. Sin embargo, las eficiencias de transmisión son bajas y su precisión media (Compañía Levantina de Reductores S.L., 2019c)

Tabla 2. 5: Tabla comparativa de transmisión

	Engranajes	Engranajes planetarios	Tornillo sinfín – corona
Repetibilidad	Baja	Alta	Baja
Durabilidad	Muy alta	Alta	Alta
Relación de transmisión	Baja	Media	Alta

Nota. Tomado de “Reductores de engranajes rectos helicoidales”, por Compañía Levantina de Reductores S.L, 2019a; “Reductores Planetarios”, por Compañía Levantina de Reductores S.L, 2019b; “Reductores Sinfín Corona”, por Compañía Levantina de Reductores S.L, 2019c.

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se exponen los requerimientos del diseño del sistema que debe cumplir para ser solución a la problemática. Con esta información se plantea la relación principal entre entradas y salidas del sistema; luego se plantean funciones que debe contener el sistema para lograr la relación principal. Seguidamente se proponen hasta tres soluciones por función identificada en una matriz y se trazan 3 conceptos de solución a través de esta. Por último, se realiza un análisis técnico-económico y, con ello, se elabora un concepto de solución óptimo.

3.1. LISTA DE REQUERIMIENTOS

El sistema a diseñar debe de cumplir los requerimientos (presentados en el Anexo A) que demanda el cliente y el mismo trabajo a realizar para cumplir con el objetivo general, un sistema que se acople a la estructura de un piranómetro para que este sea capaz de medir radiación difusa. Dentro de estos requerimientos se exponen exigencias y deseos para un diseño satisfactorio de la máquina.

- **Función principal:** El sistema debe suprimir el efecto de la radiación directa sobre un piranómetro. Este sistema debe buscar invadir en lo mínimo el resto de la radiación a medir cuando sea usado y no afectar en lo absoluto la medición si está en reposo.
- **Geometría:** El diseño total que comprende el sistema de sombreado, sistema electrónico y sistema de soporte no debe exceder los 50 cm x 20 cm x 30 cm. Esto porque el sistema de sombreado debe de estar sobre el piranómetro, cuya altura es 10 cm para un MS-80 (piranómetro que utiliza el laboratorio), pero el resto debe de estar debajo para no interferir en la irradiancia global.
- **Cinemática:** El diseño contempla el giro de un objeto sombreador en el espacio a través de un movimiento rotatorio con una resolución menor a 2° (como el RSB-01) por movimiento. Además, se contempla que el sistema pueda recorrer hasta 270° en máximo 50 segundos; por lo que la velocidad angular máxima a la que el sistema debe poder trabajar es 0,9 rpm.
- **Material:** Los materiales a usar exteriormente deben ser capaces de soportar la radiación del Sol, lluvia, polvo y humedad para minimizar la corrosión (condiciones de Lima). Es por eso que se requieren revestimientos según pruebas ISO 11997-2 o plásticos resistentes a radiación UV según pruebas ASTM D 2565 o ISO 4892-3. Además, la transmitancia del material para crear la sombra debe ser la mínima posible para el mejor filtrado de irradiancia directa según pruebas ISO 26723. Por último, se buscará que sea un sistema ligero (menor a la masa del RSB-01S, que son 13 kg) para que no afecte la inclinación inicial del sistema de soporte del piranómetro.

- **Materia:** La única materia que ingresa al sistema es la estructura sobre la cual se sujeta y se cuenta al sistema sujeto a la estructura como salida.
- **Energía:**

Entrada:

- **Energía eléctrica:** La energización del sistema será mediante alimentación por corriente alterna 220/60Hz. Se optó por separar la alimentación de este sistema del piranómetro para evitar interferencias con sus mediciones.
- **Irradiancia global:** Es la energía total por unidad de tiempo y de superficie que se dirige hacia el piranómetro.

Salida:

- **Irradiancia difusa:** Es la parte de la irradiancia global que no se filtra por el sistema.
 - **Calor:** Es el resultado de la liberación de la energía absorbida de la irradiancia global.
- **Software:** El desarrollo del software para el control del sistema y comunicaciones se realizará mediante entornos de desarrollo dedicados al controlador que se seleccione.
 - **Comunicación:** El usuario debe poder comunicarse con el sistema por medio del protocolo Modbus. Este será utilizado para proporcionar variables acerca de la posición,

el tiempo, la inclinación y si el sistema debe actuar o no; y el sistema indicar si ya se encuentra en la posición final.

- **Señales:**

Entradas:

- Parámetros de posición global (Latitud y Longitud)
- Parámetros de tiempo (Fecha y Hora UTC)
- Inclinación del sistema
- Señal de posicionar sistema

Salidas:

- Posición objetivo lograda
- Alerta de fallo del sistema

- **Control:** Se debe implementar un control de posición para el sistema de sombra.
- **Electrónica:** El sistema requiere sensores de desplazamiento angular y de contacto. Estos sensores serán utilizados para determinar la posición del sistema de sombreado en todo momento.

- **Seguridad y medio ambiente:** Debido a que no debe ingresar polvo ni lluvia al sistema, se determina un grado de protección IP65. En cuanto a restricciones medioambientales, se desea que el producto cumpla con la directiva RoHS 2002/95/CE
- **Montaje:** El sistema se fija sobre una plancha metálica en el laboratorio de paneles fotovoltaicos de la Sección de Física de la PUCP. Además, es desmontable para fines de mantenimiento.
- **Mantenimiento:** El mantenimiento del sistema debe tener la misma periodicidad de la calibración del piranómetro, que son 2 años y debe verificar la correcta alineación del sistema de sombreado.
- **Costos:** Los costos de diseño y fabricación no deben exceder el costo de la opción más económica para la solución del problema con productos comerciales (RSR-01 Anillo de sombreado y un piranómetro adicional), es decir 4460 €.
- **Control de calidad:** Se plantea un control de la transmitancia del sistema de sombreado en el Centro de Caracterización de Materiales (CAM-PUCP). Además, un control de la alineación de los ejes del sistema de sombreado en el taller de manufactura.

3.2. BLACK BOX

En la siguiente figura se muestran las entradas y salidas que el sistema a diseñar posee conforme a la lista de requerimientos para lograr la función principal (centro del Black box). Por el lado izquierdo se encuentran las entradas del sistema separadas por señales (flecha

discontinua), energía (flecha continua) y materia (flecha gruesa sin relleno). Y por el lado derecho se encuentran las salidas clasificadas igual que las entradas.

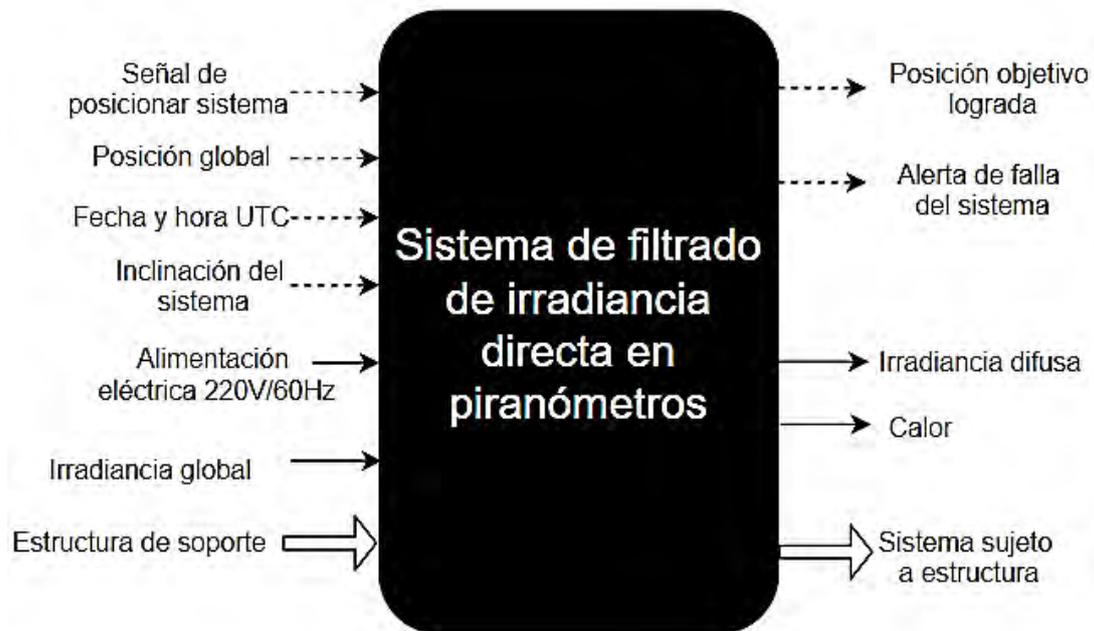


Figura 3. 1: Black box del sistema (Fuente: Elaboración propia)

Entradas

- **Señal de posicionar sistema:** Es la señal que el sistema recibe para conocer que debe retirar el sistema de sombra o moverlo para bloquear la radiación directa.
- **Posición global:** Es la señal que el sistema recibe y porta la información sobre la latitud y longitud en la cual se encuentra el sistema.
- **Fecha y hora UTC:** Es la señal que el sistema recibe y porta la información temporal para el sistema.

- **Inclinación del sistema:** Es la señal que porta información sobre el ángulo en el que el sistema se encuentra respecto al plano horizontal.
- **Alimentación eléctrica:** Es la energía con la cual se alimenta a todo el sistema.
- **Irradiancia global:** Es la energía total por unidad de tiempo y de superficie que se dirige hacia el piranómetro.
- **Estructura de soporte:** Es la estructura sobre la cual es montado el sistema.

Salidas

- **Posición objetivo lograda:** Señal que el sistema emite para indicar que se encuentra posicionado y el usuario pueda realizar la medición.
- **Alerta de falla del sistema:** Señal que el sistema emite para indicar que el motor se encuentra trabado.
- **Irradiancia difusa:** Es la parte de la irradiancia global que no se filtra por el sistema.
- **Calor:** Es el resultado de la liberación de la energía absorbida de la irradiancia global.
- **Sistema sujeto a estructura:** Es el resultado del montaje del sistema sobre la estructura.

3.3. LISTA DE FUNCIONES

En esta sección, se enlistan las funciones que el sistema a diseñar debe contener para lograr satisfacer la función principal, las entradas y salidas de la Black box separadas por dominios. Además, se describe e indican las entradas y salidas de cada función. Por último, se presenta la estructura de funciones global, como síntesis de las funciones por dominios.

Dominio mecánico

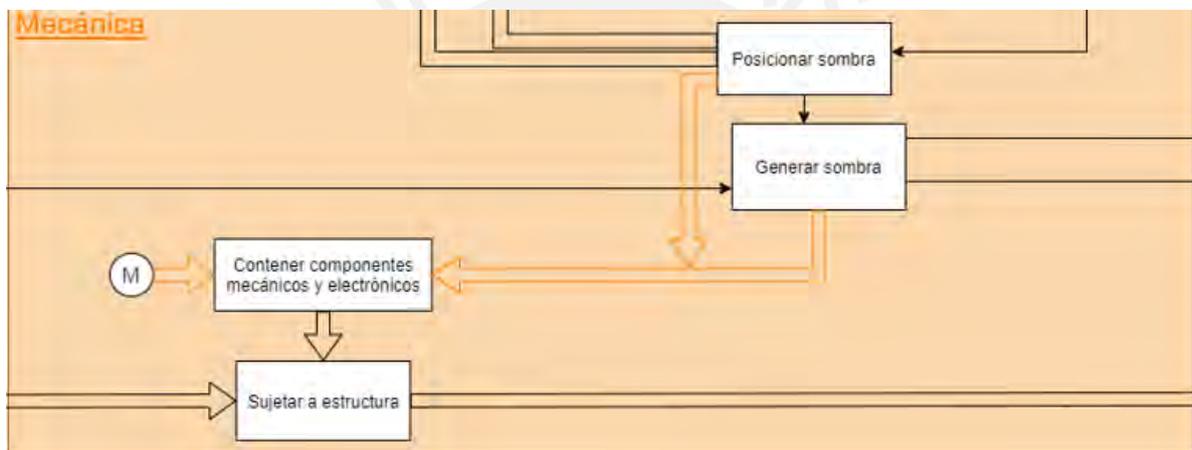


Figura 3. 2: Dominio mecánico (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se enlistan las funciones mostradas en la Figura 3. 2:

- **Posicionar sombra:** Mecanismo que desplaza la sombra. Ingresa la energía rotacional en el eje; mientras que sale el eje como materia a sensar y contener en la estructura.
- **Generar sombra:** Materia que genera sombra. Ingresa la irradiancia global y la energía rotacional para moverse; mientras que sale la irradiancia difusa, el calor absorbido de la radiación y el objeto como materia a contener en la estructura.

- **Contener componentes mecánicos y electrónicos:** Estructura del sistema encargado del soporte de los componentes. Ingresan los componentes como materia y entra en sujetar a estructura.
- **Sujetar a estructura:** Sistema de fijación del sistema a estructura. Ingresa la estructura a la cual se sujeta el sistema y la estructura; mientras que sale el sistema sujeto a estructura.

Dominio de sensores

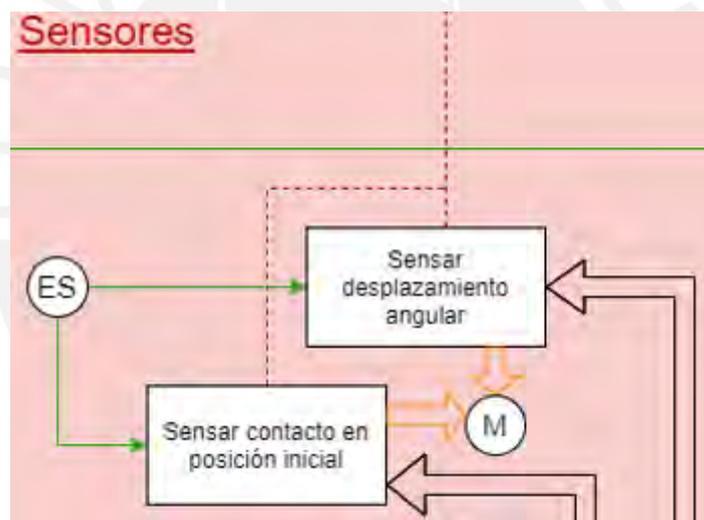


Figura 3. 3: Dominio de sensores (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se enlistan las funciones mostradas en la Figura 3. 3:

- **Sensar desplazamiento angular:** Mide la rotación angular que ha tenido el eje del motor. Ingresa el eje del motor y la energía eléctrica para su funcionamiento; mientras que sale la señal de desplazamiento angular y el componente como materia.

- **Sensar contacto en posición inicial:** Emite una señal cuando el sistema se encuentra en una posición conocida. Ingresa como materia el sistema de sombreado que entra en contacto con el sensor y la energía eléctrica para su funcionamiento; mientras que sale una señal que indica que el sistema de sombreado se encuentra en la posición inicial y el componente como materia.

Dominio de actuadores



Figura 3. 4: Dominio de actuadores (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se enlistan las funciones mostradas en la Figura 3. 4:

- **Accionar movimiento angular:** Proporciona la cinemática al sistema para posicionar la sombra. Ingresa la señal de control y energía eléctrica para su funcionamiento; mientras que sale la energía rotacional para posicionar la sombra y el componente como materia.

Dominio de energía

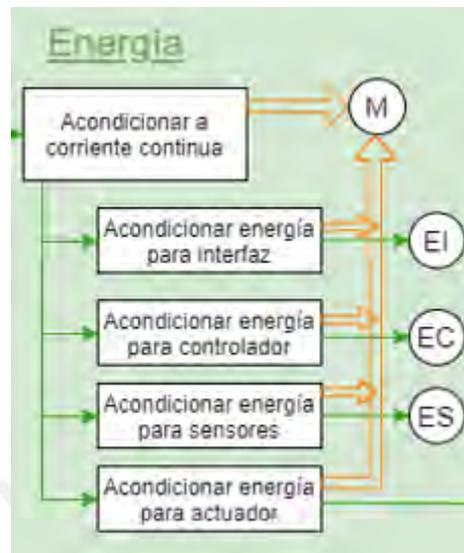


Figura 3. 5: Dominio de energía (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se enlistan las funciones mostradas en la Figura 3. 5:

- **Acondicionar a corriente continua:** Transforma la corriente alterna de entrada en corriente continua. Ingresas la alimentación eléctrica 220V a 60 Hz; mientras que sale energía eléctrica en corriente continua para la energización del sistema y los componentes como materia.
- **Acondicionar energía para interfaz:** Energiza los componentes de la interfaz. Ingresas energía eléctrica en corriente directa; mientras que sale la energía eléctrica en corriente directa hacia los componentes de la interfaz y el componente como materia.

- **Acondicionar energía para controlador:** Regula el voltaje para la alimentación del controlador. Ingresa la corriente continua; mientras que sale corriente continua al voltaje que el controlador requiere y el componente como materia.
- **Acondicionar energía para sensores:** Regula el voltaje para la alimentación de los sensores. Ingresa la corriente continua; mientras que sale corriente continua al voltaje que los sensores requieren y el componente como materia.
- **Acondicionar energía para actuador:** Regula el voltaje para la alimentación del actuador. Ingresa la corriente continua; mientras que sale corriente continua al voltaje que el actuador requiere y el componente como materia.

Dominio de control

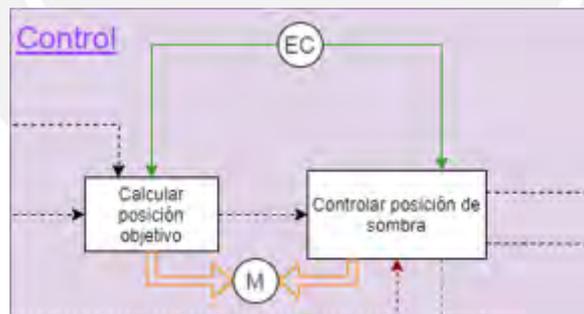


Figura 3. 6: Dominio de control (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se enlistan las funciones mostradas en la Figura 3. 6:

- **Calcular posición objetivo:** Calcula la posición que el sistema de sombreado debe de tener de acuerdo a las entradas del sistema. Ingresan las señales recibidas por el sistema

y la energía eléctrica para su funcionamiento; mientras que sale la posición en la que el sistema de sombreado debe estar y el componente como materia.

- **Controlar posición de sombra:** Controla la posición de sombra de acuerdo a la posición objetivo. Ingresa la señal de posición objetivo, de sensado de desplazamiento angular, de contacto en posición inicial y la energía eléctrica para su funcionamiento; mientras que sale la señal de control hacia el actuador de accionar movimiento angular, una señal de posición objetivo lograda y una señal de alerta en caso de fallas.

Dominio de interfaz

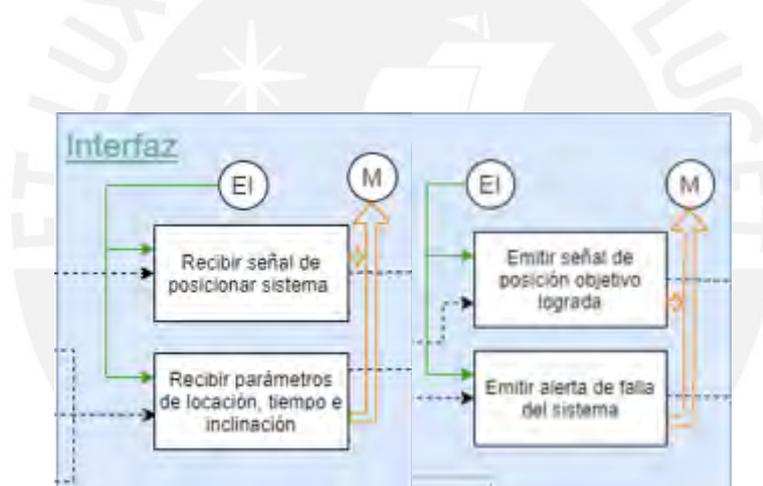


Figura 3. 7: Dominio de interfaz (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se enlistan las funciones mostradas en la Figura 3. 7:

- **Recibir señal de posicionar sistema:** Recibe la señal de posicionar el sistema para determinar si la posición objetivo será bloquear la radiación directa o retirar el sistema de sombra. Ingresa la señal de posicionar sistema proporcionada por el usuario y la energía eléctrica para su funcionamiento; mientras que sale la señal de posicionar sistema hacia el subsistema de control y el componente como materia.

- **Recibir parámetros de locación, tiempo e inclinación:** Recibe los parámetros para el cálculo de la posición de bloqueo de radiación directa. Ingresan las señales de posición global, fecha y hora UTC y la inclinación del sistema y la energía eléctrica para el su funcionamiento; mientras que sale la señal que contiene los parámetros hacia el subsistema de control y el componente como materia.
- **Emitir señal de posición objetivo lograda:** Avisa al usuario que el sistema se encuentra en la posición objetivo. Ingresan la señal de posición de sombra y la energía eléctrica para su funcionamiento; mientras que sale la señal de posición objetivo lograda del sistema y el componente como materia.
- **Emitir alerta de falla del sistema:** Avisa al usuario que el sistema está fallando. Ingresan la señal de alerta del control de posición de sombra y sale la señal de alerta de falla del sistema hacia el usuario.

El siguiente paso es sintetizar lo anterior mencionado en una estructura de funciones global (presentada en el Anexo B). Dicha estructura tiene las entradas y salidas planteadas en el Black box, las funciones separadas por dominios y las conexiones entre estas.

3.4. MATRIZ MORFOLÓGICA

En esta sección, se proponen hasta 3 soluciones por cada función presentada en la lista de funciones. Estas soluciones están basadas en el estado de la tecnología elaborado en la sección 2.2. Luego se elaborarán tres conceptos de solución a partir de flechas que unen las soluciones de las funciones a lo largo de la matriz morfológica presentada en el Anexo C.

Finalmente, se presenta la documentación de las soluciones escogidas por dominio para la elaboración de 3 conceptos de solución.

Dominio mecánico

A continuación, se presentan las soluciones escogidas en cada concepto de solución para el dominio mecánico.

Tabla 3. 1: Soluciones escogidas en el dominio mecánico (Fuente: Elaboración propia)

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Posicionar sombra	Eje con acople rígido	Eje con acople rígido	Eje a caja con engranajes planetarios
Generar sombra	Banda circular	Banda con doblez recto	Esfera deslizante en varilla
Contener componentes mecánicos y electrónicos	Carcasa única atornillada a base	Tapas separadas y soportes angulares	Carcasa única unida a base por <i>snap-fit</i>
Sujetar a estructura	Rosca hembra en la base (insertos roscados)	Rosca macho saliendo de base	Anclajes laterales

Dominio de sensores

A continuación, se presentan las soluciones escogidas en cada concepto de solución para el dominio de sensores.

Tabla 3. 2: Soluciones escogidas en el dominio de sensores (Fuente: Elaboración propia)

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Sensar desplazamiento angular	<i>Encoder</i> magnético	<i>Encoder</i> óptico incremental	<i>Encoder</i> óptico absoluto
Sensar contacto en posición inicial	Sensor de fin de carrera	Sensor de fin de carrera	Pulsador

Dominio de actuadores

A continuación, se presentan las soluciones escogidas en cada concepto de solución para el dominio de actuadores.

Tabla 3. 3: Soluciones escogidas en el dominio de actuadores (Fuente: Elaboración propia)

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Accionar movimiento angular	Motor a pasos y driver	Servomotor	Motor sin escobillas

Dominio de energía

A continuación, se presentan las soluciones escogidas en cada concepto de solución para el dominio de energía.

Tabla 3. 4 : Soluciones escogidas en el dominio de energía (Fuente: Elaboración propia)

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Acondicionar a corriente continua	Fuente conmutada	Fuente conmutada	Fuente lineal
Acondicionar energía para interfaz	Regulador de voltaje	<i>Step down DC-DC</i>	<i>Step down DC-DC</i>
Acondicionar a corriente continua	Fuente conmutada	Fuente conmutada	Fuente lineal
Acondicionar energía para interfaz	Regulador de voltaje	<i>Step down DC-DC</i>	<i>Step down DC-DC</i>
Acondicionar energía para controlador	Regulador de voltaje	<i>Step down DC-DC</i>	<i>Step down DC-DC</i>

Dominio de control

A continuación, se presentan las soluciones escogidas en cada concepto de solución para el dominio de control.

Tabla 3. 5: Soluciones escogidas en el dominio de control (Fuente: Elaboración propia)

Funciones		Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Hardware	Calcular posición objetivo	Microcontrolador	Microcontrolador embebido	Microprocesador embebido
	Controlar posición de sombra	Microcontrolador	Microcontrolador embebido	Microprocesador embebido
Software	Calcular posición objetivo	Algoritmo con las ecuaciones solares	Algoritmo con las ecuaciones solares	Red neuronal entrenada
	Controlar posición de sombra	Control PID	Lazo abierto	Control <i>Fuzzy</i>

Dominio de interfaz

A continuación, se presentan las soluciones escogidas en cada concepto de solución para el dominio de control.

Tabla 3. 6: Soluciones escogidas en el dominio de interfaz (Fuente: Elaboración propia)

Funciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Recibir señal de posicionar sistema	Módulo RS485	Módulo RS485	Módulo RS422
Recibir parámetros de locación, tiempo e inclinación	Módulo RS485	Módulo RS485	Módulo RS422
Emitir señal de posición objetivo lograda	Módulo RS485	Módulo RS485	Módulo RS422
Emitir alerta de falla del sistema	Módulo RS485	Módulo RS485	Módulo RS422

3.5. CONCEPTOS DE SOLUCIÓN

En esta sección, se detalla la integración de los conceptos de solución trazados a partir de la matriz morfológica. Además, se brinda un bosquejo general y uno interno para la apreciación de la interacción de las partes del sistema.

- **Concepto de solución 1**

El concepto de solución 1 propone el uso de una banda circular acoplada al eje mediante una chaveta. Este eje transmite el giro del motor mediante un acople rígido y está apoyado sobre un cojinete. El motor a pasos está sujeto a una placa y esta, a la base mediante tornillos. Luego, el motor a pasos recibe la señal de control de su driver montado a una PCB y que a la vez está controlado por un microcontrolador. Esta señal de control es calculada con al *encoder* magnético ubicado en la parte posterior del motor, un *homing* hecho gracias al sensor de fin de carrera y a los parámetros que se reciben por el módulo RS485, quien a la vez es la vía de comunicación para emitir una falla. Todos los elementos anteriores son energizados gracias a una fuente conmutada y reguladores de voltaje montados sobre la PCB. Además, los componentes electrónicos son sujetos mediante tornillos a la base o carcasa y esta se encuentra atornillada a tuercas para soldar en la base. Finalmente, quedan unos insertos roscados y ajustados en la base que proporcionan un agujero roscado exterior para el montaje en una estructura.

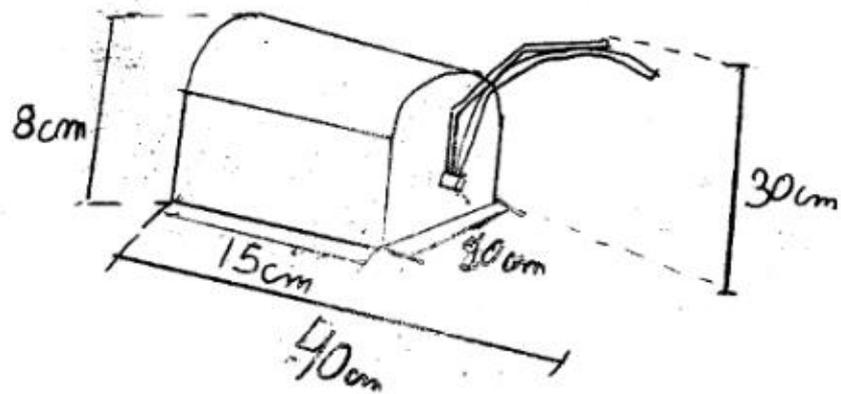


Figura 3. 8: Concepto de solución 1, vista general (Fuente: Elaboración propia)

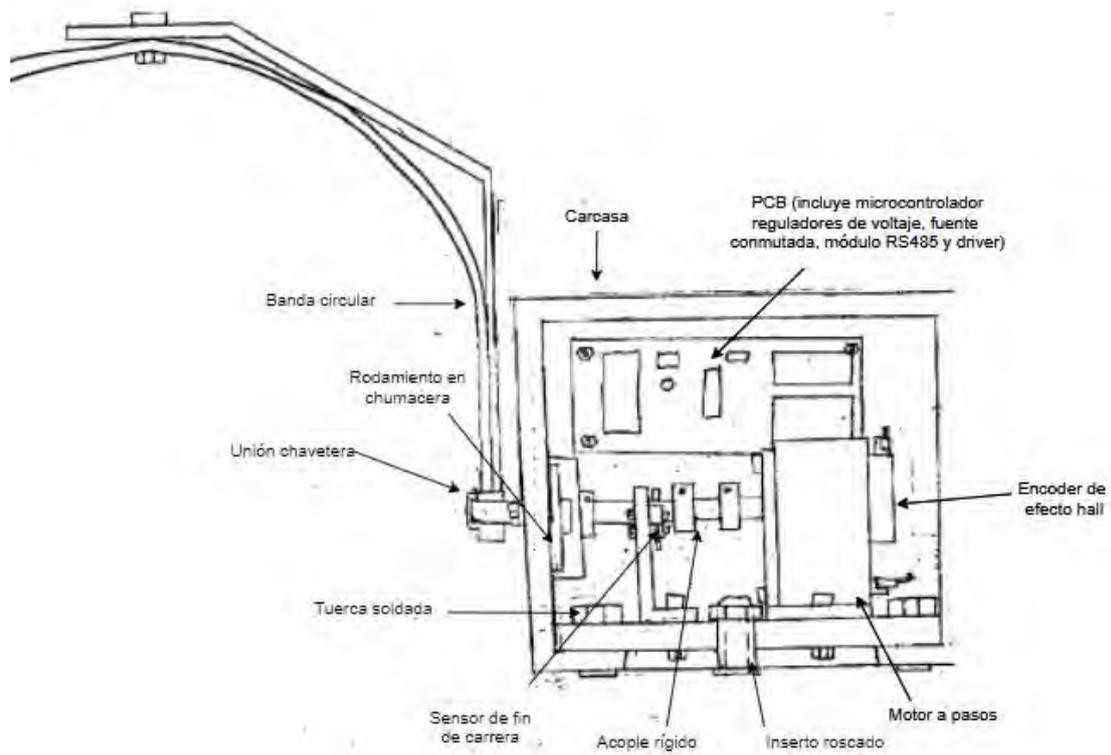


Figura 3. 9: Concepto de solución 1, vista de componentes (Fuente: Elaboración propia)

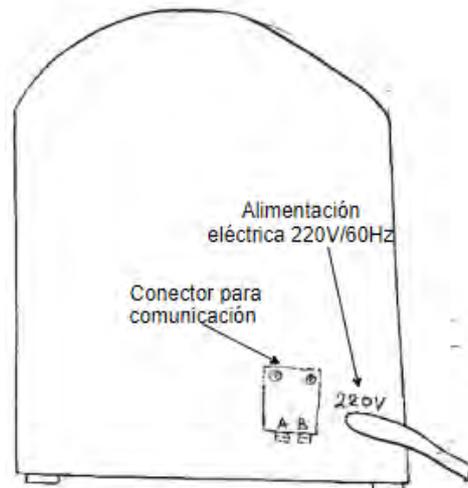


Figura 3. 10: Concepto de solución 1, parte posterior (Fuente: Elaboración propia)

- **Concepto de solución 2**

El concepto de solución 2 propone el uso de una banda con un doblez recto unida al eje mediante un tornillo prisionero. Este eje transmite el giro del motor mediante un acople rígido y está apoyado sobre un cojinete. El servomotor está sujeto a una placa y esta, a la base mediante un soporte angular. Luego, el servomotor recibe la señal de control de su driver y que a la vez está controlado por un microcontrolador embebido. Esta señal de control es calculada con el *homing* hecho al inicio con el sensor de fin de carrera y los parámetros que se reciben por el módulo RS485, quien a la vez es la vía de comunicación para emitir una falla (esta falla se identifica gracias al *encoder* óptico incremental). Todos los elementos anteriores son energizados gracias a una fuente conmutada y *steps down dc-dc*. Además, los componentes electrónicos son sujetos mediante tornillos a la base o tapas unidas mediante soportes angulares. Finalmente, los tornillos usados para los soportes angulares inferiores son usados también para sujetar el sistema a la estructura sobre la cual es montada.

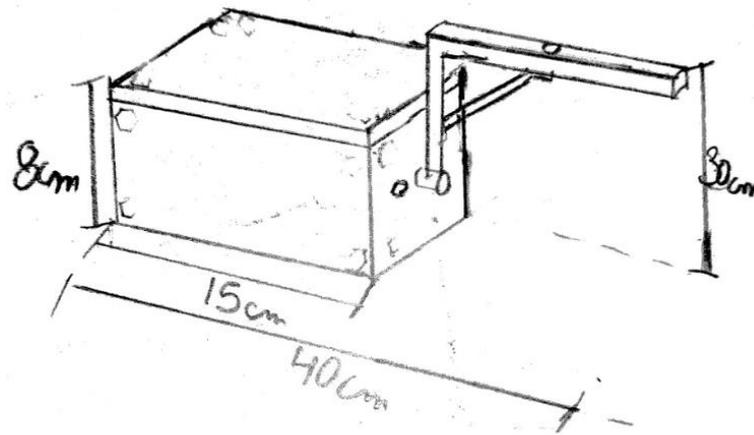


Figura 3. 11: Concepto de solución 2, vista general (Fuente: Elaboración propia)

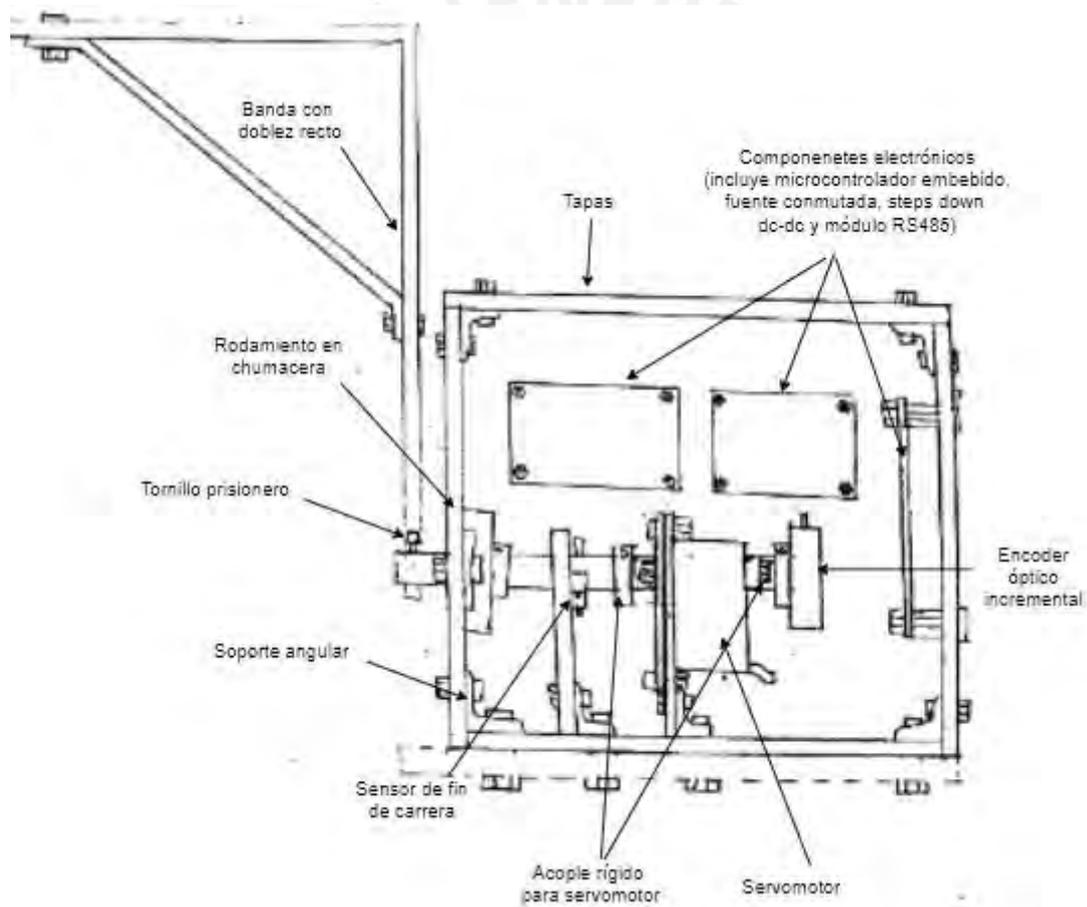


Figura 3. 12: Concepto de solución 2, vista de componentes (Fuente: Elaboración propia)

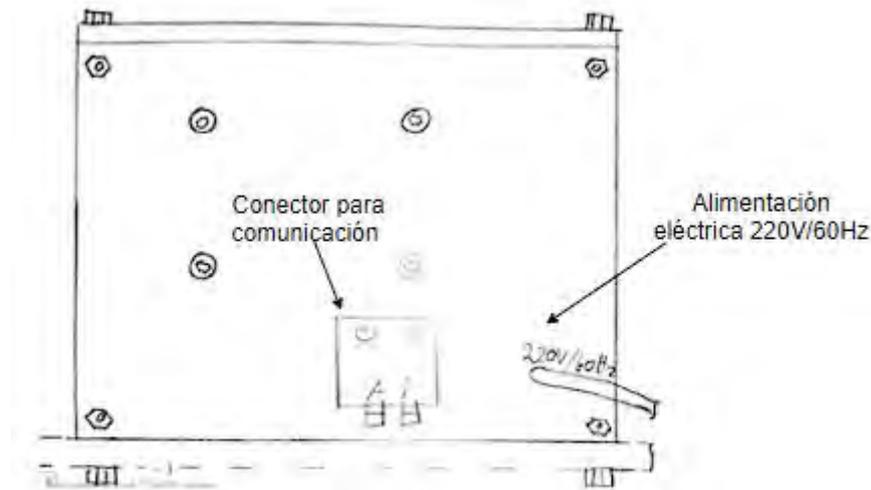


Figura 3. 13: Concepto de solución 2, parte posterior (Fuente: Elaboración propia)

- **Concepto de solución 3**

El concepto de solución 3 propone el uso de una esfera que se desliza manual y se fija mediante un tornillo a esta. Esta varilla está unida a una manivela y ajustada por interferencia. La manivela tiene una unión por forma al eje apoyado en un cojinete y dicho eje proviene de una caja que contiene un sistema de engranajes planetarios. El giro proporcionado a la caja proviene de un motor sin escobillas acoplado al eje de la caja. El motor está sujeto a una placa atornillada a la base. Luego, el motor recibe la señal de control de su driver y que a la vez está controlado por un microprocesador embebido. Esta señal de control es calculada con el *homing* hecho al inicio con el pulsador ubicado en una posición predeterminada y los parámetros que se reciben por el módulo RS422, quien a la vez es la vía de comunicación para emitir una falla (esta falla se identifica gracias al *encoder* óptico absoluto). Todos los elementos anteriores son energizados gracias a una fuente lineal y *steps down dc-dc*. Además, los componentes electrónicos son sujetos mediante tornillos a la base o carcasa y esta se encuentra unida a la

base por *snap-fit*. Finalmente, se utilizan soportes angulares exteriores para asegurar el sistema a la estructura sobre la cual será montado.

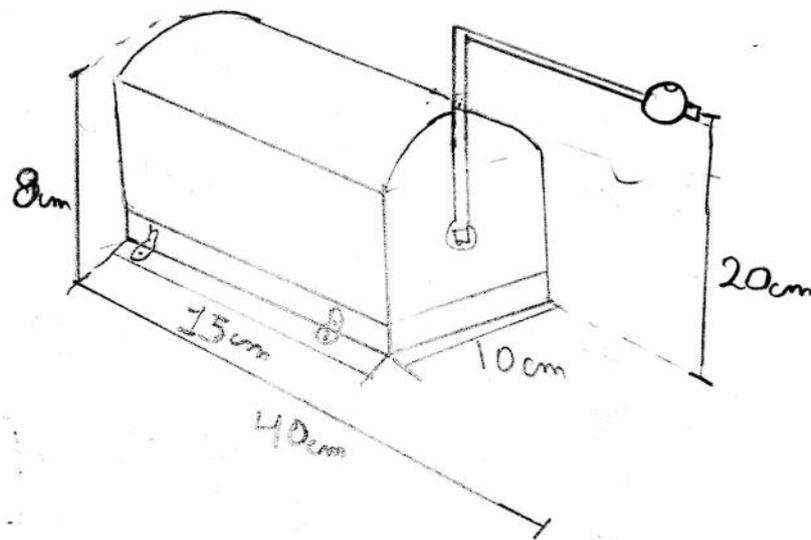


Figura 3. 14: Concepto de solución 3, vista general (Fuente: Elaboración propia)

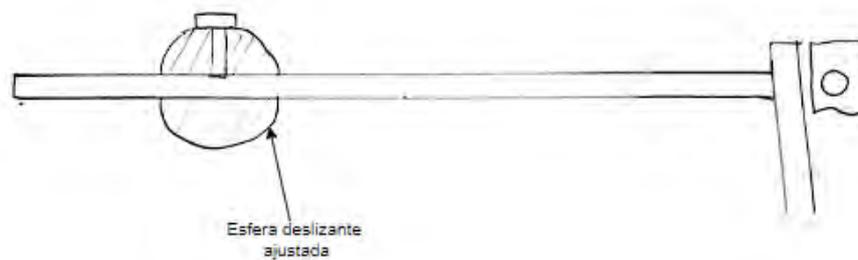


Figura 3. 15: Concepto de solución 3, esfera deslizante (Fuente: Elaboración propia)

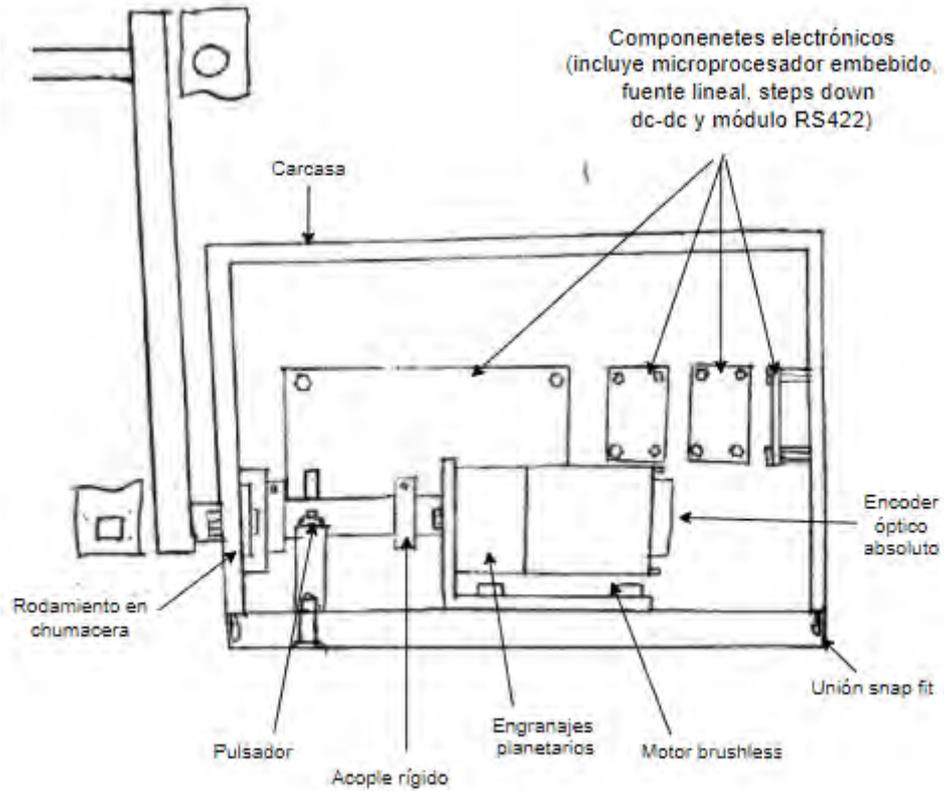


Figura 3. 16: Concepto de solución 3, vista de componentes (Fuente: Elaboración propia)

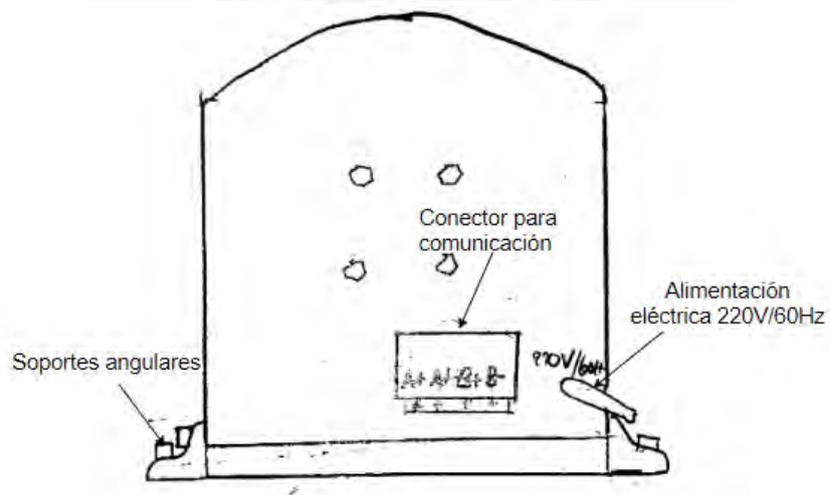


Figura 3. 17: Concepto de solución 3, parte posterior (Fuente: Elaboración propia)

3.6. EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

En esta sección se evaluarán los tres conceptos de solución anteriormente planteados bajo criterios técnicos y económicos que se consideren importantes para el diseño. Para ello se describirán cuatro criterios técnicos y tres económicos y se detallará su peso. Luego, se procede a la evaluación misma por medio de tablas, y se obtiene una calificación técnica y una económica por concepto. Finalmente, se selecciona, con ayuda del gráfico, un concepto de solución y se le añade mejoras en base a los otros conceptos para obtener un concepto de solución óptimo.

3.6.1. Criterios de evaluación

Bajo los siguientes criterios y su peso correspondiente se evalúan los conceptos de solución para una óptima selección.

Criterios técnicos

En la siguiente tabla se describe los criterios técnicos, asigna un peso y se justifica dicho peso.

Tabla 3. 7: Criterios técnicos (Fuente: Elaboración propia)

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	PESO	JUSTIFICACIÓN
AUTONOMÍA	Independencia del diseño de la asistencia de una persona para su funcionamiento o para realizar un mantenimiento (no considera fallas).	2	Es importante que el usuario pueda dejar instalado al equipo y asistirlo en lo mínimo.
EXACTITUD	Incertidumbre entre la posición teórica y la posición real del sistema de sombreado.	4	Es de alta prioridad que el sistema pueda ubicarse con la mejor exactitud posible, pues esto representa la calidad del sistema para el cliente.
FABRICACIÓN	Facilidad de manufactura de las partes y el ensamble del sistema.	1	Dicha facilidad es relevante para la disminución de costos y especialización del lugar de fabricación
PROTECCIÓN	Dificultad que tendrá el polvo y precipitaciones para ingresar al sistema.	3	Es muy relevante que el sistema sea impermeable, pues opera en condiciones ambientales.

Criterios económicos

En la siguiente tabla se describe los criterios económicos, asigna un peso y se justifica dicho peso.

Tabla 3. 8: Criterios económicos 1 de 2 (Fuente: Elaboración propia)

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	PESO	JUSTIFICACIÓN
COSTO DE COMPONENTES	Costo de los componentes comerciales con los que se fabrica el sistema.	1	Debido a que estos costos están relacionados con la calidad del sistema, su costo no es relevante, pues no se desea escatimar.

Tabla 3. 9: Criterios económicos 2 de 2 (Fuente: Elaboración propia)

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	PESO	JUSTIFICACIÓN
COSTO DE FABRICACIÓN	Costo de manufactura de piezas para el sistema	2	Son los costos en los que se puede ahorrar sin tener un efecto relevante en el sistema; sin embargo, se desea una buena calidad en este.
NÚMERO DE PIEZAS	Cantidad de piezas del sistema.	3	Disminuirá el costo de ensamble del sistema, y este es un aspecto en el que se puede ahorrar sin tener un efecto en la calidad.

3.6.2. Evaluación técnica

En esta sección se evalúan los conceptos de solución bajo los criterios técnicos. Luego se resumirá la evaluación en una tabla para ponderar los resultados.

Tabla 3. 10: Evaluación técnica 1 de 2 (Fuente: Elaboración propia)

	CRITERIO	PUNTAJE	JUSTIFICACIÓN
CONCEPTO DE SOLUCIÓN 1	AUTONOMÍA	3	Solo requiere atención por temas de mantenimiento cada 2 años y en caso de fallas.
	EXACTITUD	3	Con un paso de 1.8° y driver que divide los pasos entre 32, se obtiene una resolución de 0.056°
	FABRICACIÓN	2	Requiere de procesos de rolado, doblado, cortado, taladrado, soldadura y mecanizado.
	PROTECCIÓN	3	El diseño de carcasa única no permite la filtración de lluvia ni polvo.
CONCEPTO DE SOLUCIÓN 2	AUTONOMÍA	3	Solo requiere atención por temas de mantenimiento cada 2 años y en caso de fallas.

Tabla 3. 11: Evaluación técnica 2 de 2 (Fuente: Elaboración propia)

	CRITERIO	PUNTAJE	JUSTIFICACIÓN
CONCEPTO DE SOLUCIÓN 2	EXACTITUD	2	Servomotor de 270°, que opera con un pulso de 500 a 2500 μ s y una banda muerta de 3 μ s, se obtiene una resolución de 0.405°. Además, el efecto de usar una banda recta incluye una variación de la sombra del sistema.
	FABRICACIÓN	3	Requiere de procesos de cortado taladrado y mecanizado.
	PROTECCIÓN	1	Tiene posibles filtraciones en los contactos entre tapas y uniones atornilladas.
CONCEPTO DE SOLUCIÓN 3	AUTONOMÍA	1	Requiere atención cada mes para el movimiento de la esfera deslizante por el cambio de declinación.
	EXACTITUD	3	<i>Encoders</i> ópticos comerciales tienen 18° por pulso, ante una relación de transmisión de 1:720, se obtiene una resolución de 0.025°.
	FABRICACIÓN	3	Requiere de impresión 3D y mecanizado.
	PROTECCIÓN	3	El diseño de carcasa única no permite la filtración de lluvia ni polvo.

La siguiente tabla muestra un resumen y ponderación de la evaluación de los conceptos de solución en los criterios técnicos indicados anteriormente con los pesos de cada criterio.

Tabla 3. 12: Evaluación técnica – Resumen y ponderación (Fuente: Elaboración propia)

Técnicos			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Ideal	
Nro	Criterio	g	p	pxg	p	pxg	p	pxg	p	pxg
1	Autonomía	2	3	6	3	6	1	2	4	8
2	Exactitud	4	3	12	2	8	3	12	4	16
3	Fabricación	1	2	2	3	3	3	3	4	4
4	Protección	3	3	9	1	3	3	9	4	12
Suma			11	29	9	20	10	26	16	40
Promedio			0,688	0,725	0,563	0,5	0,625	0,65	1	1
Orden			1		3		2			

3.6.3. Evaluación económica

En esta sección se evalúan los conceptos de solución bajo los criterios técnicos. Se omite el costo del mecanizado del eje, pues es transversal a las soluciones. Luego se resumirá la evaluación en una tabla para ponderar los resultados.

Tabla 3. 13: Evaluación económica (Fuente: Elaboración propia)

	CRITERIO	PUNTAJE	JUSTIFICACIÓN
CONCEPTO DE SOLUCIÓN 1	COSTO DE COMPONENTES	2	El uso de un motor a pasos cuesta como mínimo 2 veces más que el uso del servomotor.
	COSTO DE FABRICACIÓN	2	El rolado para conseguir la concavidad superior de la carcasa y la soldadura enaltecen el costo respecto las otras alternativas. Además, requerirá pinturas anticorrosivas dedicadas para exteriores.
	NÚMERO DE PIEZAS	3	La carcasa única evita el exceso de uniones atornilladas.
CONCEPTO DE SOLUCIÓN 2	COSTO DE COMPONENTES	3	El uso de un servomotor abarata el costo del actuador; además, no requiere de un driver adicional.
	COSTO DE FABRICACIÓN	3	Requiere solo de corte y taladrado o corte láser. En caso sea metal requerirá pinturas y en caso sea plástico debe tener resistencia a radiación UV.
	NÚMERO DE PIEZAS	1	Mayor número de piezas por uniones atornilladas y soportes angulares.
CONCEPTO DE SOLUCIÓN 3	COSTO DE COMPONENTES	2	El motor sin escobillas requerirá un driver adicional y una reducción de transmisión, lo que encarece al sistema
	COSTO DE FABRICACIÓN	2	Requiere de 6 piezas a imprimir en 3D. Además, se requiere un filamento que soporte radiación UV.
	NÚMERO DE PIEZAS	2	La carcasa única evita el exceso de pernería. Sin embargo, el sistema de sombreado en varias partes y el uso de soportes angulares exteriores aumentan el número de piezas.

La siguiente tabla muestra un resumen y ponderación de la evaluación de los conceptos de solución en los criterios económicos indicados anteriormente con los pesos de cada criterio.

Tabla 3. 14: Evaluación económica - Resumen y ponderación (Fuente: Elaboración propia)

Económicos			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Ideal	
Nro	Criterio	g	p	pxg	p	pxg	p	pxg	p	pxg
1	Costo de componentes	1	2	2	3	3	2	2	4	4
2	Costo de fabricación	2	2	4	3	6	2	4	4	8
3	Número de piezas	3	3	9	1	3	2	6	4	12
Suma			7	15	7	12	6	12	12	24
Promedio			0,583	0,625	0,583	0,5	0,5	0,5	1	1
Orden			1		2		2			

3.6.4. Gráfico técnico-económico

La Figura 3.18 muestra a las soluciones en un plano cartesiano, donde el eje x es el promedio técnico y el eje y, el promedio económico. Los criterios para la selección del mejor concepto de solución son los siguientes: Valor técnico/económico deben ser mayor o igual a 0,6; las alternativas que más se acerquen al valor ideal son las mejores, y, por último, se da preferencia a la alternativa que se encuentre más cerca de la línea de equilibrio ($y=x$).

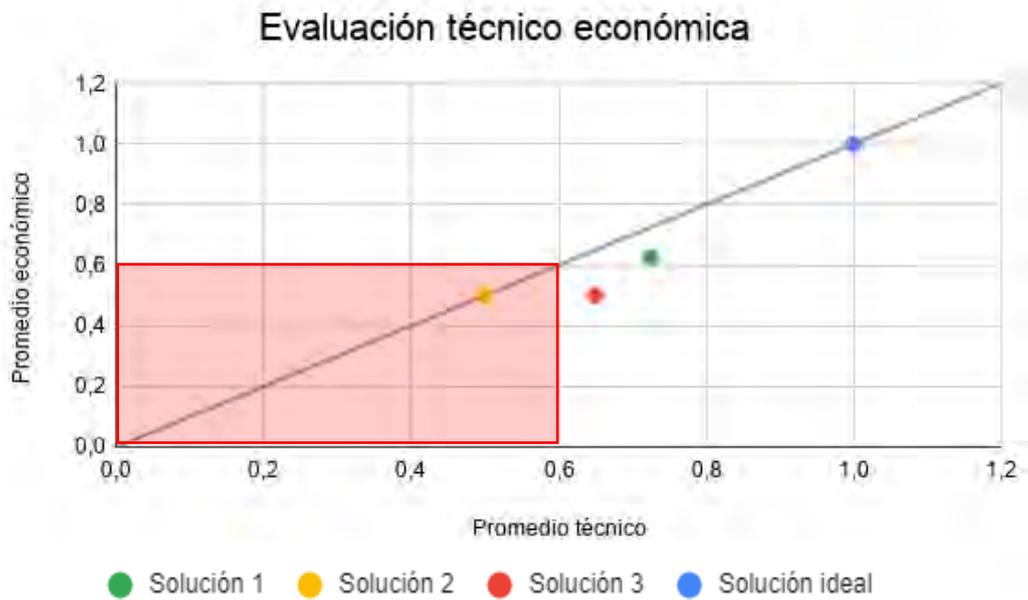


Figura 3. 18: Gráfico técnico-económico entre los conceptos de solución (Fuente: Elaboración propia)

Se desprende del gráfico y criterios mencionados, que el concepto de solución escogido como el mejor es el concepto de solución 1. A partir de este, se desarrolla el concepto de solución óptimo.

3.6.5. Concepto de solución óptimo

Luego en las evaluaciones técnicas y económicas que se realizaron a los conceptos de solución, se desarrolla el concepto de solución óptimo. Este se basará en el mejor concepto de solución; sin embargo, se consideran mejoras a partir de los puntajes obtenidos en la evaluación técnica y la evaluación económica por los otros conceptos de solución.

Para el concepto de solución óptimo, se plantea las mejoras en fabricación. El diseño, en pro de la facilidad de manufactura, se aplanan la parte superior, se opta por ensamble *snap-fit* y por un material plástico para impresión 3D. Esto también tiene un efecto de mejora en el costo de fabricación y número de piezas, pues se requerirán menos piezas. Se opta también por el

uso de un tornillo prisionero en vez de una chaveta para la unión eje-cubo entre la banda y el eje. Esto último tendrá una mejora en el costo de componentes y fabricación, pues no se requerirá el canal chavetero ni la chaveta en sí, sino un agujero en el cubo. Además, se ensancha el diseño y se intercambia el uso de insertos roscados por pernos encajados en la base por apriete para la sujeción a una estructura externa. Por último, se cambia el cable para alimentación eléctrica por un conector para el mismo propósito.

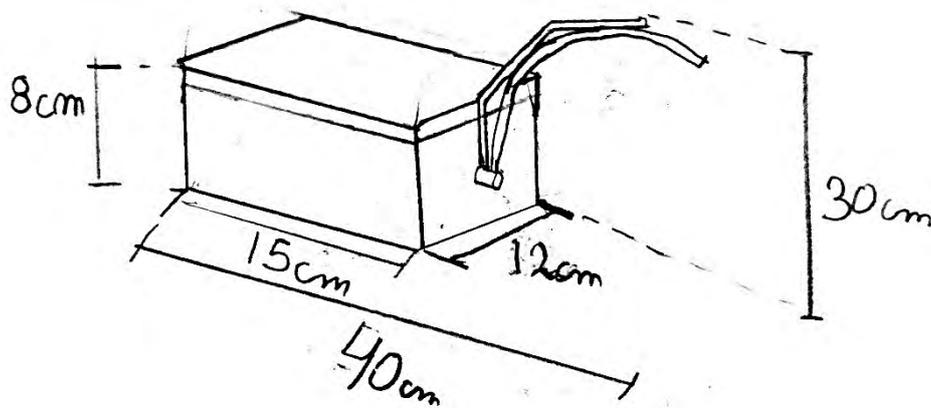


Figura 3. 19: Concepto de solución óptimo, vista general (Fuente: Elaboración propia)

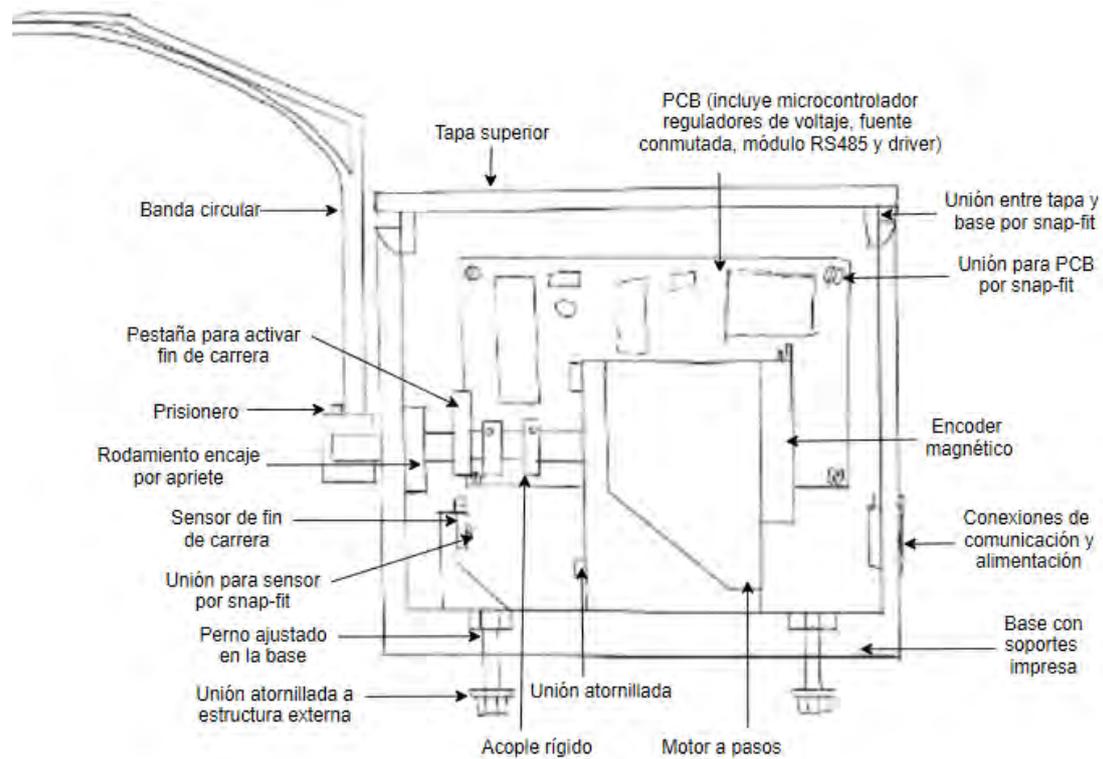


Figura 3. 20: Concepto de solución óptimo, vista de componentes (Fuente: Elaboración propia)

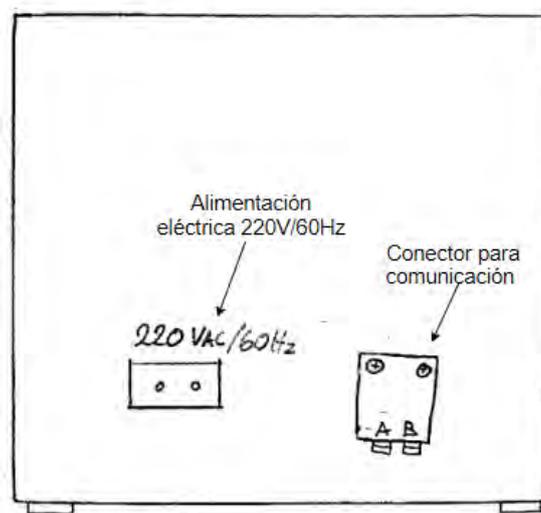


Figura 3. 21: Concepto de solución óptimo, vista posterior (Fuente: Elaboración propia)

CONCLUSIONES

Se logró diseñar conceptualmente un sistema para que, con un solo piranómetro, el usuario pueda medir tanto irradiancia global, como irradiancia difusa y, con estas, calcular la irradiancia directa. Es decir, el sistema es capaz de cumplir la función principal y, con esta, también la lista de requerimientos.

Se obtuvieron los conocimientos necesarios y relevantes para realizar el diseño total del sistema. En otras palabras, se conocen los mecanismos, tecnologías y lógica a usar para el inicio de cálculos mecánicos, selecciones de componentes, especificación en la lógica de los procesos del sistema y programación.

Se construyeron y evaluaron tres conceptos de solución del sistema a diseñar en base a las metodologías planteadas al inicio del documento. Esto permitió, finalmente, llegar a un diseño conceptual óptimo para iniciar el diseño de ingeniería y, posteriormente, una implementación del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

Adler, F., Berardi, M., García, M., Monticelli, F., & Morquecho, M. (2013). *Energía solar fotovoltaica: Instalaciones Industriales*.

Balenzategui, J. (2008). *Fundamentos De La Conversión Fotovoltaica*.

Compañía Levantina de Reductores S.L. (2019a). *Reductores de engranajes rectos helicoidales*.

https://clr.es/es/inicio/productos/motorreductores/reductores_recto_helicoidales

Compañía Levantina de Reductores S.L. (2019b). *Reductores Planetarios*.

https://clr.es/es/inicio/productos/motorreductores/reductores_planetarios

Compañía Levantina de Reductores S.L. (2019c). *Reductores Sinfín Corona*.

https://clr.es/es/inicio/productos/motorreductores/reductores_sinfín_corona

Conde, L. A., Montes-Romero, J., Carhuavilca, A., Perich, R., Jorge, A., Angulo, J., Muñoz, E., Töfflinger, J. A., & Casa, J. De. (2019). Performance evaluation and characterization of different photovoltaic technologies under the coastal , desertic climate conditions of Lima , Peru. *Solar World Congress*.

DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS. (2017). *¿QUÉ ES UN ENCODER, CUÁLES SON SUS TIPOS Y PARA QUÉ SIRVEN?*

<https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/encoder-tipos>

Dolce, R., & AccuFlux Inc. (2016). *United States Patent* (Patent No. US 9,329,256 B2).

<https://patentimages.storage.googleapis.com/a9/5b/d0/5d7bdc4333afef/US9329256.pdf>

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.).

<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470873663.html>

EKO INSTRUMENTS Co. (2012a). *INSTRUCTION MANUAL RSR-01*.

EKO INSTRUMENTS Co. (2012b). *INSTRUCTION MANUAL SUN TRACKER SERIES*.

EKO INSTRUMENTS Co. (2019). *INSTRUCTION MANUAL RSB-01*.

Fay, R. (2019). *Pasos por revolución y ángulo de paso en motores paso a paso*.

<https://forum.digikey.com/t/pasos-por-revolucion-y-angulo-de-paso-en-motores-paso-a-paso/4129>

Graham, J. (2002). *United States Patent* (Patent No. US 6,417,500 B1).

<https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6417500.pdf>

Grupo Novelec. (2018). *Finales de carrera: Qué son y características principales*.

<https://blog.gruponovelec.com/electricidad/finales-de-carrera-que-son-y-caracteristicas-principales/>

Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0>

IRENA. (2018). International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2017. In *International Renewable Energy Agency*.

<https://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>

Jutglar, L. (2004). *Energía Solar*. Aleph.

Navarro Collado, J. E. (2010). *Diseño e implementación de sensores de las variables de estado de un helicóptero*. Universidad de Sevilla.

Nicholson, S. (2011). *Dryland Climatology*. Cambridge University Press.

Sánchez Muñoz, J. M. (2017). *Evaluación experimental de servo motores para robótica aérea* [Universidad de Sevilla].

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91345/fichero/Memoria+TFG+José+Manuel+Sánchez.pdf>

Schweiger, M., Herrmann, W., Monokroussos, C., & Rau, U. (2017). Understanding the energy yield of PV modules. *Www.Pv-Tech.Org, May*.

Velasco, J. (2009). *Energías Renovables*. Reverté.

Webb, N. (2014). *SPN1 Technical Fact Sheet v1.2d*. https://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2016/10/SPN1-Technical-Fact-Sheet-v1.2_c_F.pdf

Whitaker, C. M., & Newmiller, J. D. (1998). Photovoltaic Module Energy Rating Procedure, Final Subcontract Report, Endecon Engineering San Ramon, California. *Nrel/Sr-520-23942*. <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/23942.pdf>

Wright, J. (2016). Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica. *Uniciencia*, 22(1), 55–69.

Yedamale, P., & Microchip Technology. (2003). *AN885 Brushless DC Motor Fundamentals*.

ANEXOS

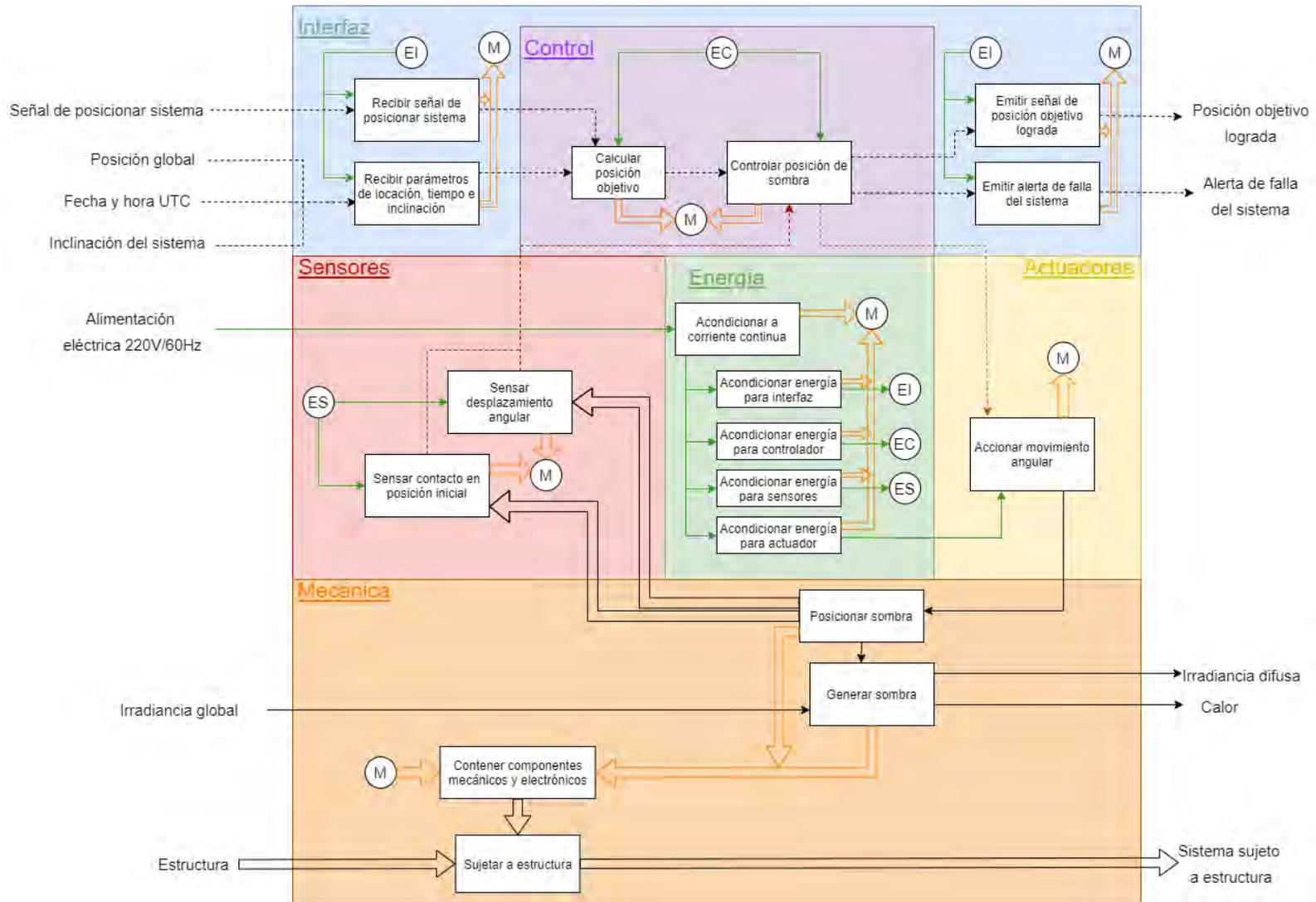
A. Lista de requerimientos

LISTA DE REQUERIMIENTOS			HOJA 1 DE 3
PROYECTO:		DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE IRRADIANCIA DIRECTA EN PIRANÓMETROS	Edición: 3 Fecha: 27/05/2020
CLIENTE:		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	Elaborado: QUISPE OCHOA, GERARDO RAÚL
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
06/05/20	E	<u>Función principal:</u> El sistema debe suprimir el efecto de la radiación directa sobre un piranómetro. Este sistema debe buscar invadir en lo mínimo el resto de la radiación a medir cuando sea usado y no afectar en lo absoluto la medición si está en reposo.	QUISPE OCHOA, GERARDO RAÚL
06/05/20	E	<u>Geometría:</u> El diseño total que comprende el sistema de sombreado, sistema electrónico y sistema de soporte no debe exceder los 50 cm x 20 cm x 30 cm	
23/05/20	E	<u>Cinemática:</u> El diseño contempla el movimiento preciso de un objeto en el espacio a través de un movimiento rotatorio con una resolución menor a 2° (como el RSB-01S) por movimiento y una velocidad máxima de 0,9 RPM.	
06/05/20	E	<u>Material:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Los materiales a usar exteriormente deben ser capaces de soportar la radiación del Sol, lluvia, polvo y humedad • La transmitancia del material para crear la sombra debe ser la mínima posible • Se debe optar por materiales ligeros 	
06/05/20	D	<u>Material:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Se optará por materiales ligeros para que la masa del sistema sea menor a la de un RSB-01S (13kg) 	

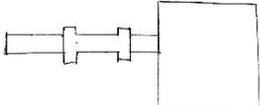
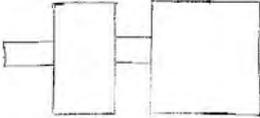
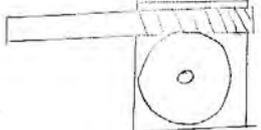
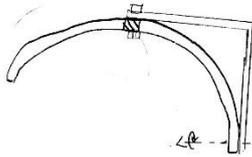
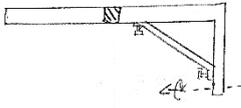
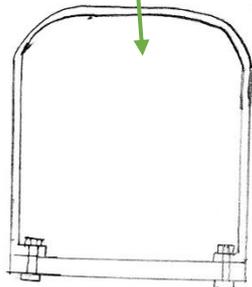
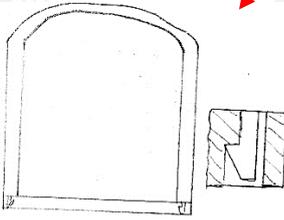
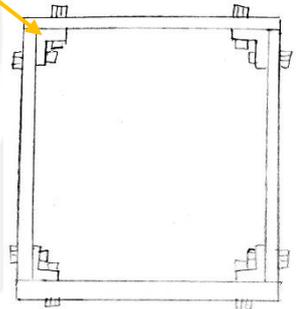
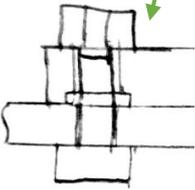
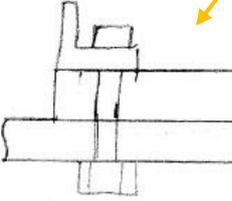
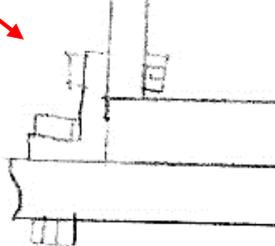
LISTA DE REQUERIMIENTOS			HOJA 2 DE 3
PROYECTO:		DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL FILTRADO DE IRRADIANCIA DIRECTA EN PIRANÓNEMTROS	Edición: 3 Fecha: 27/05/2020
CLIENTE:		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	Elaborado: QUISPE OCHOA, GERARDO RAÚL
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
23/05/20	E	<p><u>Materia:</u> Entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estructura <p>Salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema sujeto a estructura 	QUISPE OCHOA, GERARDO RAÚL
23/05/20	E	<p><u>Energía:</u> Entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energía eléctrica: Corriente alterna 220V a 60Hz • Irradiancia global <p>Salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Irradiancia difusa • Calor 	
06/05/20	D	<p><u>Software:</u> Entorno de desarrollo dedicado al controlador elegido.</p>	
27/05/20	E	<p><u>Comunicación:</u> El usuario debe poder comunicarse con el sistema por medio de un protocolo Modbus.</p>	
23/05/20	E	<p><u>Señales:</u> Entradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parámetros de posición global (Latitud y Longitud) • Parámetros de tiempo (Fecha y Hora UTC) • Inclinación del sistema • Activación del mecanismo de sombra <p>Salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Posición objetivo lograda • Alerta de falla del sistema 	

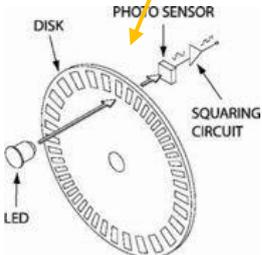
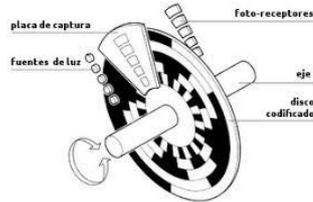
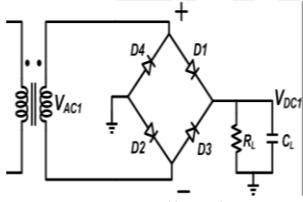
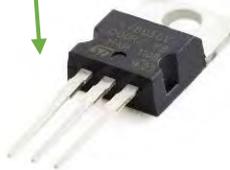
LISTA DE REQUERIMIENTOS			HOJA 3 DE 3
PROYECTO:	DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL FILTRADO DE IRRADIANCIA DIRECTA EN PIRANÓNEMTROS		Edición: 3 Fecha: 27/05/2020
CLIENTE:	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		Elaborado: QUISPE OCHOA, GERARDO RAÚL
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
06/05/20	E	<u>Control:</u> Se debe implementar un control de posición para el sistema de sombra.	QUISPE OCHOA, GERARDO RAÚL
06/05/20	E	<u>Electrónica:</u> El sistema requiere sensores de desplazamiento angular y de contacto.	
06/05/20	E	<u>Seguridad y medio ambiente:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Grado de protección IP65. • Cumplir la directiva RoHS 2002/95/CE 	
06/05/20	E	<u>Montaje:</u> Desmontable solo para fines de mantenimiento	
06/05/20	E	<u>Mantenimiento:</u> El mantenimiento del sistema debe tener la misma periodicidad del mantenimiento del piranómetro, que son 2 años.	
08/07/20	E	<u>Costos:</u> Los costos de diseño y fabricación no deben exceder los 4460 €.	
07/05/20	D	<u>Control de calidad:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Control de calidad de la transmitancia del sistema de sombreado • Control de calidad de la alineación de los ejes de motores 	

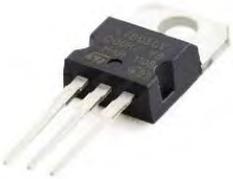
B. Estructura de funciones global



C. Matriz morfológica

	Funciones	Soluciones a funciones		
		1	2	3
Dominio mecánico	Posicionar sombra	 <p>Eje con acople rígido</p>	 <p>Eje a caja con engranajes planetarios</p>	 <p>Eje a caja con sistema de corona y tornillo sinfín</p>
	Generar sombra	 <p>Banda circular</p>	 <p>Banda con doblez rectos</p>	 <p>Esfera deslizante y varilla</p>
	Contener componentes mecánicos y electrónicos	 <p>Carcasa única atornillada a base</p>	 <p>Carcasa única unida a base mediante <i>snap-fit</i></p>	 <p>Tapas separadas y soportes angulares</p>
	Sujetar a estructura	 <p>Rosca hembra en la base (insertos roscados)</p>	 <p>Rosca macho saliendo de la base</p>	 <p>Anclajes laterales</p>

Funciones	Soluciones a funciones		
	1	2	3
Dominio de sensores	<p>Sensar desplazamiento o angular</p>  <p>Encoder de magnético</p>	 <p>Encoder óptico incremental</p>	 <p>Encoder óptico absoluto</p>
	<p>Sensar contacto en posición inicial</p>  <p>Sensor de fin de carrera</p>	 <p>Pulsador</p>	
Dominio de actuador	<p>Accionar movimiento angular</p>  <p>Motor sin escobillas + driver</p>	 <p>Motor a pasos + driver</p>	 <p>Servomotor</p>
	<p>Acondicionar a corriente continua</p>  <p>Fuente lineal</p>	 <p>Fuente conmutada</p>	
Dominio de energía	<p>Acondicionar energía para interfaz</p>  <p>Step down DC-DC</p>	 <p>Regulador de voltaje</p>	 <p>Convertidores análogo digitales</p>

	Funciones	Soluciones a funciones		
		1	2	3
Dominio de energía	Acondicionar energía para controlador	 Step down DC-DC	 Regulador de voltaje	 Conversores análogo digitales
	Acondicionar energía para sensores			
	Acondicionar energía para actuador			
Dominio de control (hardware)	Calcular posición objetivo	 Microcontrolador	 Microcontrolador embebido	 Microprocesador embebido
	Controlar posición de sombra			
Dominio de control (Software)	Calcular posición objetivo	Arreglo de posiciones diario (cálculo en la noche)	Algoritmo con las ecuaciones solares	Red neuronal entrenada
	Controlar posición de sombra	Control PID	Control <i>Fuzzy</i>	Lazo abierto

Funciones		Soluciones a funciones		
		1	2	3
Dominio de interfaz	Recibir señal de posicionar sistema	 <p>Módulo RS422</p>	 <p>Módulo RS485</p>	 <p>Módulo RS 232</p>
	Recibir parámetros de locación, tiempo e inclinación			
	Emitir señal de posición objetivo lograda			
	Emitir alerta de falla del sistema			