

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**Estudio para el desarrollo de un seguidor solar de dos ejes auto
configurable para paneles fotovoltaicos**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO
DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA
MECATRÓNICA**

AUTOR

Jassir Abdalon Vilcanqui Apaza

ASESOR:

MSc. Pablo Cárdenas Cáceres

Lima, Mayo, 2020

RESUMEN

En los últimos años el gobierno peruano ha recurrido al uso de la radiación solar para la generación de energía eléctrica en zonas de difíciles accesos, una de estas zonas se ubica en el Sur del país, específicamente en Las Islas flotantes de los Uros, debido a que su ubicación hace inviable el uso de torres de altas tensión para la electrificación urbana. El sur del país constituye una de las zonas con mayor potencial fotovoltaico de Sudamérica; sin embargo, la estructura de los paneles fotovoltaicos implementados en esta zona son estructuras no móviles, por lo cual no se aprovecha todo el potencial fotovoltaico, es decir, no se aprovecha la generación de energía en todas las horas solares.

Por tal motivo, el presente documento realiza la investigación para el desarrollo del diseño conceptual de un seguidor solar de dos ejes de libertad para paneles fotovoltaicos auto configurable, esta última caracteriza, es debido a que el estudio responde a las poblaciones de localidades aisladas o de difícil acceso; en donde es inviable el acceso de personal que brinde algún tipo de configuración inicial. En primer lugar, se realiza el estudio del estado del arte de las tecnologías; en donde, se investiga productos comerciales, patentes y artículos relacionados al tema; así también, se describe los componentes de un sistema fotovoltaico y los tipos de seguidores solares, posteriormente, se conceptualiza diseños de solución tomando como referencia la norma alemana para el diseño de equipos mecatrónicos VDI 2206. Finalmente, en base a un análisis técnico – económico, se escoge y desarrolla la opción más viable; obteniéndose el diseño conceptual de un seguidor solar que, a través de dos ejes de movimiento angular, acimut y altitud, permite el movimiento total de la orientación de los paneles fotovoltaicos para que estos puedan recibir los rayos solares en un ángulo perpendicular. Además, el sistema cuenta con un algoritmo que permite iniciar el sistema sin la necesidad de una configuración inicial. Logrando así, asegurar el aprovechamiento del nivel de radiación incidente en los paneles fotovoltaicos en todas las horas solares y, por ende, asegurar la máxima captación de energía solar.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
MARCO DE REFERENCIA	5
1.1 Marco Histórico (Estado del Arte).....	5
1.1.1 Productos comerciales.....	5
1.1.2 Patentes y Artículos.....	9
1.2 Marco Teórico.....	16
1.2.1 Sistema fotovoltaico	16
1.2.2 Orientación solar	18
1.2.3 Seguidor solar de dos ejes	19
1.2.4 Seguidores solares según su algoritmo.....	20
1.3 Marco Metodológico.....	20
DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO	22
2.1 Elaboración de la lista de requerimientos.....	22
2.2 Elaboración de la estructura de funciones	26
2.3 Elaboración de la alternativa de solución óptima	32
2.3.1 Matriz morfológica	32
2.3.2 Desarrollo de las alternativas de solución	34
2.3.3 Evaluación técnico – económica.....	38
2.4 Elaboración del diseño definitivo	44
2.4.1 Modelo 3D.....	46
2.4.2 Arquitectura de hardware	49
2.4.3 Diagrama de flujo del sistema	50
CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Tabla de características de seguidores solares comerciales.	9
Tabla 1. 2 Tabla de comparación de investigación que implementan seguidores solares de dos ejes.	16
Tabla 2. 1 Consumo eléctrico de un hogar en la zona rural aislada.	24
Tabla 2. 2 Representación de la matriz morfológica.	33
Tabla 2. 3 Tabla de evaluación técnica.	42
Tabla 2. 4 Tabla de evaluación económica.	43



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Potencial Fotovoltaico en el Perú: a) Mapa de Perú; b) Mapa de la ciudad de Puno	3
Figura 1. 1. DEGER tracker	6
Figura 1. 2 SalixSolar	7
Figura 1. 3 MecaSolar.	7
Figura 1. 4 Lorentz	8
Figura 1. 5 Seguidor de dos ejes de la patente ES2446765B1.....	10
Figura 1. 6 Arreglo de paneles fotovoltaicos de la patente US20100175741A1.....	11
Figura 1. 7 Mecanismo de giro de la patente US20100175741A1.	11
Figura 1. 8 Estructura de seguidor de dos ejes de la patente US4172739.....	12
Figura 1. 9 Panel fotovoltaico con concentrador solar.....	13
Figura 1. 10 Distribución de sensores en el panel fotovoltaico	13
Figura 1. 11 Porcentaje de aumento de voltaje para tres algoritmos de seguimiento solar	14
Figura 1. 12 Algoritmo de control	15
Figura 1. 13 Estructura básica de un sistema fotovoltaico.....	17
Figura 1. 14 Geometría solar.....	18
Figura 1. 15 Seguidor solar con doble eje de inclinación.....	19
Figura 1. 16 Seguidor solar de doble eje, montura acimut – altitud.....	20
Figura 2. 1 Caja Negra del seguidor de dos ejes.....	27
Figura 2. 2 Estructura de funciones.....	28
Figura 2. 3 Bloque de energía.....	29
Figura 2. 4 Bloque de sensores.....	30
Figura 2. 5 Bloque de control.....	30
Figura 2. 6 Bloque de potencia.....	31
Figura 2. 7 Bloque de actuadores.....	31
Figura 2. 8 Bloque mecánico.....	32
Figura 2. 9 Bosquejo de la alternativa1.....	35
Figura 2. 10 Bosquejo de la alternativa 2.....	36
Figura 2. 11 Bosquejo de la alternativa 3.....	37
Figura 2. 12 Detalle del mecanismo de inclinación. Alternativa 3.....	38
Figura 2. 13 Diagrama de evaluación técnico económica.....	43
Figura 2. 14 Detalle del elemento de sujeción del eje.....	44
Figura 2. 15 Elemento de conexión de la caja electrónica.....	45
Figura 2. 16 Mecanismo de transmisión de potencia de rotación.....	45
Figura 2. 17 Mecanismo de conexión del soporte principal.....	45
Figura 2. 18 Concepto de solución óptimo.....	46
Figura 2. 19 Vista frontal. Modelo 3D.....	47
Figura 2. 20 Vista posterior. Modelo 3D.....	48
Figura 2. 21 Transmisión de potencia al eje de rotación	48
Figura 2. 22 Microcontrolador y drivers.....	49
Figura 2. 23 Mando de control.....	49
Figura 2. 24 Diagrama de bloques del sistema.....	50
Figura 2. 25 Diagrama de flujo del sistema.....	51
Figura 2. 26 Diagrama de flujo medición de la velocidad del viento.....	51

INTRODUCCIÓN

Debido a la urgencia de reducir la contaminación producida por la quema de combustible fósil, se han estudiado otros medios para la generación de energía (como las energías renovables) las cuales cubren el 12,9% del suministro mundial de energía. Según el informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), indica que el 80% de la demanda energética mundial podría ser cubierta por las energías renovables para mediados del siglo XXI [Black, 2011, párr. 1]. Una de las tecnologías que ha experimentado un crecimiento rápido es la energía solar, debida a que esta es generada por la radiación solar la cual no produce un impacto negativo contra el medio ambiente. Como muestra de este crecimiento se tiene el dato que la energía solar conectada a la red eléctrica mundial tuvo un incremento del 53 % en el año 2011 a comparación de la capacidad instalada durante el año 2009 [Black, 2011].

El impacto del crecimiento en la utilización de la energía solar también se ha visto reflejado en el Perú mediante el Proyecto Masivo Fotovoltaico, el cual viene siendo ejecutado por la empresa Ergon Perú. Dicho proyecto busca implementar 200 000 sistemas fotovoltaicos en zonas y localidades aisladas a finales de 2019 y gracias a este proyecto más de 400 000 personas gozarán de cobertura eléctrica fotovoltaica¹. El proyecto responde a la necesidad de brindar

¹ Extraído de: Ministerio de Energía y Minas. <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/19215-instalan-mas-de-80-mil-paneles-solares-en-zonas-rurales-del-peru> Revisado 30/03/2019

suministro de energía a los pobladores de localidades aisladas del Perú donde la electrificación convencional resulta técnica y económicamente inviable².

La comunidad establecida en las islas flotantes Los Uros, ubicada en el departamento de Puno, la cual tiene una población que asciende a tres mil personas, será beneficiada con este proyecto el cual les permitirá satisfacer necesidades básicas como iluminación, televisión, radio y cargador de celulares³. Debido a su ubicación en el Lago Titicaca, era impensado que la electricidad llegue a dicha localidad, pero gracias a la instalación de los sistemas fotovoltaicos los pobladores podrán aumentar la calidad de vida de su familia, que depende en gran medida de su fuente de ingresos, y estos a su vez depende de la capacidad de producción de artesanías o la fabricación de balsas turística; además la electrificación de la localidad les da la oportunidad a los niños de la comunidad de poder estudiar de noche⁴.

Puno es uno de los departamentos con mayor potencial de energía solar en el Perú como se aprecia en la Figura 1 con 2267 kWh/kWp por año. Sin embargo, el sistema de paneles solares desarrollados por Ergon Perú para las islas de Los Uros son los denominados RER1 (Recurso de Energía Renovable) los cuales tienen un mecanismo estacionario⁵, dicho tipo de paneles no contribuye con la eficiencia de la generación de energía de los paneles fotovoltaicos, debido a que no aprovechan todas las horas solares. Investigaciones previas realizadas a las ganancias por seguimiento solar indica que la eficiencia en la generación de energía incrementa en aproximado de 35% si se utiliza un seguidor solar de eje polar y un 45 % si se utiliza un seguidor solar de dos ejes de libertad [Fernández, 2010] [Awasthi, 2019].

² Extraído de: Andina, 2018, párr. 6. “*Paneles solares beneficiarán a más de 60 mil personas en todo el Perú*”. <https://andina.pe/agencia/noticia-paneles-solares-beneficiaran-a-mas-600-mil-personas-todo-peru-728308.aspx> Revisado 30/03/2019.

³ Extraído de: El Peruano. <https://elperuano.pe/noticia-energia-electrica-llego-a-islas-flotantes-de-uros-72785.aspx> Revisado 30/03/2019

⁴ Extraído de: Ministerio de Energía y Minas. <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/19215-instalan-mas-de-80-mil-paneles-solares-en-zonas-rurales-del-peru> Revisado 30/03/2019

⁵ Extraído de: Osinergmin. www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Eventos/Expo-SFV-2017.pdf Revisado 30/03/2019.

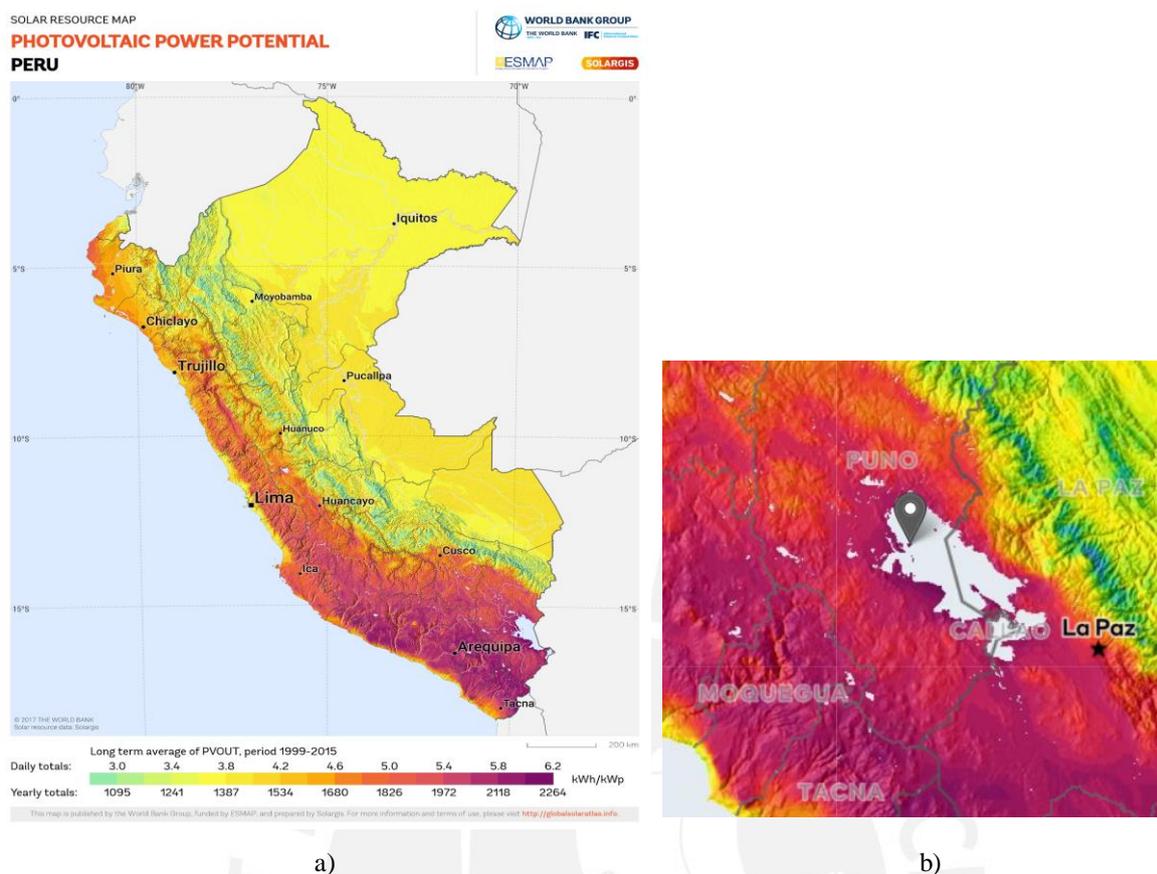


Figura 1. Mapa del Potencial Fotovoltaico en el Perú: a) Mapa de Perú; b) Mapa de la ciudad de Puno
 Fuente: <https://globalsolaratlas.info>

Los RER1 (Recurso Energía Renovable) tienen una capacidad de 120 Wp y un área superficial no mayor a 1 metro cuadrado⁶, para este tipo de paneles solares el mercado peruano no ha desarrollado tecnologías para mejorar la eficiencia de generación de energía y por ende reducir costos.

Debido a la problemática expuesta, en el presente Trabajo de Investigación se desarrollará el diseño conceptual de un seguidor solar de dos ejes de libertad para paneles fotovoltaicos, que permitirá el movimiento total de la orientación de los paneles fotovoltaicos, por lo que estos podrán mantenerse perpendicularmente a los rayos del Sol, asegurando así la máxima captación de energía. El sistema contará con un algoritmo que permita iniciar el sistema sin la necesidad de una configuración inicial y un sistema de protección contra las fuerzas generadas por el viento. Esto con el fin de aumentar la eficiencia en la generación de energía eléctrica, facilitar

⁶ Extraído de: Osinergmin. www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Eventos/Expo-SFV-2017.pdf. Revisado 30/03/2019.

la instalación del equipo y además que de que puedan ser implementados en zonas aisladas u/o con difícil acceso en el Sur del Perú.

Los objetivos específicos que se quieren cumplir con el desarrollo de este Trabajo de Investigación son:

- Realizar una revisión del estado del arte de manera que se pueda obtener información importante para los requerimientos del diseño del sistema.
- Realizar una revisión de conceptos generales de sistemas fotovoltaicos así también de seguidores solares de dos ejes.
- Elaborar un diseño conceptual óptimo a partir del análisis técnico – económico de los conceptos de solución previos; tomando como referencia la norma VDI 2206.

Los alcances que se tendrán presente en la realización del proyecto son los siguientes:

- Se obtendrá un diseño conceptual evaluado y elegido de un seguidor solar de dos ejes para paneles fotovoltaicos; sin embargo, no se llevará a cabo un diseño a detalle completo respaldado por cálculos.

CAPÍTULO 1

MARCO DE REFERENCIA

El presente capítulo está compuesto por tres marcos: el marco histórico, el marco teórico y el marco metodológico. El marco histórico hace una descripción de algunos productos comerciales de seguidores solares e investigaciones relacionadas al tema como patentes y artículos. El marco teórico expone las diferentes consideraciones para el desarrollo del proyecto. Finalmente, el marco metodológico describe la estrategia que se siguió en el desarrollo del presente trabajo.

1.1 Marco Histórico (Estado del Arte)

1.1.1 Productos comerciales

A continuación, se analizarán algunos productos comerciales de seguidores solares.

- **DEGER tracker**

El sistema de seguimiento de 2 ejes DEGER, mostrado en la Figura 1.1, permiten la captación óptima de toda la energía de radiación solar incidente, además el sistema posee la cualidad de ser compatible con todos los paneles solares del mercado. El sistema logra incrementar el

rendimiento en aproximadamente un 45% a comparación de un sistema no móvil, así también posee un restablecimiento automático a la posición inicial en la noche y logra adoptar automáticamente la posición de seguridad en caso de fuertes vientos con ayuda de un anemómetro [Degger, 2016].



Figura 1. 1. DEGER tracker [Degger, 2016].

- **SalixSolar**

Seguidor solar de dos ejes SalixSolar, mostrado en la Figura 1.2, que aporta hasta un 35% más de energía que los sistemas de estructura fija. SalixSolar se caracteriza por utilizar un control astronómico por PLC con precisión $\pm 0.5^\circ$, el rango de ángulo de giro acimut es de 160° Este a 160° Oeste; en cenital, de 5° a 70° . El sistema de control del SalixSolar brinda la posibilidad de backtracking, función que permite al controlador evitar la generación de sombras en paneles continuos, permitiendo una mayor producción de energía [SalixSolar, 2015].



Figura 1. 2 SalixSolar [SalixSolar, 2015].

- **MECASOLAR MS-2E**

El seguidor solar MS-2E (Figura 1.3) es capaz de incrementar en más de un 35% la producción de energía solar fotovoltaica respecto a una instalación fija. El sistema de control se conecta a una estación meteorológica que con ayuda de un autómata PLC, se orienta a las diversas situaciones climatológicas, por lo cual, posee un sistema de control cronológico. La estructura del sistema es capaz de soportar vientos de hasta 145 km/h, además para vientos mayores a 75 km/h, el sistema orienta la posición del panel a una posición horizontal, paralela al suelo, para contrarrestar los efectos de esta y evitar un colapso de la estructura [MecaSolar, 2018].



Figura 1. 3 MecaSolar [MecaSolar, 2018].

- **Lorentz Etatrack Active**

El sistema de seguimiento de Lorentz Etatrack Active (Figura 1.4) logra incrementar hasta en un 30 % el rendimiento en la generación de energía en los módulos fotovoltaicos a comparación de sistemas no móviles. Posee movimiento en los ángulos de declinación y de elevación, el cual le permite un giro de Este a Oeste de 100°. El sistema de control se basa en un seguimiento paso a paso dependiente de la duración del Sol [Lorentz Etatrack, 2010].



Figura 1. 4 Lorentz [Lorentz Etatrack, 2010].

A continuación, en la Tabla 1.1 se comparan los 4 seguidores solares comerciales descritos anteriormente en las siguientes características: mecanismo de accionamiento, ángulos de giro, tecnología de seguimiento y protección contra fuertes vientos.

Tabla 1. 1 Tabla de características de seguidores solares comerciales.

Características	Deger	Salixolar	Mecasolar	Lorentz etatrack
Accionamientos	Engranajes en el cabezal motriz.	Actuadores mecánicos con reductor planetario.	Motor reductor y gata mecánica de accionamiento eléctrico	Actuadores lineales DC.
Ángulos de giro	Ángulo Este-Oeste 300°. Ángulo de Elevación 20°-90°.	Ángulo de giro azimut de 160° Este a Oeste. Ángulo de giro cenital de 5° a 70°.	Ángulo de giro azimut 120°. Ángulo de Elevación 0° - 60°	Un ángulo de giro Este a Oeste 100°
Tecnología de seguimiento	Sistema de control "Maximum Light Detection"(MLD)	Programación astronómica por PLC.	Programación astronómica de PLC independiente.	Programación astronómica.
Sistema de protección contra viento	Posicionamiento de seguridad automático mediante anemómetro.	Posicionamiento de seguridad a vientos mayores de 75km/h mediante anemómetro.	Posicionamiento en veleta a velocidades mayores de 70km/h.	Ninguno.

1.1.2 Patentes y Artículos

A continuación, se presentan trabajos previos realizados por investigadores que proponen sistemas de seguidores solares.

- **Patente "Seguidor solar de dos ejes" - ES2446765B1**

La patente de la Figura 1.5, muestra el mecanismo de un seguidor solar que combina dos movimientos angulares para lograr la perpendicularidad entre las placas fotovoltaicas y la radiación solar; el primer movimiento permite el seguimiento de la altura solar, el cual se realiza en el eje Este – Oeste; el segundo movimiento se realiza en el ángulo de acimut, completando así el movimiento orto-ocaso. El seguidor solar es accionado mediante dos motores paso a paso,

que logran el movimiento de las placas solares. La estructura se basa en un dispositivo con geometría de pórtico, constituido por dos perfiles cuadrados con ejes de giro soportados en las patas de la estructura, de esta forma se logra el seguimiento del sol de Este a Oeste; el giro de los dinteles permite el seguimiento en altura diaria del Sol [Pacheco, 2012].

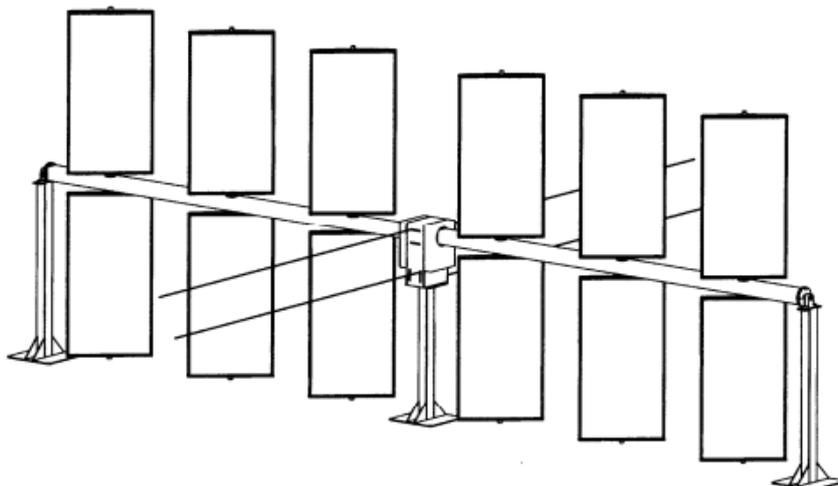


Figura 1. 5 Seguidor de dos ejes de la patente ES2446765B1 [Pacheco, 2012].

- **Patente “Dual axis sun-tracking solar panel array”- US20100175741A1**

La patente de la Figura 1.6, describe el mecanismo para el posicionamiento de paneles fotovoltaicos en dos ejes de manera que puedan orientarse perpendiculares a la luz solar incidente. La estructura del sistema permite ubicar los paneles fotovoltaicos en una matriz bidimensional de columnas y filas. La orientación de los paneles se puede controlar para proporcionar movimientos de giro e inclinación separados. La Figura 1.7, muestra el mecanismo de giro entre el eje del panel fotovoltaico y el eje del cuadro, donde el eje del panel es perpendicular al eje del cuadro; por tanto, la sincronización adecuada del movimiento angular del eje de inclinación del marco y del eje de giro del panel solar hace que este quede sustancialmente orientado de forma perpendicularmente a la dirección de la luz solar entrante [Thorne, 2009].

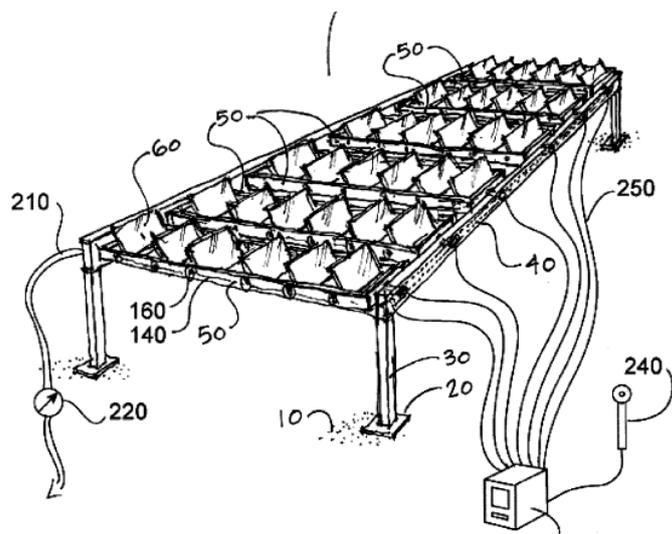


Figura 1. 6 Arreglo de paneles fotovoltaicos de la patente US20100175741A1 [Thorne, 2009].

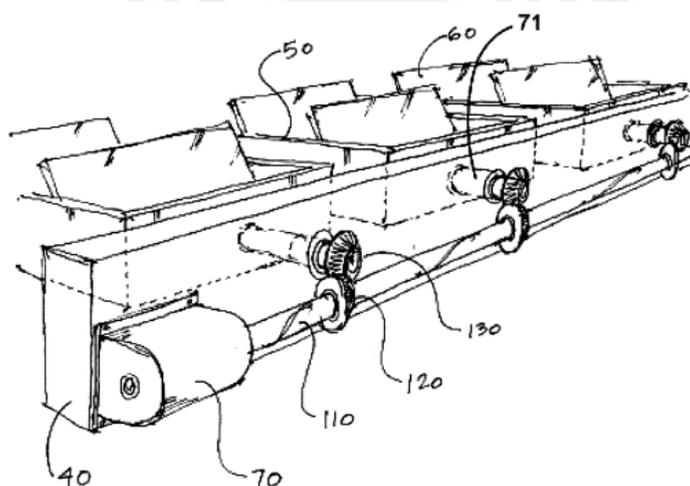


Figura 1. 7 Mecanismo de giro de la patente US20100175741A1 [Thorne, 2009].

- **Patente “Sun tracker with dual axis support” - US4172739**

El sistema de seguimiento solar de dos ejes mostrado en la Figura 1.8, proporciona un mecanismo con una base y un marco giratorio para soportar paneles solares, el sistema emplea un motor para realizar el movimiento de rotación del marco alrededor del primer eje con relación a la base y además emplea un elemento de conexión flexible que se extiende entre la base y el marco para realizar el movimiento de inclinación del marco alrededor de un segundo eje con relación a la base. El mecanismo de inclinación del segundo eje está basado en un sistema de cables y resortes, los cuales producen el grado de inclinación deseado [Tassen, 1977].



Figura 1. 9 Panel fotovoltaico con concentrador solar [Kabir, 2012].

- **Artículo 2 “A low cost dual axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation”**

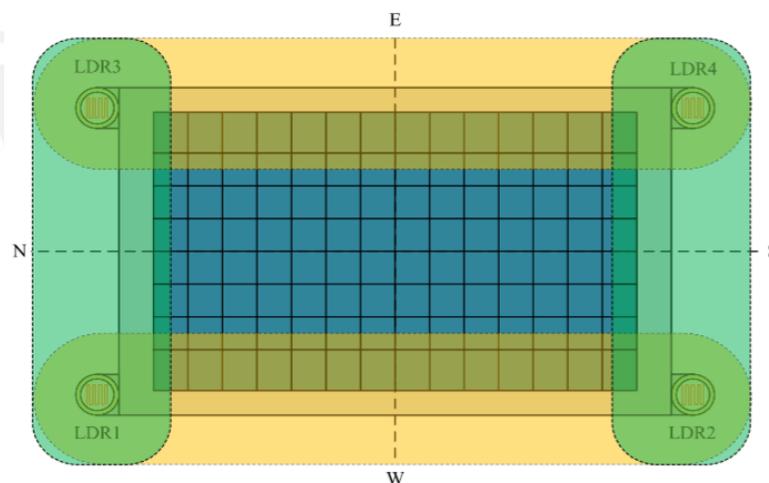


Figura 1. 10 Distribución de sensores en el panel fotovoltaico [Jamroen, 2020]

En la investigación realizada por este Proyecto, se implementó un seguidor solar de dos ejes de inclinación activo, utilizando dos actuadores lineales para lograr los movimientos de inclinación. La estrategia de control empleada fue de un lazo de control cerrado; en donde, se utilizaron cuatro sensores LDR o foto resistivos, para obtener la dirección de los rayos solares y así retro alimentar al sistema de control. La distribución de los cuatros sensores, se muestra en la Figura1.10. Los resultados experimentales demuestran que el sistema de seguimiento

desarrollado aumento la eficiencia de la generación de energía eléctrica en un promedio de 44,89% en comparación a un sistema fotovoltaicos de montaje fijo [Jamroen, 2020].

- **Artículo 3 “Desing and development of an automatic solar tracker”**

El objetivo principal del proyecto consistió en optimizar el aprovechamiento de la energía solar en paneles fotovoltaicos, mediante el diseño de un seguidor solar basado en microcontroladores. Como premisa de trabajo, se implementó tres seguidores, el primero con un sistema de control activo, que se retroalimentaba de sensores LDR, el segundo con un sistema de control cronológico y el tercer un sistema de control híbrido, es decir, poseía el control activo y cronológico. Como uno de sus resultados se logró obtener el porcentaje de ganancia energética con respecto a un sistema fotovoltaico no móvil, la Figura 1.11 muestra el porcentaje de ganancia de los tres seguidores solares evaluados, como se aprecia el seguidor solar híbrido aprovecha la energía solar de manera óptima en todas las condiciones climatológicas. [Tharamuttam & Ng, 2017].

Solar tracking algorithm	% Increase in voltage as compared to a fixed-mount solar panel	
	Sunny days	Cloudy days
Active	10.0%	7.5%
Chronological	8.5%	9.0%
Hybrid	13%	14%

Figura 1. 11 Porcentaje de aumento de voltaje para tres algoritmos de seguimiento solar

[Tharamuttam & Ng, 2017].

- **Artículo 4 “Improved maximum power point tracking algorithm with cuk converter for PV systems”**

En este proyecto se obtiene el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) mejorado con control directo, mediante el uso de un sistema de controlador difuso. El algoritmo, mostrado en la Figura 1.12, fue implementado en el software MATLAB/ Simulink, para dicho

propósito se modelo el sistema fotovoltaico que simula la entrada del sistema, obteniendo como resultado, una respuesta más rápida de seguimiento al punto de máxima potencia y una oscilación menor en estado estacionario, en comparación de un controlador de perturbación y observación, que pertenece al tipo de algoritmo de control convencional del seguimiento del punto de máxima potencia. [Sun & Yang, 2017].

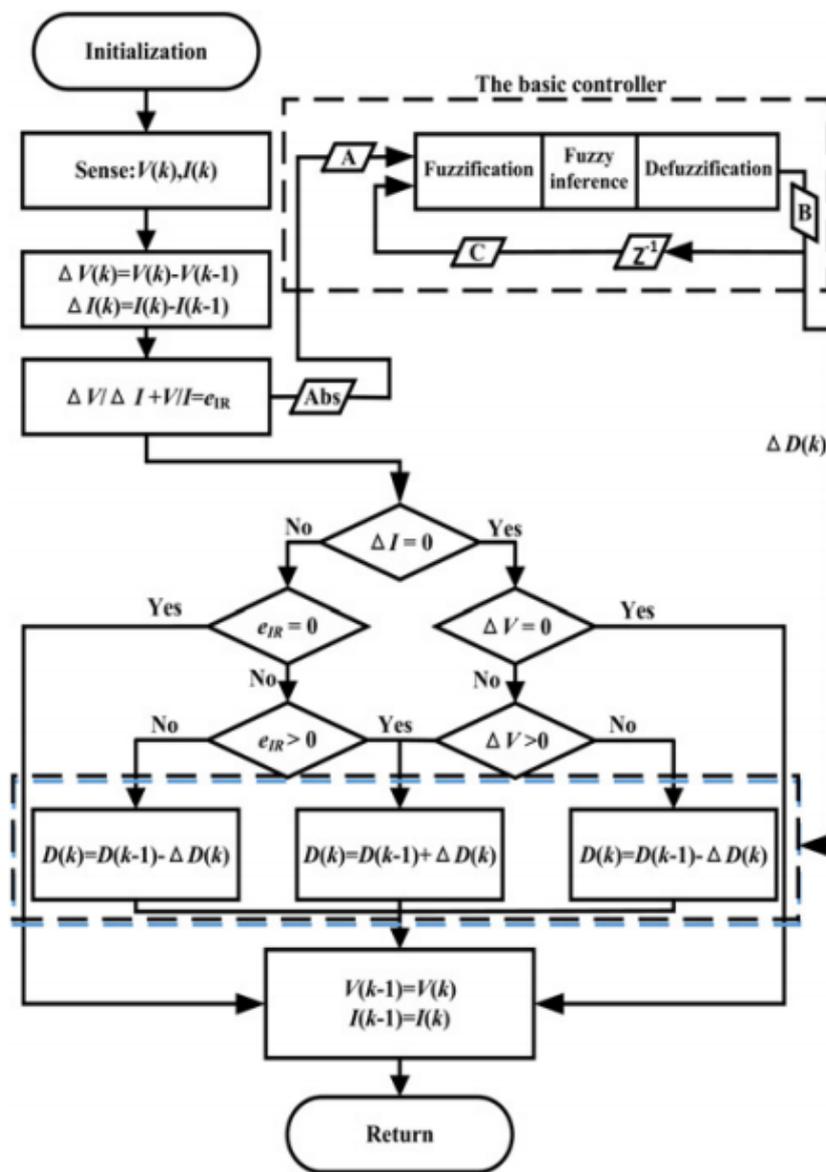


Figura 1. 12 Algoritmo de control [Sun & Yang, 2017].

A continuación, se muestra la Tabla 1.2 la comparación de las investigaciones relaciones a seguidores solares de dos ejes.

Tabla 1. 2 Tabla de comparación de investigación que implementan seguidores solares de dos ejes.

Características	Artículo 1	Artículo 2	Artículo 3
Actuadores	Motores a paso	Actuadores lineales eléctricos	Servomotores
Tipo de seguimiento	Seguidor de dos ejes de inclinación	Seguidor de dos ejes de inclinación	Seguidor de un eje de rotación y un eje de inclinación
Sistema de control	Sistema de control de lazo cerrado, utilizando sensores LDR de retroalimentación	Sistema de control de lazo cerrado, utilizando sensores LDR de retroalimentación	Sistema híbrido: seguidor activo (realimentado mediante LDR) y cronológico.
Estrategia de control	Controlador con lógica difusa	Estrategia de ON / OFF	Estrategia de ON/ OFF

1.2 Marco Teórico

El desarrollo del marco teórico se centrará en cuatro aspectos: los componentes de un sistema fotovoltaico, la orientación solar, seguidores solares de dos ejes y los principales seguidores solares según su algoritmo.

1.2.1 Sistema fotovoltaico

Los generadores fotovoltaicos solo pueden producir energía eléctrica cuando reciben la irradiación del Sol, por lo que la energía generada es directamente proporcional a la irradiación que incide sobre la superficie del colector. Motivo por el cual se necesitan elementos que logren la captación de la radiación solar y la conviertan en energía eléctrica estable para el uso de dispositivos eléctricos. Por tanto, un sistema fotovoltaico está conformado por: Un generador fotovoltaico, un banco de baterías, un regulador de carga y un inversor; como lo muestra la Figura 1.13 [Abella, 2001].

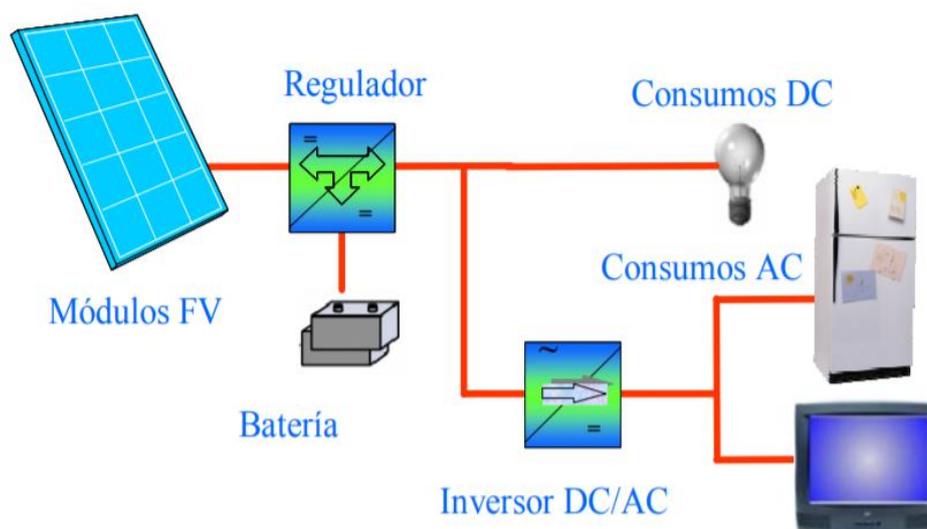


Figura 1. 13 Estructura básica de un sistema fotovoltaico [Abella, 2001].

- **Generador fotovoltaico**

Elemento encargado de transformar la energía del Sol captada por el modulo fotovoltaico en energía eléctrica. Este elemento está constituido por varios módulos o celdas fotovoltaicos que pueden estar conectados en serie y/o paralelo, y a su vez cada celda fotovoltaica está conformado por células fotovoltaicas que son las unidades básicas de captación de energía solar [Abella, 2001].

- **Banco de baterías**

Los bancos de baterías o acumuladores fotovoltaicos se utilizan principalmente como un sistema de almacenamiento energético, debido al desplazamiento en el tiempo que existe entre los periodos de generación (horas solares) y los periodos de consumo, permitiendo la operación del sistema eléctrico cuando el sistema fotovoltaico por sí mismo no puede generar la potencia suficiente para abastecer el consumo eléctrico, debido a la presencia parcial o nula de la radiación solar [Abella, 2001].

- **Regulador de carga**

Elemento encargado de proteger a la batería frente a picos de sobre descargas y sobrecargas. Durante periodos de tiempo como en el amanecer, atardecer, días nublados y la noche; donde

la generación de energía es poca o nula, en estos periodos de tiempo el sistema fotovoltaico no puede cargar las baterías; por tanto, el regulador de carga aísla el banco de baterías del bloque de generación, evitando su descarga eléctrica [Fernández, 2010].

- **El inversor**

Debido a que el sistema fotovoltaico posee la conexión a la red eléctrica, es necesario convertir la potencia generada por el equipo fotovoltaico, la cual es proveniente de corriente continua (DC), a una corriente alterna (AC) para poder ser utilizada en la red eléctrica. Por lo cual, es necesaria la utilización de un inversor que convierta corriente continua en corriente alterna con un alto rendimiento [Fernández, 2010].

1.2.2 Orientación solar

La orientación del solar se define mediante el ángulo de acimut y la altura, como se observa en la Figura 1.14.

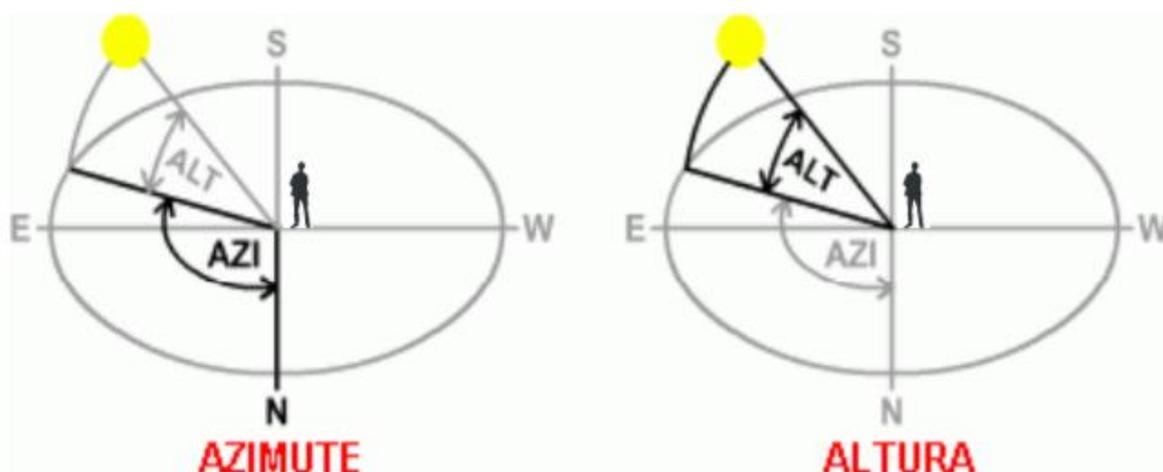


Figura 1. 14 Geometría solar [Bittencourt, 2004].

- **Ángulo de acimut:** Definido como el ángulo formado por la proyección horizontal de los rayos solares con una dirección establecida, generalmente el norte geográfico, ángulo que puede estar en el rango de 0° a 180° [Bittencourt, 2004].

- **Altitud o inclinación:** La altitud solar se define como el ángulo formado por los rayos solares y por el plano horizontal del observador; midiéndose desde el plano horizontal hacia el plano vertical de 0° a 90° . Cabe resaltar, que el Sol directamente en el centro del cielo tiene una altitud solar de 90° [Bittencurt, 2004].

1.2.3 Seguidor solar de dos ejes

Los seguidores de dos ejes permiten la libertad total de movimiento, por lo cual, la superficie colectora puede mantenerse perpendicularmente a los rayos del Sol, lo que asegura la máxima captación de energía. Este es el caso, cuando el ángulo de incidencia sea mínimo (0°), es decir, que la inclinación de la superficie debe ser igual a la altitud del Sol y la orientación debe ser igual al acimut solar [Fernández, 2010]. Los seguidores de dos ejes más comunes son:

- **Seguidor solar de dos ejes de inclinación:** El seguidor mostrado en la Figura 1.15 posee dos ejes de inclinación. El primero tiene su eje paralelo al horizonte. El segundo eje es perpendicular al eje primario. Uno de los ejes permite orientar al panel en su posición Norte – Sur y el otro en la posición Este – Oeste [Sanchez, 2010].

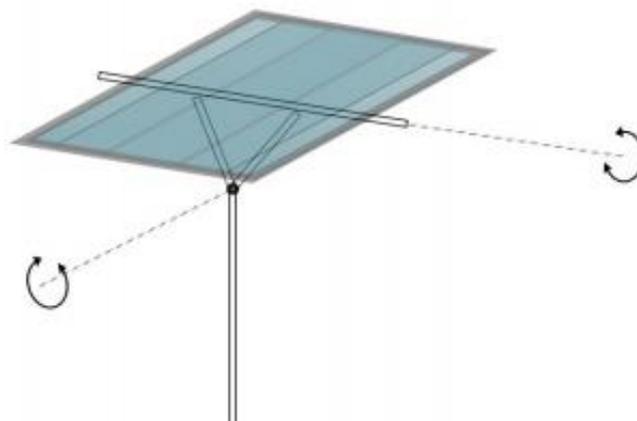


Figura 1. 15 Seguidor solar con doble eje de inclinación [Sanchez, 2010].

- **Seguidor solar de dos ejes de acimut – altitud:** El eje primario de este seguidor es vertical al suelo, sostiene una base giratoria sobre el cual se encuentra el eje secundario (Figura 1.16). Este seguidor de dos ejes es el más implementado debido a su sencillez en la estructura, además que no requiere estar a gran altura por sobre el suelo [Sanchez, 2010].

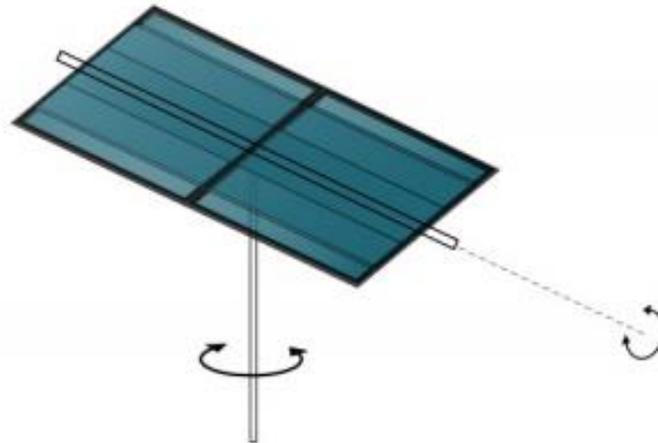


Figura 1. 16 Seguidor solar de doble eje, montura acimut – altitud [Sanchez, 2010].

1.2.4 Seguidores solares según su algoritmo

- **Seguidor solar por punto luminoso:** Este tipo de seguidores se basa en la lectura de sensores que indican, cual es el punto de mayor luminosidad, el sistema electrónico envía señales a los actuadores para lograr el posicionamiento angular del seguidor y orientar el panel fotovoltaico al Sol. Debido a la lectura de sensores el sistema está en constante retroalimentación y reacciona de acuerdo a los datos adquiridos [Saymbetov, 2018].
- **Seguidor cronológico:** Se trata de un seguidor que utiliza un programa y los datos de cartas solares para obtener, mediante ecuaciones solares, las coordenadas geográficas del punto en donde debería estar el sol a cada hora, con esta información el controlador envía señales eléctricas para la activación de los actuadores y así el sistema logra orientarse a dicha posición [Saymbetov, 2018].

1.3 Marco Metodológico

El procedimiento en el cual se basará este trabajo será la metodología del diseño mecatrónico (VDI 2206) y diseños de sistemas técnicos y productos (VDI 2225).

Se planteará la problemática, la justificación, objetivos de la investigación y los alcances que tendrá el proyecto. El resultado de esta primera etapa concluirá con la redacción de la Introducción del documento de investigación.

En el segundo paso, se revisarán productos comerciales y diseños patentados de seguidores solares de dos ejes, se describirán el tipo de mecanismos utilizados y la tecnología de seguimiento, con la información recopilada se redactará el estado del arte. Posteriormente se revisarán conceptos teóricos usados en investigaciones y trabajos anteriores, con los cuales se redactará el marco teórico. El resultado de esta etapa culminará con la redacción del capítulo 1 “Marco de referencia” del documento que además contendrá la metodología usada.

En el tercer paso se utilizará como referencia la norma VDI 2206⁷ y a partir de la problemática expuesta se definirá los requerimientos del sistema, luego se identificarán las funciones básicas que debe cumplir el sistema para lograr su objetivo, con ello se desarrollará la estructura de funciones. Se utilizarán herramientas como matrices morfológicas para la búsqueda de principios de solución y posteriormente la solución óptima, se dará a partir de los principios de solución y un análisis técnico – económico. Se realizará un diseño preliminar con el dimensionamiento del sistema analizando geometría y especificando la posición de los elementos mecánicos y eléctricos. Esta información formará parte del capítulo 2 del documento de tesis.

El cuarto paso de la metodología abarcará el análisis de las conclusiones finales. El resultado de esta etapa constituirá el capítulo 3 del documento de investigación.

⁷ VDI 2206 Norma alemana para el diseño de equipos mecatrónicos
http://www.vdi.eu/guidelines/vdi_2206entwicklungsmethodik_fuer_mechatronische_systeme/

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

De acuerdo a la problemática expuesta en la sección de Introducción, se ha propuesto diseñar un seguidor solar de dos ejes para paneles solares que no necesite una configuración previa. Para llevar a cabo este objetivo, el presente capítulo detalla el diseño conceptual del proyecto tomando como referencia la norma alemana VDI 2206 definiendo las siguientes etapas: la elaboración de la lista de requerimientos, la estructura de funciones general y por dominios, la elaboración de la alternativa de solución óptima y el diseño conceptual definitivo.

2.1 Elaboración de la lista de requerimientos

Tomando en consideración la revisión del estado del arte y el marco teórico del capítulo anterior, se elabora una descripción de los requerimientos del sistema mecatrónico.

- **Geometría**

El sistema a desarrollar es un complemento de un sistema solar fotovoltaico. Esto significa que será diseñado para poder trabajar en conjunto con éste. Por tanto, la estructura del seguidor

solar deberá aceptar los componentes de un sistema solar y en especial el panel solar, ya que será el componente móvil. Con ello en consideración, la estructura del sistema a desarrollar deberá soportar un panel fotovoltaico RER1(Recurso Energía Renovable) de 120 Wp con una dimensión aproximada de 1150mm x 900mm x 4mm y una masa de 10 kg, el cual es utilizado por la empresa Ergon Perú para la electrificación rural [Osinermin, 2018].

- **Cinemática**

El mecanismo del sistema deberá tener dos grados de libertad para lograr movimientos angulares que permitan al panel fotovoltaico recibir los rayos del sol de forma perpendicular. En consecuencia, la estructura del seguidor solar deberá tener un movimiento angular mínimo de 280° de Este - Oeste y un ángulo de elevación de entre 10° a 70°, para ser competitivo en el mercado actual.

- **Fuerzas**

El mecanismo debe proporcionar una fuerza que garantice el movimiento angular en dos ejes del panel fotovoltaico, que tiene una masa de hasta 10kg. Además, la estructura a desarrollar debe tener una masa máxima de 25kg, sin considerar los componentes del sistema solar fotovoltaico para facilitar su transporte manual y no exceder los límites de la “Norma Básica de Ergonomía y de procedimiento de evaluación de riesgo disergonómico” [Ministerio del Trabajo, 2008].

- **Energía**

El suministro de energía eléctrica debe ser proporcionado por el propio sistema solar fotovoltaico. Es por ese motivo que el sistema a desarrollar debe ser energizado por 12 VDC proveniente del banco de baterías. Además, se debe reducir en la medida de lo posible las pérdidas de energía para garantizar un correcto funcionamiento y una autonomía energética de 2 días.

El sistema a desarrollar debe garantizar que el sistema fotovoltaico genere un mínimo de 0.45kW en un día, esto para cubrir la demanda de consumo en un hogar ubicado en una zona

rural aislada como Las Islas de los Uros, que como se muestra en la Tabla 2.1 es aproximadamente 363 W.

Tabla 2. 1 Consumo eléctrico de un hogar en la zona rural aislada.

Consumo eléctrico de un hogar en la zona rural aislada				
Aparato Eléctrico	Potencia consumida (W)	Cantidad	Tiempo de uso (h)	Potencia (Wh)
Iluminación (lámparas LED)	7	3	3	63
Celulares	5	2	2	20
Televisión	50	1	4	240
Radio	40	1	2	80
			Total (W)	363

- **Material de fabricación**

Los materiales deben soportar las cargas del mecanismo y el peso del panel solar de lo contrario podría haber una falla que dañe el funcionamiento del equipo. Además, debido a que el sistema será autónomo, el diseño deberá soportar múltiples repeticiones de ciclos de trabajo diariamente.

Debido a que el sistema a desarrollar se encontrará expuesta al ambiente, los componentes del sistema deberán estar hechos de materiales anticorrosivos y resistentes a bajas temperaturas de hasta -5°C .

- **Señales**

El controlador debe ser capaz de procesar todas las señales analógicas o digitales que reciba de los sensores para poder enviar señales de control a los actuadores.

El sistema recibirá como señales de entrada: señal de encendido, señal de parada, radiación solar y velocidad del viento; y como señales de salida: indicador de estado de funcionamiento y alerta de mal funcionamiento.

- **Seguridad**

El sistema de transmisión de potencia y circuitos deberán estar aislados para evitar el contacto con el usuario y garantizar su seguridad.

El controlador, los sensores y actuadores deberán trabajar en su rango de temperatura adecuada. Además, deberán contar con una protección frente a condiciones adversas como lluvia, polvo; respetando el grado de protección IP65 según DIN EN 60529.

- **Fabricación**

Los componentes de la máquina deben garantizar una fácil fabricación para que pueda ser manufacturado en talleres de la localidad además de facilitar su fácil adquisición.

- **Control**

El sistema de control debe ser capaz de determinar la dirección de los rayos solares para poder generar el movimiento de seguimiento del panel solar, también debe analizar el efecto de la velocidad del viento y en caso sea necesario deberá orientar el panel solar en una posición segura. Además, deberá analizar el correcto funcionamiento de los actuadores y enviar una señal de mal funcionamiento en caso de que estos fallen.

- **Montaje**

Debe ser desarmable con relativa facilidad para poder acceder a todos los componentes principales, además de garantizar su reubicación o mantenimiento cuando sean necesarios.

- **Mantenimiento**

El mecanismo debe contar con la menor cantidad de piezas para facilitar el proceso de mantenimiento y/o cambio de las piezas de fácil desgaste.

El mecanismo debe contar con un diseño que garantice el acceso a los paneles fotovoltaicos para su limpieza, puesto que es una de las principales fuentes de pérdidas energéticas.

- **Costo**

Debido a que uno de los objetivos del proyecto de tesis es implementar una alternativa de bajo costo, todos los elementos que se elijan o diseñen deben considerar este criterio. En promedio el desarrollo del proyecto no debe superar los 3500 soles sin considerar el costo de diseño.

- **Plazos**

El proyecto deberá estar finalizado el 28 de noviembre del 2019.

El resumen de los requerimientos se encuentra en la tabla del anexo A1.

2.2 Elaboración de la estructura de funciones

La entrada para esta etapa de diseño es la lista de requerimientos del seguidor solar. A partir de esa información, se determinará la estructura de funciones correspondiente.

Inicialmente el seguidor solar será considerado como una caja negra para determinar, de manera abstracta, las entradas y salidas que les afecta. Posteriormente se elabora la estructura de funciones del sistema a desarrollar.

i) Caja Negra del seguidor solar de dos ejes

La Figura 2.1 muestra la caja negra del seguidor solar de dos ejes. Las señales de entrada y salida se distinguen según la forma debido a su naturaleza.



Figura 2. 1 Caja Negra del seguidor de dos ejes. Elaboración propia.

ii) Estructura de funciones

En la Figura 2.2 se presenta la estructura de funciones del sistema. Dicha estructura se subdivide en los siguientes bloques: energía, mecánica, sensores, control, potencia y actuadores; los cuales son descritos posteriormente.

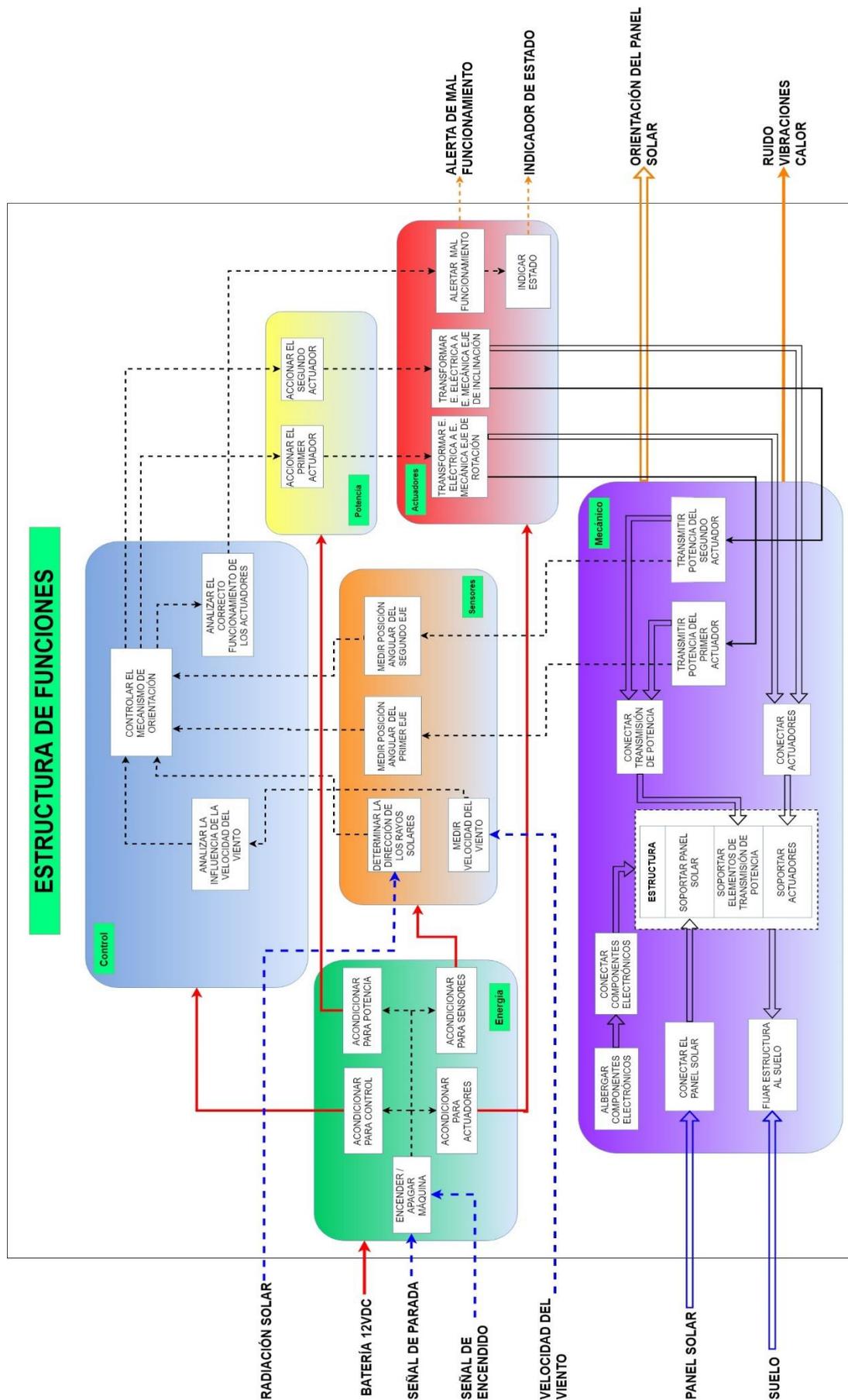


Figura 2. 2 Estructura de funciones. Elaboración propia.

Bloque de energía

En la Figura 2.3, se presenta el bloque de energía cuya función principal es suministrar la energía necesaria al bloque de sensores, control, potencia y actuadores. Para realizar dicha función, el bloque convierte y distribuye la fuente de energía requerida por los bloques anteriormente mencionados, este accionamiento es controlador mediante la función de encender y apagar la máquina.

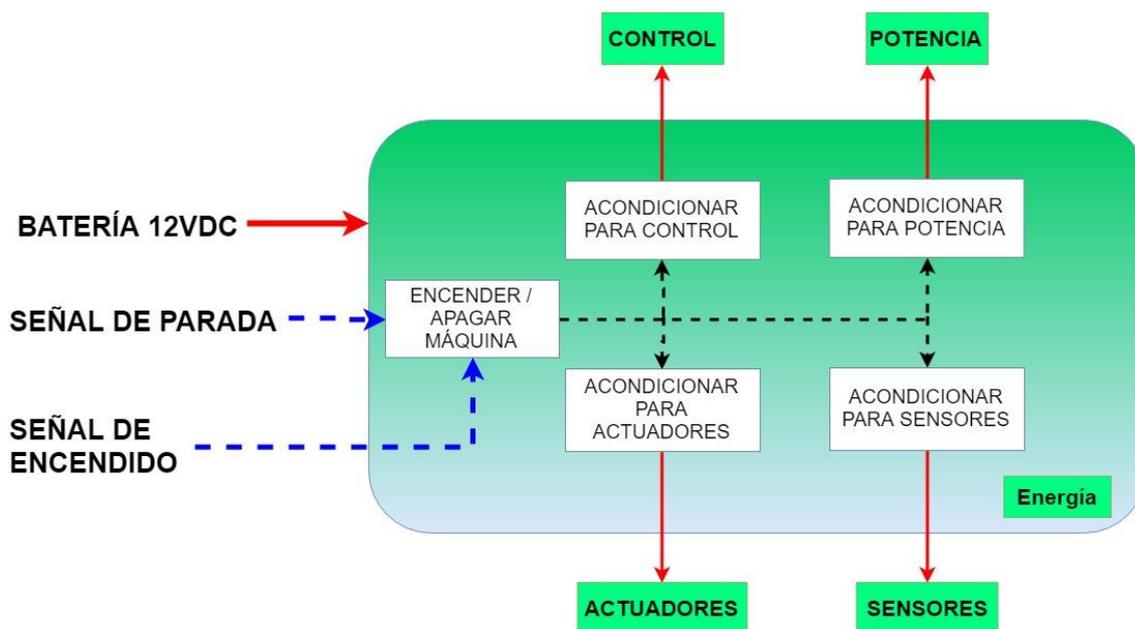


Figura 2. 3 Bloque de energía. Elaboración propia.

Bloque de sensores

En la Figura 2.4, se presenta el bloque de sensores, este bloque está encargado de medir las siguientes variables: la dirección de los rayos solares, la velocidad del viento, la posición angular del eje de rotación y la posición angular del segundo eje de inclinación. Luego dichas señales son enviados al bloque de control para su posterior procesamiento.

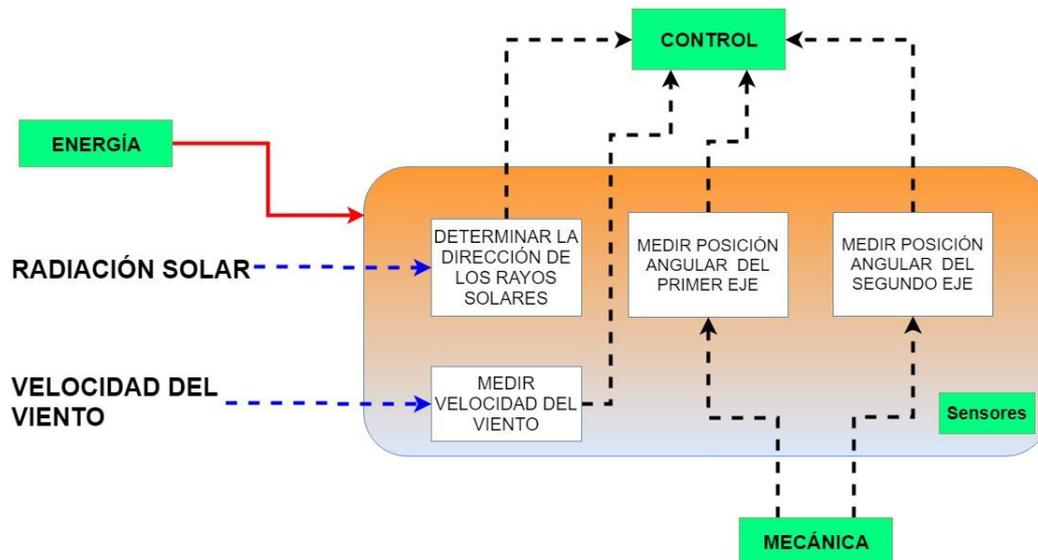


Figura 2. 4 Bloque de sensores. Elaboración propia.

Bloque de control

El bloque de control del sistema, mostrado en la Figura 2.5, se encarga de realizar el procesamiento de las señales medidas por el bloque de sensores. En adición, realiza las siguientes funciones: Análisis de la velocidad de viento, control del ángulo de giro e inclinación del panel solar y un análisis del correcto funcionamiento de los actuadores. Para el control de los ángulos en los dos ejes, recibe el análisis de cómo afecta el viento al panel solar, recibe las posiciones angulares actuales y se ejecuta la lógica de control necesaria para obtener las posiciones angulares deseadas.

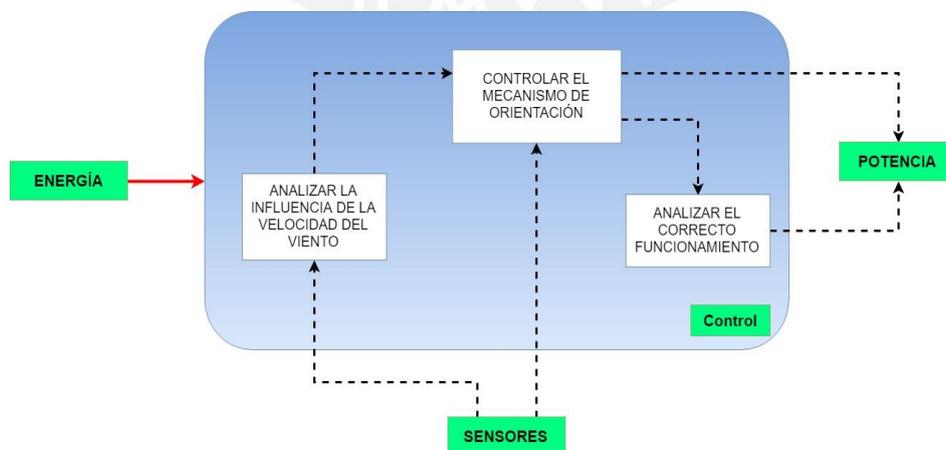


Figura 2. 5 Bloque de control. Elaboración propia.

Bloque de potencia

En la Figura 2.6 se presenta el bloque de potencia, el cual se encarga de enviar señales que accionaran a los actuadores una vez que hayan recibido información de la parte de control.

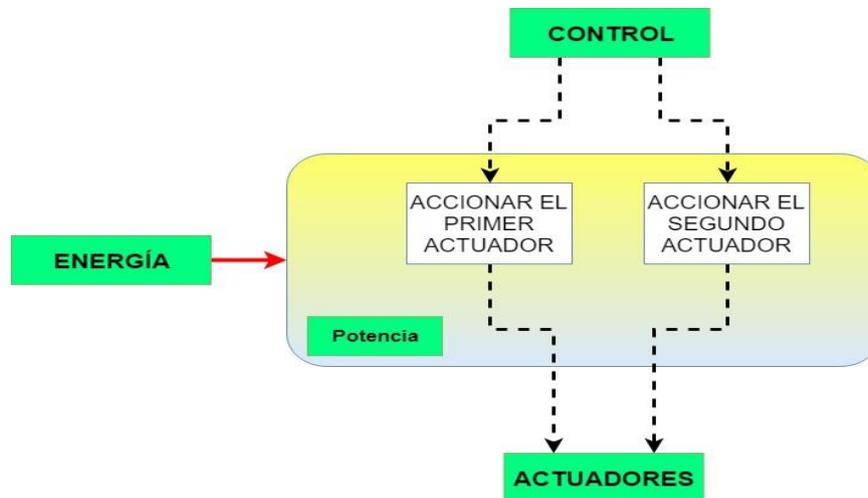


Figura 2. 6 Bloque de potencia. Elaboración propia.

Bloque de actuadores

En el bloque de los actuadores (Figura 2.7), se detallan los dispositivos que transformarán la energía eléctrica a mecánica. La función principal es transformar la energía suministrada en movimiento para desplazar el sistema. También estarán los dispositivos encargados de transformar las señales de control en la alerta de mal funcionamiento y los actuadores que indicarán el estado de funcionamiento de la máquina.

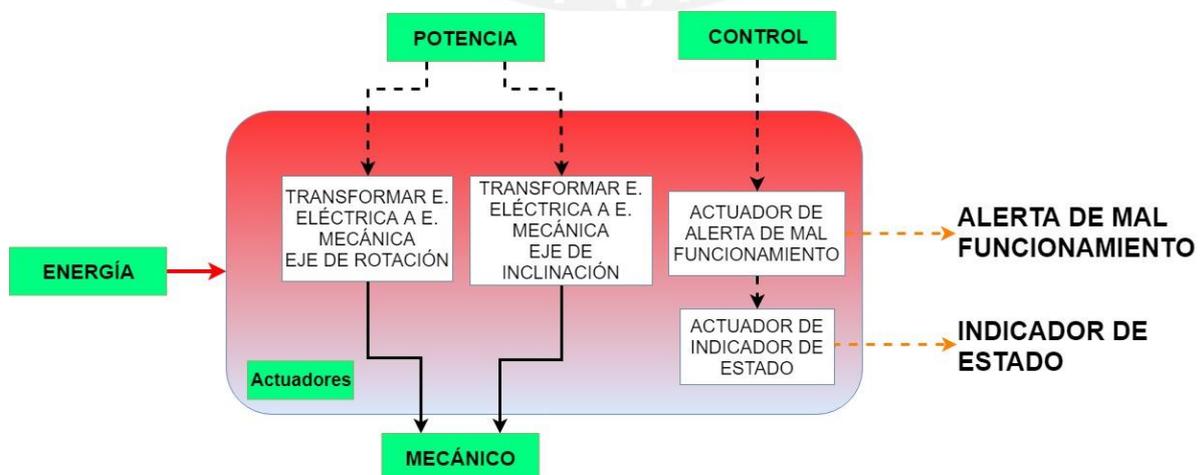


Figura 2. 7 Bloque de actuadores. Elaboración propia.

Bloque mecánico

En la Figura 2.8 se presenta el bloque mecánico, en donde se observa que las funciones de transmitir potencia reciben la energía de los actuadores para lograr la orientación del panel solar. Por otro lado, el panel solar será conectado a la estructura que soporte dicho elemento; así también con los actuadores, los elementos de transmisión de potencia y los componentes electrónicos. Finalmente deberá existir un elemento que permita fijar la estructura total al suelo.

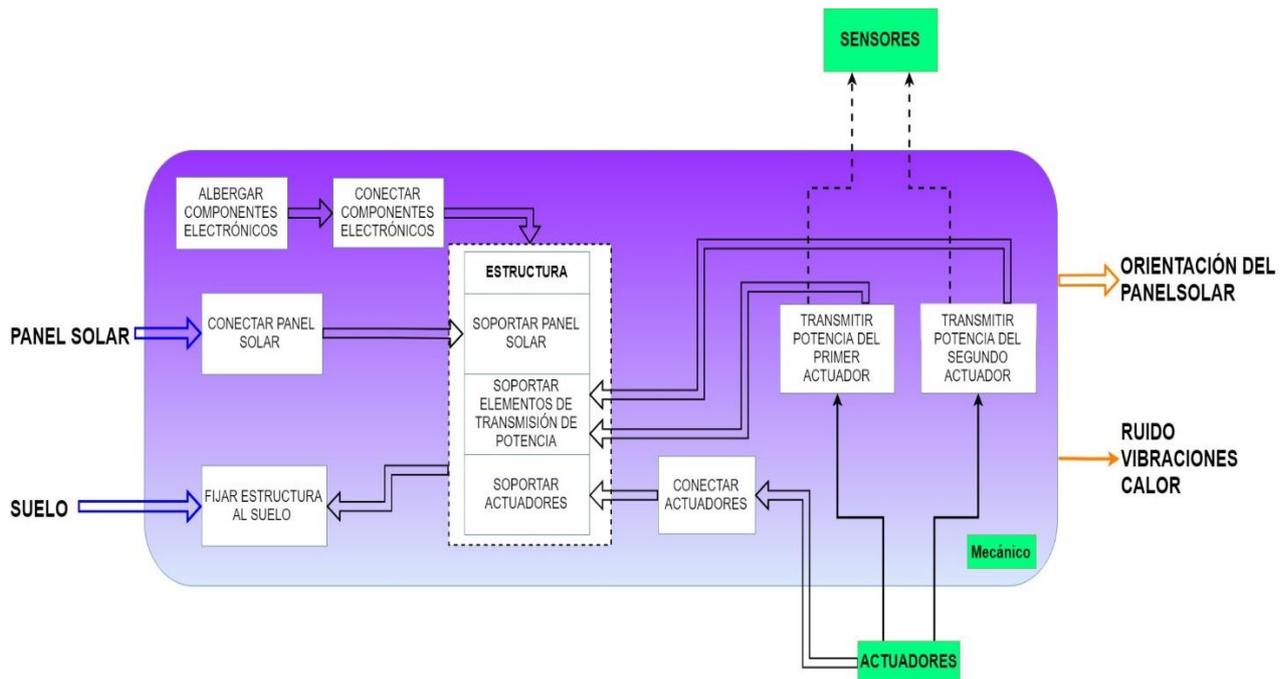


Figura 2. 8 Bloque mecánico. Elaboración propia.

2.3 Elaboración de la alternativa de solución óptima

2.3.1 Matriz morfológica

A partir de la estructura de funciones se determinan los componentes convenientes para que se realicen las funciones descritas según los dominios presentados anteriormente. Por lo que, se presenta la Tabla 2.2 con los elementos de cada alternativa de solución. El detalle de la elaboración de las matrices morfológicas se encuentra en el anexo A2.

Tabla 2. 2 Representación de la matriz morfológica. Elaboración propia.

PORTADOR DE FUNCIONES	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Dominio de energía			
Encender / Apagar	Interruptor	Botones	Interruptor
Acondicionar energía	Regulador conmutado	Regulador lineal	Regulador conmutado
Dominio de sensores			
Medir velocidad del viento	Anemómetro	Veleta	Veleta
Medir rayos solares	Arreglo de LDR foto sensitivos	Piranómetro	Arreglo de LDR foto sensitivos
Medir posición angular del primer eje	Encoder	Acelerómetro	Sensor IMU
Medir posición angular del segundo actuador	Encoder	Encoder	Sensor de distancia
Dominio de potencia			
Accionar actuadores	Modulo driver	Arreglo de mosfets	Arreglo de BJTs
Dominio de actuadores			
Transformar E. eléctrica a E. mecánica eje de rotación.	Motor DC	Motor paso a paso	Servomotor
Transformar E. eléctrica a E. mecánica eje de rotación	Motor DC	Servomotor	Actuador lineal eléctrico
Alertar mantenimiento	Juego de LEDs	Pantalla LCD	Bocinas
Indicar estado de funcionamiento	Pantalla LCD	Pantalla LCD	Juego de LEDs
Dominio mecánico			
Conectar panel solar	Abrazadera en U	Abrazadera en S	Directa / tornillo
Soportar panel solar	Estructura en H	Estructura en H	Estructura en marco
Fijar estructura al suelo	Soporte en H	Soporte tipo mesa	Soporte plano
Transmitir potencia del primer actuador	Engranajes	Reductor	Engranajes
Transmitir potencia del segundo actuador	Engranajes	Transmisión por cadena	Transmisión directa
Conectar componentes electrónicos	Conector tipo L	Tornillo	Conector tipo
Albergar / soportar / proteger componentes electrónicos	Bosquejos de la estructura en cada concepto de solución		
Dominio de control			
Controlador	Microcontrolador	PLC	Microcomputadora

2.3.2 Desarrollo de las alternativas de solución

Con ayuda de la matriz morfológica se determinaron tres propuestas de solución integral que se describen líneas abajo.

- **Concepto de solución 1:**

La propuesta de solución 1, mostrado en la Figura 2.9, está conformado: en primer lugar, por un interruptor ON/OFF que contralará la energización de los sistemas, función que se llevará a cabo mediante reguladores conmutados que proporcionaron el voltaje necesario para cada dominio que haga uso de energía eléctrica. En segundo lugar, para la medición de variables se utilizará lo siguiente dispositivos: un anemómetro para obtener la velocidad del viento, un arreglo de LDR foto sensitivos para obtener la dirección de los rayos solares y dos encoders para obtener la posición angular del eje de rotación e inclinación. En tercer lugar, se usarán dos motores DC para ejecutar el ángulo de rotación y el ángulo de inclinación, para la activación de los dos actuadores se utilizarán módulos de driver, los cuales controlan la inyección de corriente y voltaje hacia los motores; la transformación de potencia de los actuadores hacia la estructura se dará mediante engranajes para el ángulo de rotación y para el ángulo de inclinación se utilizará un tornillo sin fin y una rueda dentada. Además, usará una estructura en H para el soporte del panel solar, una abrazadera para conectar el panel solar con la estructura, un conector tipo L para cajas eléctricas y un soporte tipo H para fijar la estructura al suelo. En cuarto lugar, se utilizará un juego de leds para dar una alerta de mal funcionamiento en los actuadores y una pantalla LCD para indicar el estado de funcionamiento del sistema. Por último, se utilizará un microcontrolador para el sistema de control.

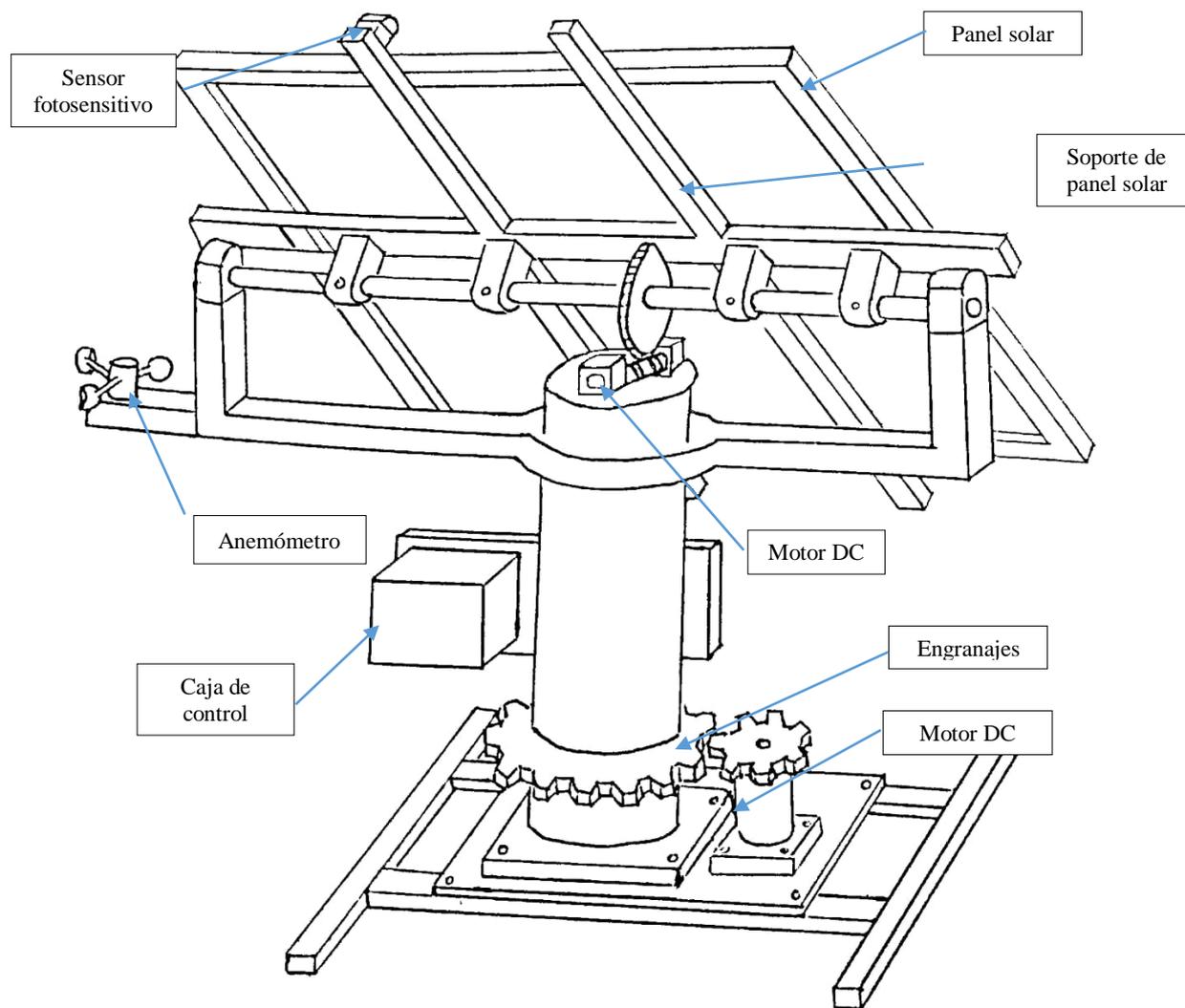


Figura 2. 9 Bosquejo de la alternativa1. Elaboración propia.

- **Concepto de solución 2:**

El concepto de solución mostrado en la Figura 2.10 corresponde a un modelo en el cual se hace uso de un motor de paso para el ángulo de rotación, el cual transmite la potencia generada mediante un reductor y acople, un servomotor para el ángulo de inclinación, que utiliza cadenas para la transmisión de potencia; los actuadores estarán activados mediante arreglo de mosfets. Además, la estructura utilizará un soporte tipo mesa para ser fijado en el suelo, se utilizará una abrazadera tipo S para conectar el panel solar con la estructura de soporte que tendrá la forma en H. Por otro lado, el sistema de mediciones está conformado por: una veleta para la obtención de la velocidad del viento, un piranómetro para determinar la dirección de los rayos solares, un acelerómetro para determinar la posición angular de rotación y un encoder incremental para la

posición angular del ángulo de inclinación. El sistema de control estará basado en un PLC y el sistema de alerta de funcionamiento e indicador de estado serán mostrados mediante una sola pantalla LCD.

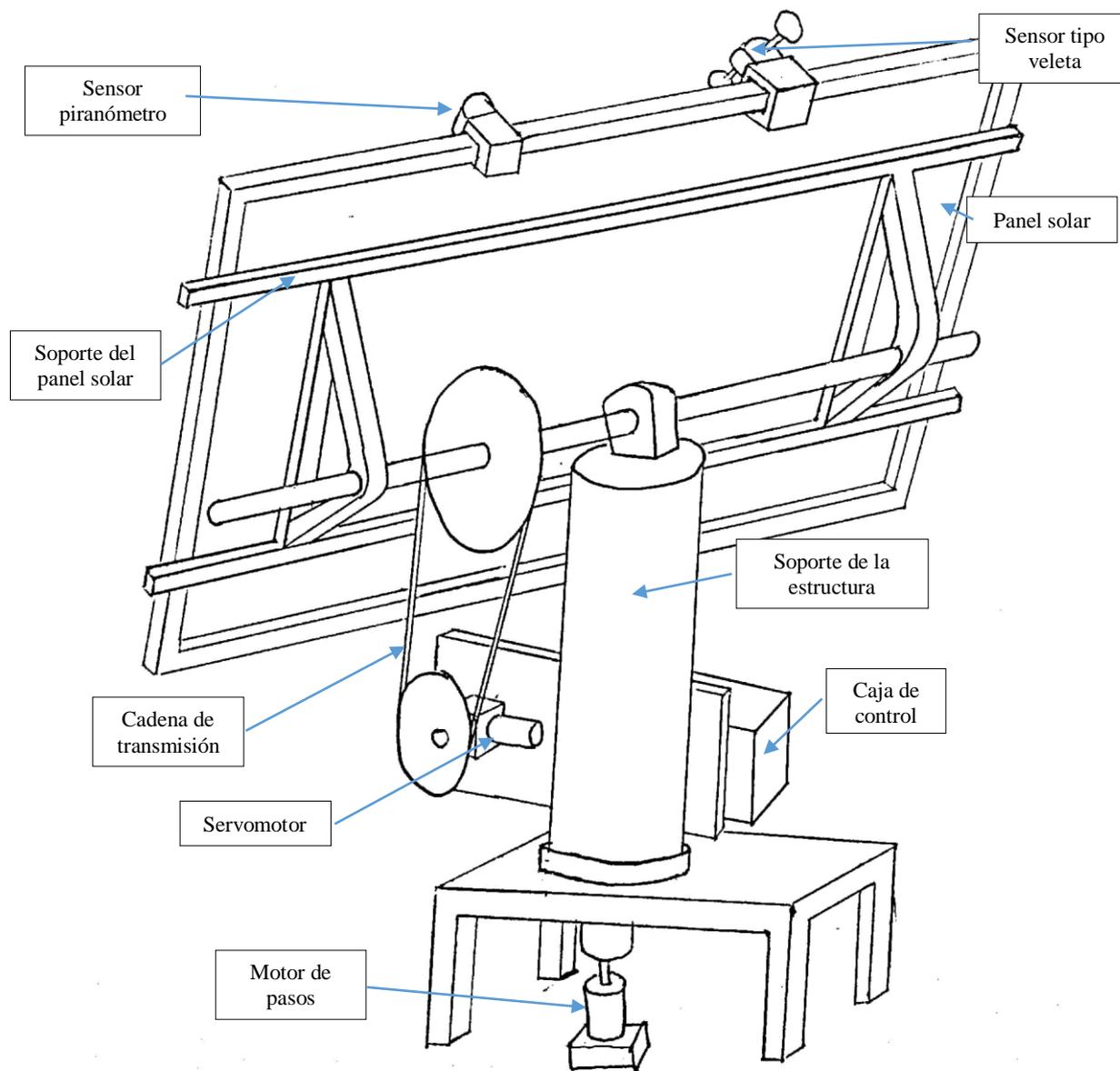


Figura 2. 10 Bosquejo de la alternativa 2. Elaboración propia.

- **Concepto de solución 3:**

La propuesta de solución 3 de la Figura 2.11, está conformado: en primer lugar, por un interruptor que contralará la energización de los dominios que requieran de la misma, la regulación de energía será mediante reguladores conmutados que brindarán el voltaje adecuado

a cada sistema. En segundo lugar, se hará uso de un servomotor para el ángulo de rotación, la transmisión será mediante engranajes; para el ángulo de inclinación se hará uso de un actuador lineal eléctrico, mostrado en la Figura 2.12; el accionamiento de los dos actuadores se utilizará un arreglo de BJTs. En tercer lugar, el dominio de sensores estará conformado por un sensor tipo veleta para la obtención de la velocidad del viento, un arreglo de fotorresistencias para la determinación de la dirección de los rayos solares, un sensor IMU para la obtención de la posición angular del eje de rotación y un sensor infrarrojo de distancia para la determinación del ángulo de inclinación que está relacionado con la carrera del actuador lineal. En cuarto lugar, se hará uso de una alerta sonora cuando se active la detección de un mal funcionamiento y un juego de leds para los indicadores de estado. Por último, el encargado del procesamiento de las señales eléctricas de los sensores y actuadores será un microcomputador.

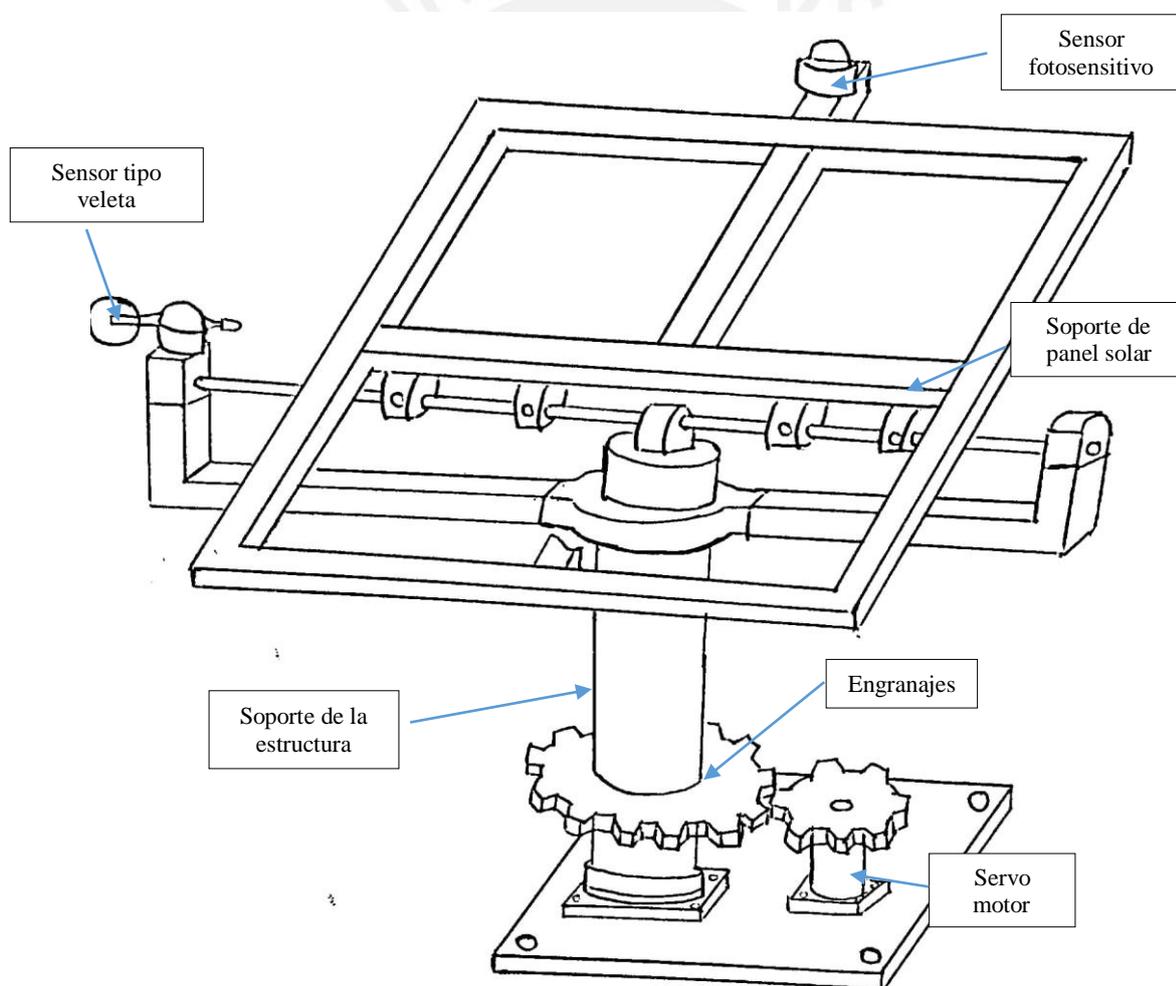


Figura 2. 11 Bosquejo de la alternativa 3. Elaboración propia.

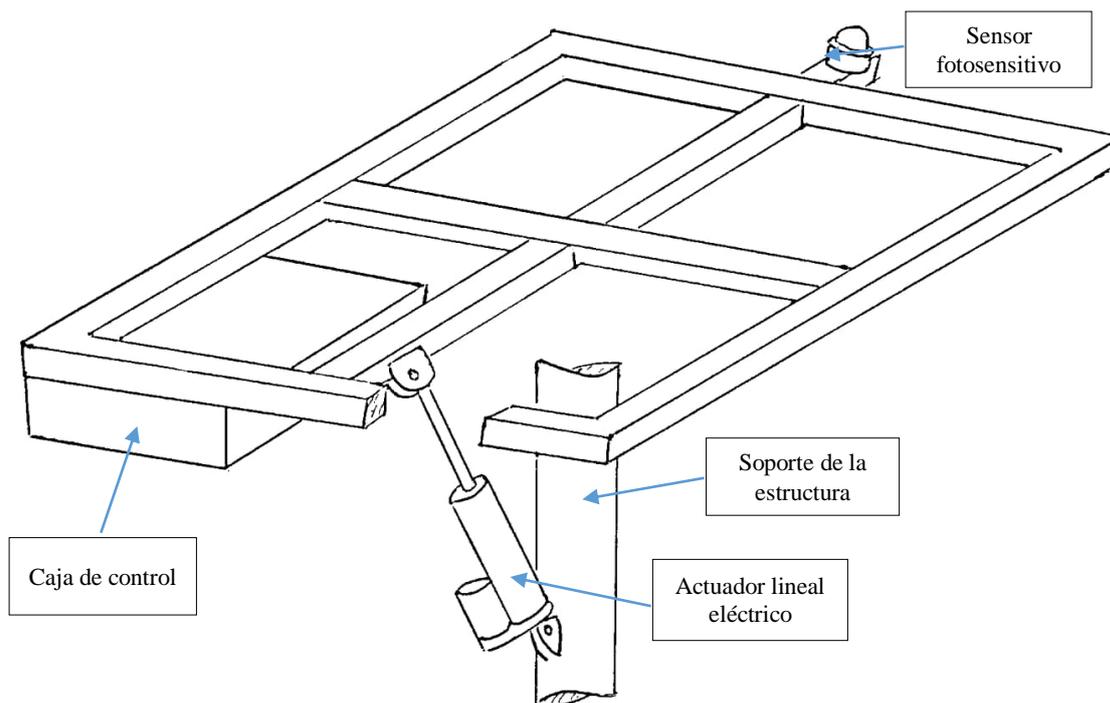


Figura 2. 12 Detalle del mecanismo de inclinación. Alternativa 3. Elaboración propia.

2.3.3 Evaluación técnico – económica

Esta evaluación se lleva a cabo siguiendo las recomendaciones de la norma VDI 2225, la cual basa los criterios de calificación en criterios técnicos y económicos.

- **Evaluación técnica**

Las valoraciones de cada criterio técnico están en el rango de 1 a 4, siendo la valoración 4 como la de mayor importancia y 1 como la menor. Los criterios técnicos son los siguientes:

Consumo energético: Este criterio tiene un peso de 4 debido a que el objetivo más importante del proyecto es mejorar el rendimiento energético de un sistema de paneles solares fijos. En este criterio se evaluará el consumo energético de los componentes electrónicos de las tres soluciones preliminares descritas anteriormente.

Operación: En este criterio se evaluará las restricciones que puedan poseer los actuadores y sistemas de transmisión de potencia, debido a que estos elementos hacen posible el cumplimiento de la función principal, la cual es un seguidor solar en dos ejes, por esta razón este criterio tendrá un peso de 3.

Mantenimiento: Debido a que el proyecto está orientado a zonas de difícil acceso donde el mantenimiento no puede realizarse frecuentemente el mantenimiento es un criterio a evaluar, sin embargo, no es el objetivo principal. Por lo cual este criterio tiene un peso de 2. En este criterio se evaluará los componentes de transmisión de potencia, que sufren desgaste por la realización de su función.

Forma: Este criterio tiene un peso de 1 debido a que se busca que el proyecto tenga una manera sencilla de ensamblarse y fabricarse. Sin embargo, este criterio no es tan importante para el funcionamiento principal del proyecto. Este criterio principalmente evaluará la forma de los componentes de sujeción y soporte de toda la estructura.

Cada concepto de solución será evaluado con un puntaje de 0 a 4, siguiendo como referencia la escala de valores VDI 2225, en donde 4 representa la solución ideal o excelente y 0 representa que la solución que no satisface el criterio evaluado.

Evaluación técnica del concepto de solución 1:

Este concepto cumple con la función principal de seguir al sol con movimientos angulares en dos ejes, además de no poseer restricción alguna en los ángulos de giro por parte de los actuadores con los que se genera el movimiento ni con los elementos que transmiten la potencia, por lo cual se le asigna un puntaje de 3 en el criterio de operación. En cuanto a la energía, al usar dos motores DC, como máximos consumidores de potencia, se considera aceptable, además que gracias al mecanismo de tornillo sin fin y rueda dentada que es utilizado para el eje de inclinación el motor DC no deberá estar energizado para conservar su posición angular, por lo cual se le asigna un puntaje de 3. En cuanto al mantenimiento, al tener los dos mecanismos

de transmisión de potencia mediante engranajes se considera una solución regular, por consiguiente, se le asigna el valor de 2. En cuanto a la forma, se puede apreciar en la Figura 2.9 que esta solución posee elementos asimétricos y más grandes que los otros; en consecuencia, se le asigna un valor de 2 para este criterio.

Evaluación técnica del concepto de solución 2:

Este concepto también cumple con la función general de seguir al sol en dos ejes, al usar un motor de pasos y un servomotor no posee restricción en sus movimientos angulares por parte de los actuadores ni por los elementos de transmisión de potencia, tomando en consideración lo anterior se le asigna el valor de 3 para el criterio de operación. En cuanto al consumo energético, al usar como elemento de transmisión de potencia una cadena, el servomotor deberá permanecer energizado para conservar su posición angular, esta solución es menos eficiente que la solución 1, por lo cual se le asigna el valor de 2. En cuanto al mantenimiento, al usar una cadena y ruedas dentadas se vuelve más complicado el proceso de mantenimiento; sin embargo, a un mismo nivel que la solución 1, por lo cual en este criterio se le asigna el valor de 2. En cuanto a la forma, se aprecia en la Figura 2.10 una forma simple, menos compleja que la solución 1, por lo cual se le asigna el valor de 3.

Evaluación técnica del concepto de solución 3:

El concepto 3 cumple con la función principal de lograr 2 movimientos angulares. Sin embargo, al usar un actuador lineal para el ángulo de inclinación, la posición angular se ve restringida a la carrera del actuador, por lo cual las dos soluciones previas son mejores en este aspecto y por este motivo se le asigna un valor de 2 en el criterio de operación. En cuanto a la energía, esta solución se considera aceptable debido al uso de un servomotor y un actuador eléctrico que en conjunto con los mecanismos de transmisión de potencia no deberán permanecer energizados para mantener su posición, por lo cual se le asigna un valor de 3. En cuanto al mantenimiento, al usar el actuador lineal y un solo juego de engranajes para la posición angular de rotación, se considera a esta solución mejor que las 2 soluciones previas, por lo cual se le asigna un valor de 3. Finalmente podemos observar en la Figura 2.11 y Figura 2.12 que la forma de esta solución es bastante simple, por lo cual se le asigna un valor de 3.

- **Evaluación económica**

Al igual que la evaluación técnica, las valoraciones para cada criterio están en el rango de 1 a 4. Los criterios para la evaluación económica son los siguientes:

Costo de tecnologías: Este criterio es importante ya que el sistema de control será el encargado de relacionar a los sensores y actuadores para la realización de la función principal, seguir al sol en dos ejes. Por lo cual tiene un peso de 4. En este criterio se evaluará el costo del hardware del sistema de control y los actuadores, elementos que tienen un mayor costo dentro del dominio electrónico.

Costo de materiales: Al igual que el criterio de costo de tecnología, este criterio es importante, debido a que los sistemas de transmisión de potencia son elementos fundamentales para lograr el movimiento angular en dos ejes para la realización de la función principal, por lo cual este criterio tiene un peso de 3. Se evaluará el costo de los elementos de todo el sistema y en especial los elementos de transmisión de potencia.

Cantidad de piezas: Este criterio tiene un peso de 2 debido a que se busca una solución con la menor cantidad de piezas lo cual indicaría una menor cantidad de costo de fabricación. Por lo cual en este criterio se evalúa la cantidad de piezas que estará relacionado con el costo de las mismas.

Evaluación económica del concepto de solución 1:

Debido al uso de 2 juegos de engranajes como transmisores de potencia, el costo de materiales es mediano, por lo que el puntaje asignado para este criterio es 2. Los elementos que generan un mayor costo son el microcontrolador, los motores DC y el anemómetro, por lo cual el costo de tecnología es aceptable asignando un valor de 3 para este criterio. Como se observa en la Figura 2.9 la solución 1 posee una cantidad mayor de elementos que la solución 3, por lo cual se le asigna un valor de 2.

Evaluación económica del concepto de solución 2:

Debido al uso de 1 juego de engranajes y un sistema de transmisión de potencia mediante una cadena el costo de materiales es mediano y al igual que la solución 1 se le asigna un valor de 2 en este criterio. En cuanto a las tecnologías, la solución 2 utiliza un PLC para el procesamiento de datos, un motor de pasos, un servo motor, como elementos de accionamiento para los movimientos angulares y un piranómetro, utilizado para obtener la dirección de los rayos solares, por lo que el costo de materiales es mayor que el de la solución 1, tomando en consideración lo anterior se le asigna un valor de 2. En cuanto a la cantidad de piezas, mostrado en la Figura 2.11, tiene un número menor de elementos que la solución 1, por lo cual se le asigna un valor de 3.

Evaluación económica del concepto de solución 3:

Debido al uso de 1 juego de engranajes y un acople directo con el actuador eléctrico lineal el costo de materiales es bajo, por lo cual se le asigna un valor de 3. En cuanto al costo de las tecnologías esta solución utiliza un microcomputador, un servomotor y un actuador lineal eléctrico para el movimiento angular, por lo cual el costo de tecnologías es alto y se le asigna un valor de 1. La cantidad de piezas usadas en esta solución es menor que la solución 1, por lo cual tiene un valor de 3 en este criterio.

A continuación, se muestra la tabla de evaluación técnica Tabla 2.2 y la evaluación económica Tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Tabla de evaluación técnica.

Criterios de evaluación técnica para diseño de conceptos										
Variantes de concepto		Sol 1			Sol 2		Sol 3		Ideal	
Nº	Criterio de evaluación	G	P	GP	P	GP	P	GP	P	GP
1	Consumo energético	4	3	12	2	8	3	12	4	16
2	Operación	3	3	9	3	9	2	6	4	12
3	Mantenimiento	2	2	4	2	4	3	6	4	8
4	Forma	1	2	2	3	3	3	3	4	4
Puntaje		10	27	10	24	11	27	16	40	
Valor técnico		0,68			0,60		0,68		1	

Tabla 2. 4 Tabla de evaluación económica.

Criterios de evaluación económica para diseño de conceptos										
Variantes de concepto		Sol 1			Sol 2		Sol 3		Ideal	
Nº	Criterio de evaluación	G	P	GP	P	GP	P	GP	P	GP
1	Costo de tecnologías	4	3	12	2	8	1	4	4	16
2	Costo de materiales	3	2	6	2	6	3	9	4	12
3	Cantidad de piezas	2	2	4	3	6	3	6	4	8
Puntaje		7		22	7	20	7	19	12	36
Valor económico		0,61			0,56		0,52		1	

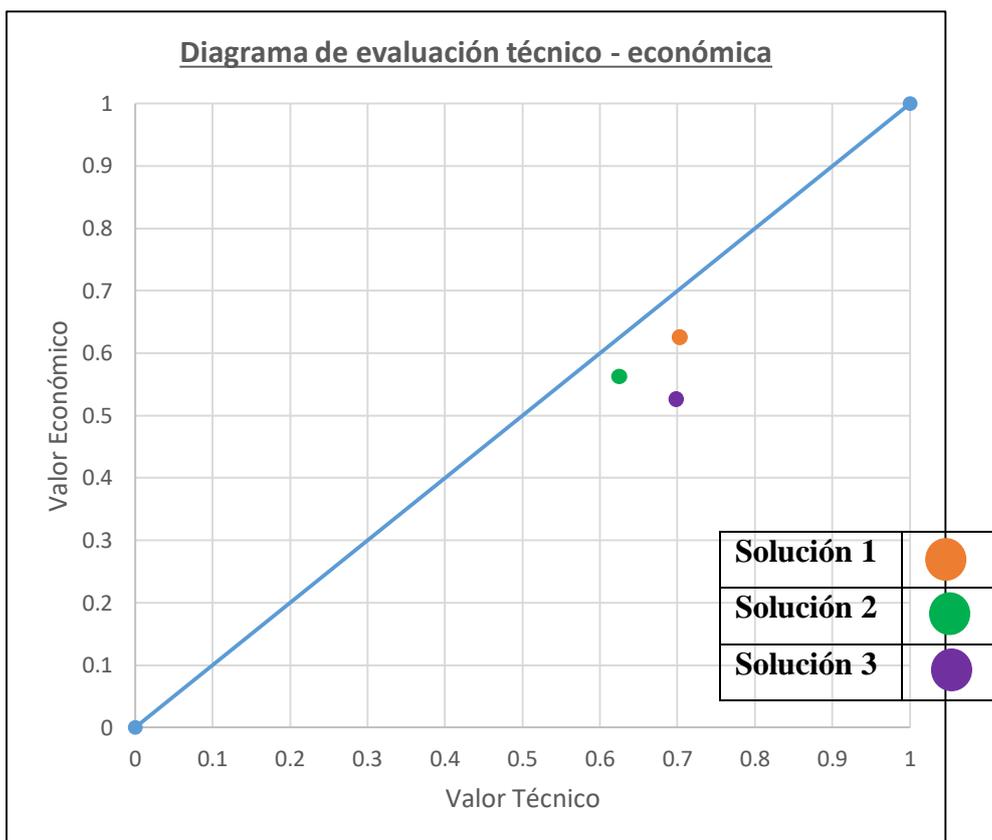


Figura 2. 13 Diagrama de evaluación técnico económica. Elaboración propia.

De acuerdo al análisis técnico – económico elaborado en las Tablas 2.2 y 2.3, y la Figura 2.13, se observa que la solución 1 y 3 sobrepasan el valor de 0.6 tanto en el eje técnico como en el eje económico. Tomando en consideración la diagonal de balance técnico – económico, la solución 1 es la que ofrece una mejor solución aproximándose en 0,7 en el eje técnico y a 0.6 en el eje económico.

2.4 Elaboración del diseño definitivo

A continuación, se desarrollará la solución óptima, mejorando los aspectos en donde la alternativa 1 sacó un menor puntaje tanto en la evaluación técnica como en la evaluación económica y se detallarán los mecanismos de conexión.

Según la evaluación técnico – económico la mejor solución es la numero 1. Sin embargo, se puede observar en la Tabla 3.2 que, en el criterio de forma, la solución 1 tiene un puntaje de 1, esto debido al elemento de sujeción del eje, por el cual se logra la inclinación del panel solar. En consecuencia, se realiza la modificación del elemento de sujeción a un elemento más simple y más pequeño, mostrado en la Figura 2.14, además se modifica la conexión con la caja electrónica, que contendrá al microcontrolador, la pantalla LCD y los indicadores LEDs, por un elemento más simple, mostrado en la Figura 2.15; con esto también se logra la disminución de la cantidad de piezas, criterio económico en el cual también obtuvo un puntaje bajo. Además, se realiza un cambio en el sistema de transmisión de potencia del eje de rotación, de un juego de engranajes a una rueda dentada y un tornillo sin fin; esto con la finalidad de una mejor sujeción del motor y eje, dicha modificación se detalla en la Figura 2.16. En la Figura 2.17 se detalla el elemento de conexión entre el soporte principal del eje de rotación y el engranaje. Realizando las modificaciones obtenemos la solución óptima mostrada en la Figura 2.18, en la cual se le añadió un aislamiento de los elementos que transmiten la potencia de los actuadores con la finalidad de protección.

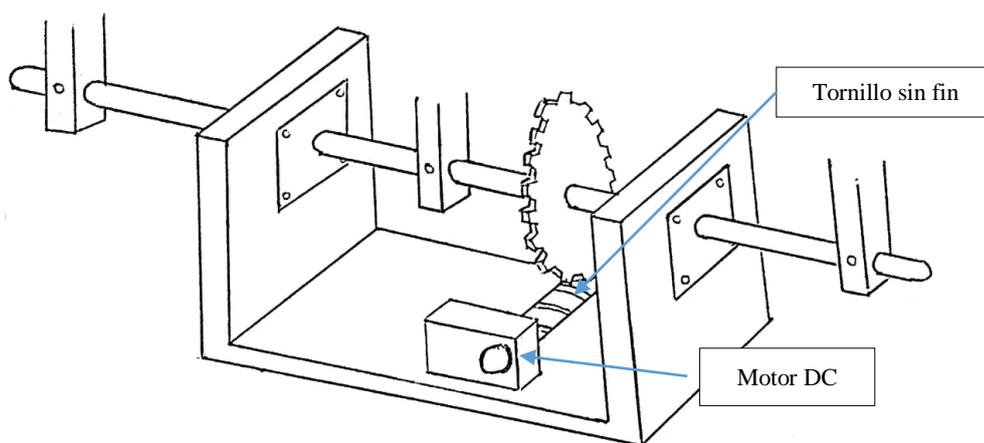


Figura 2. 14 Detalle del elemento de sujeción del eje. Elaboración propia.

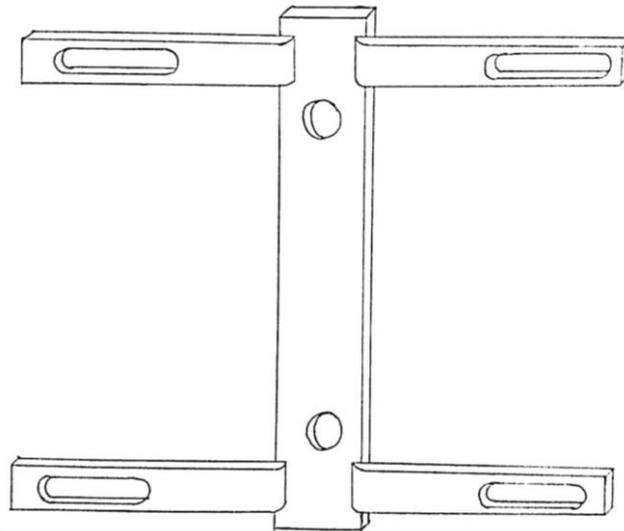


Figura 2. 15 Elemento de conexión de la caja electrónica. Elaboración propia.

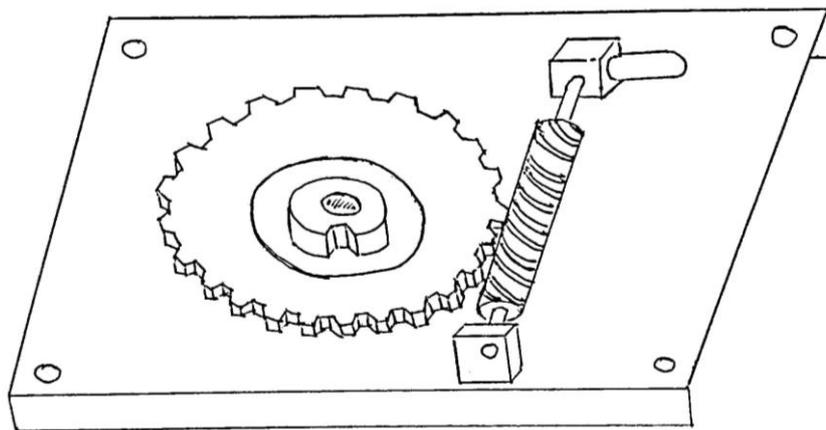


Figura 2. 16 Mecanismo de transmisión de potencia de rotación. Elaboración propia.

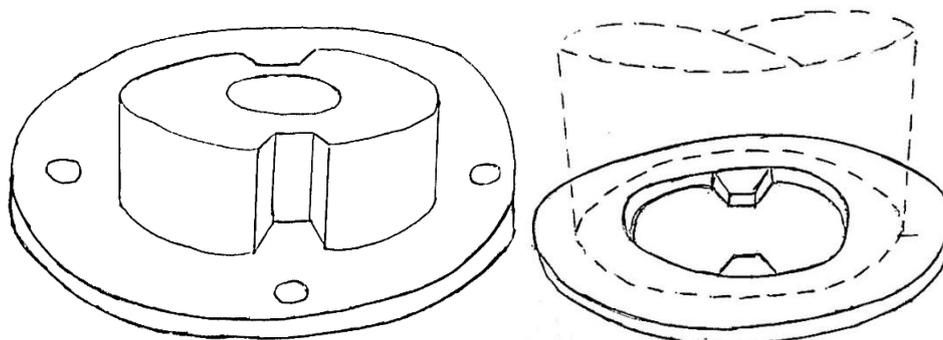


Figura 2. 17 Mecanismo de conexión del soporte principal. Elaboración propia.

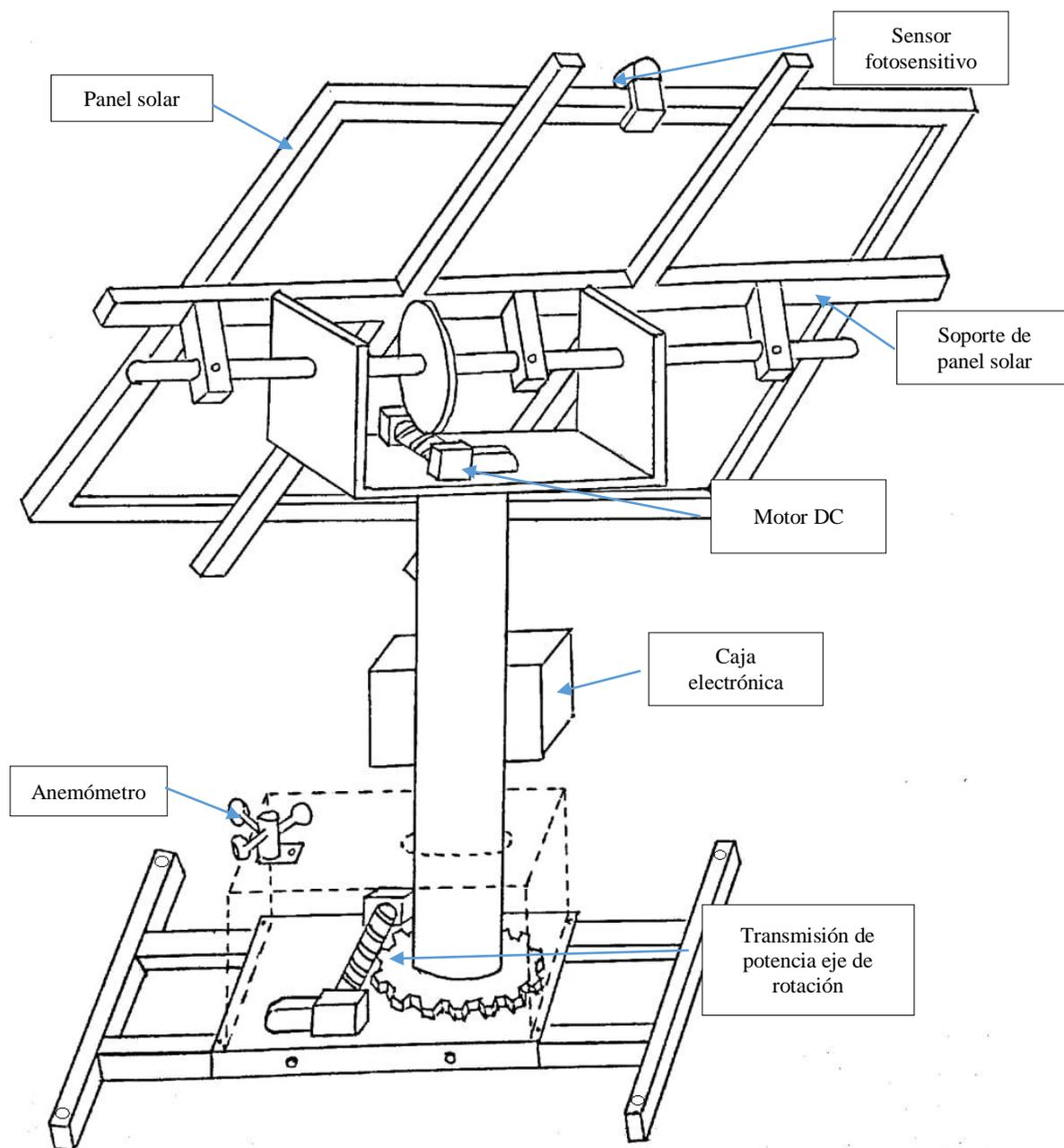


Figura 2. 18 Concepto de solución óptimo. Elaboración propia.

2.4.1 Modelo 3D

Siguiendo la elaboración del diseño definitivo se realiza un modelamiento en 3D con dimensiones aproximadas de los elementos que componen el sistema. Se muestra en la Figura 2.19 una vista de la estructura frontal, en donde se puede apreciar la ubicación de los elementos y en la vista posterior, mostrado en la Figura 2.20, se puede observar el sistema de transmisión de potencia

para el movimiento de inclinación y el movimiento de rotación, además de la estructura de soporte del panel solar.

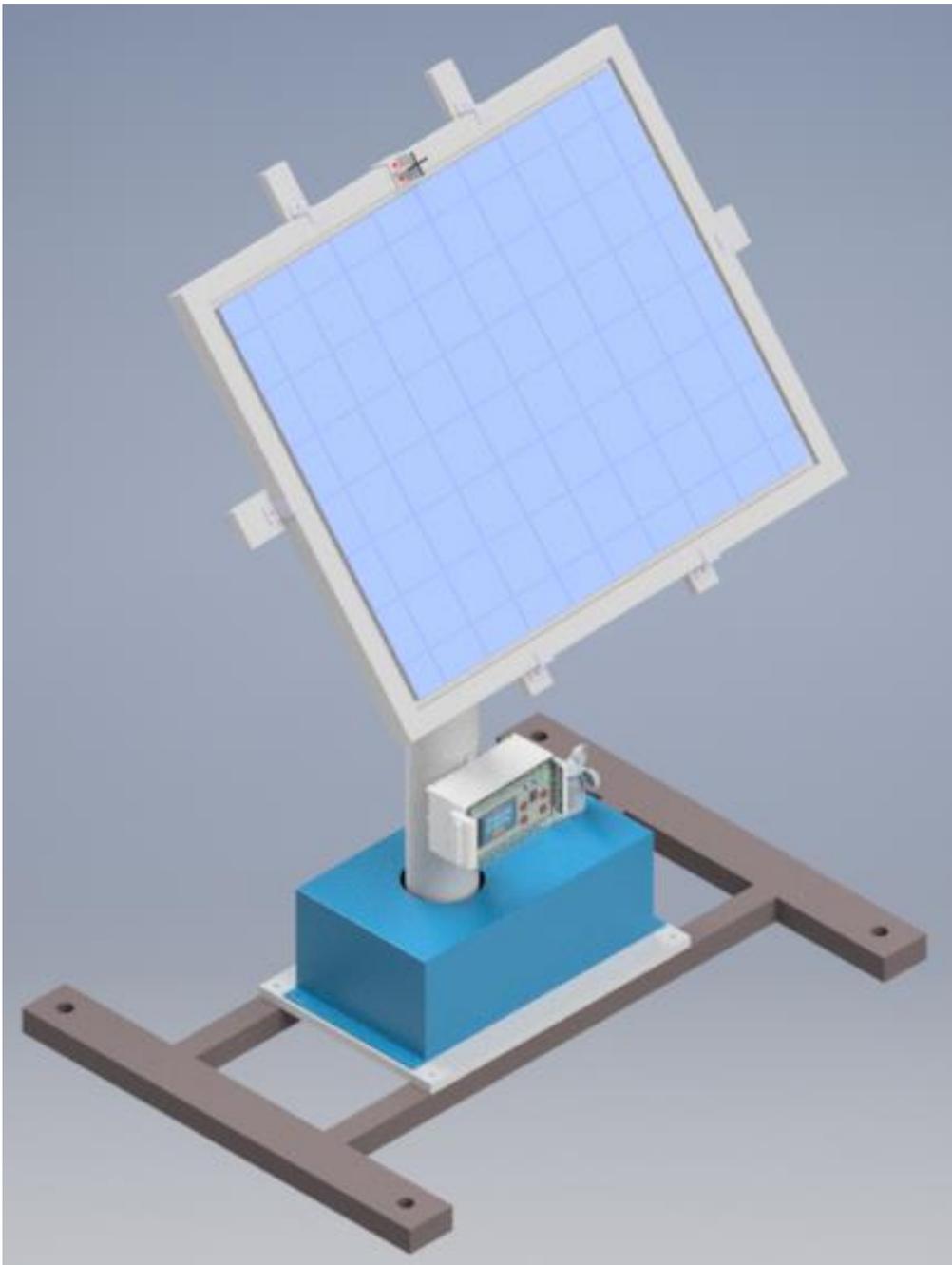


Figura 2. 19 Vista frontal. Modelo 3D. Elaboración propia.

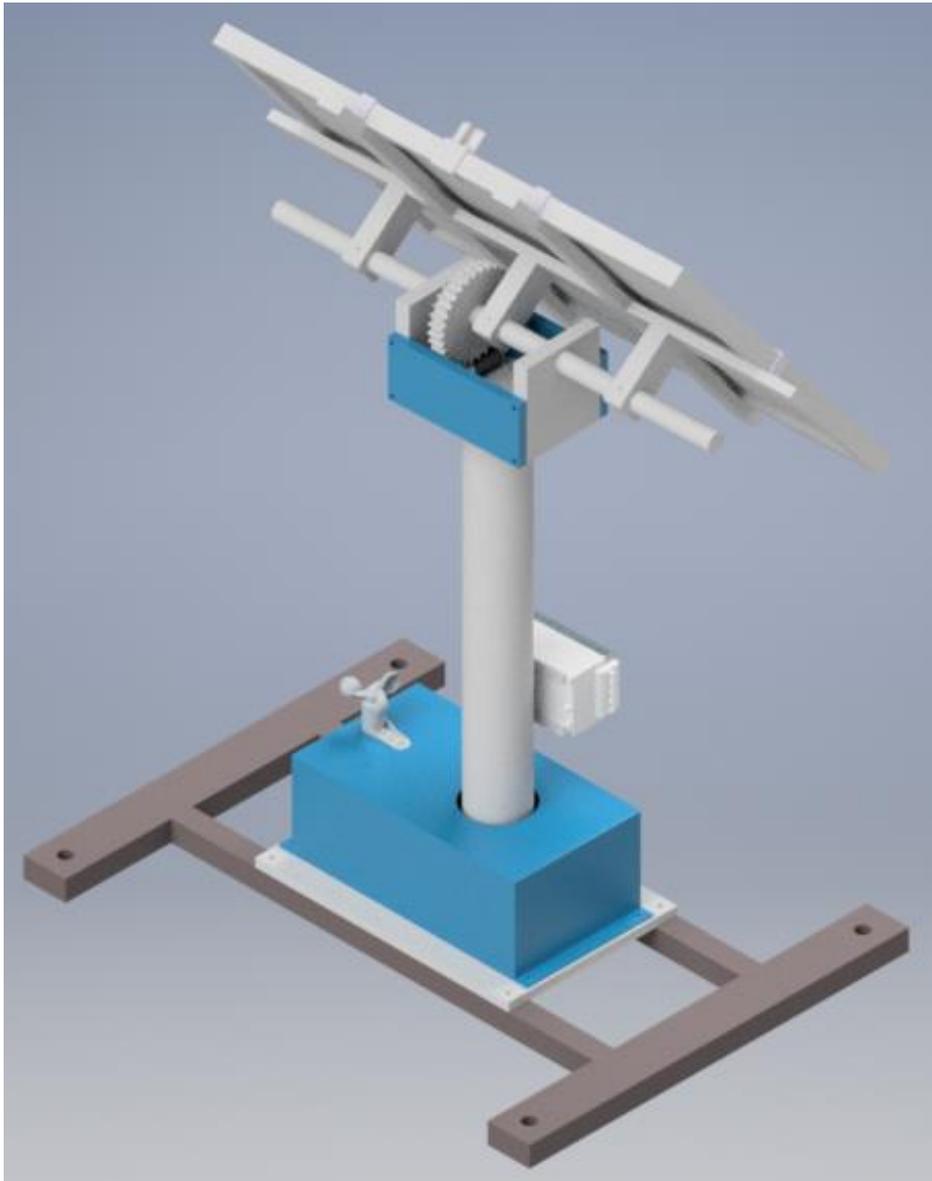


Figura 2. 20 Vista posterior. Modelo 3D Elaboración propia.

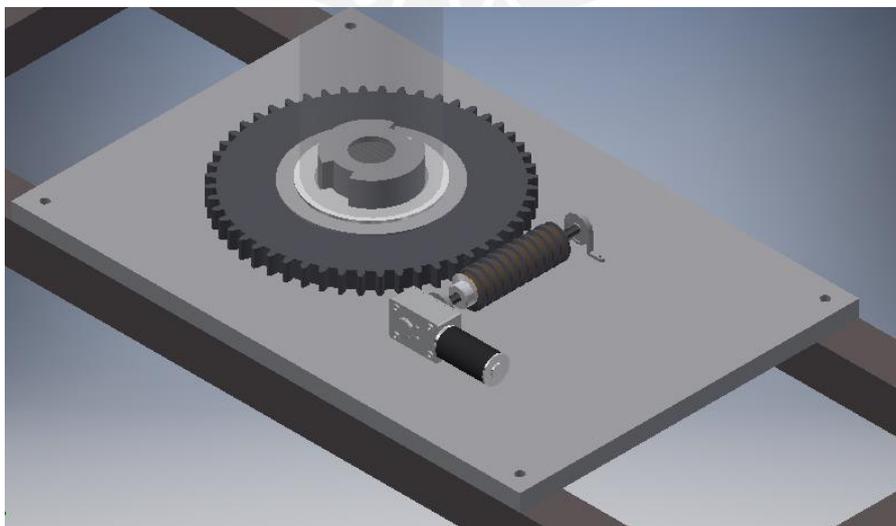


Figura 2. 21 Transmisión de potencia al eje de rotación Elaboración propia.

En la Figura 2.22 se aprecia el circuito impreso (PCB) que se diseñará para facilitar las conexiones internas, los componentes que estarán ubicados serán: el microcontrolador y dos drivers para los motores DC; así también en la Figura 2.23 se muestra la distribución de la pantalla LCD, LEDs, interruptor y botones; dichos elementos irán dentro de la caja electrónica.

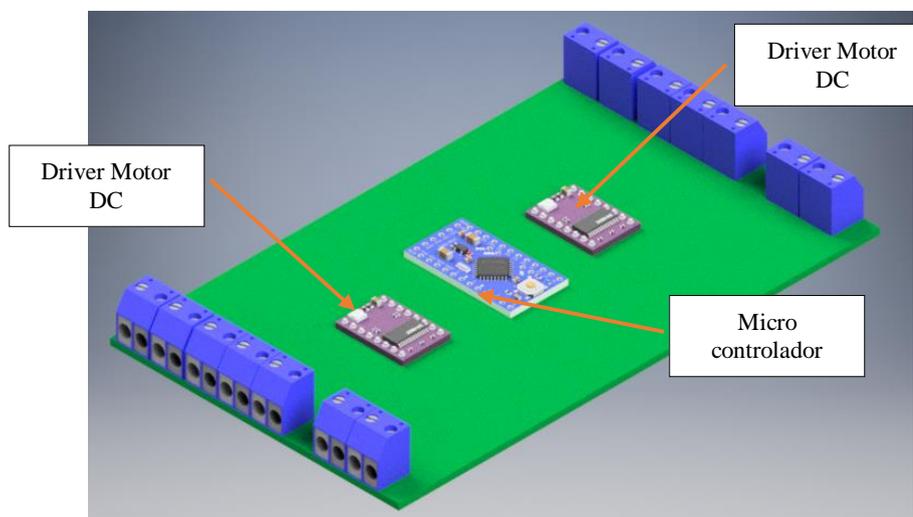


Figura 2. 22 Microcontrolador y drivers. Elaboración propia.



Figura 2. 23 Mando de control. Elaboración propia.

2.4.2 Arquitectura de hardware

En la Figura 2.24, se presenta las conexiones de los diferentes componentes electrónicos. El sistema de control se realizará por medio de un microcontrolador, al cual irán conectados los módulos driver, que permitirá controlar los dos motores DC, también estarán conectados el arreglo de sensores foto sensitivos, el anemómetro, dos encoder, la pantalla LCD y un juego de LEDs. La energización del microcontrolador y módulo driver se llevará a cabo mediante un

regulador de voltaje DC; por otro lado, los sensores, pantalla LCD y juego de LEDs estarán energizados por la fuente de alimentación propia del módulo electrónico que tiene el microcontrolador.

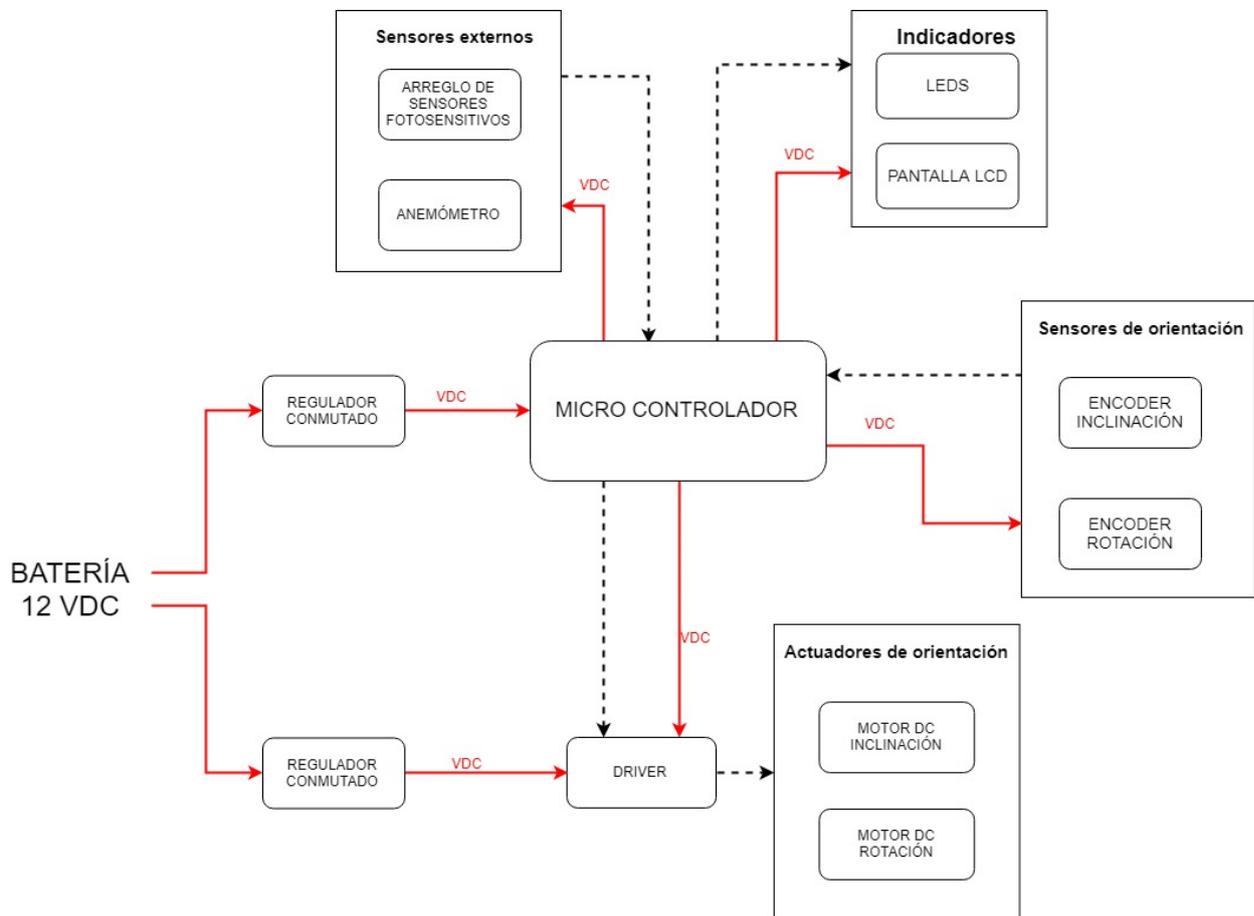


Figura 2. 24 Diagrama de bloques del sistema. Elaboración propia.

2.4.3 Diagrama de flujo del sistema

A continuación, se describe el diagrama de flujo del sistema, mostrado en la Figura 2.25. En este se describen las funciones de inicializar sistema y ejecutar el ciclo de funcionamiento. Como se vio en el marco histórico los sistemas de seguimiento solar híbridos poseen un mayor porcentaje de ganancia energética, por dicho motivo el control del sistema propuesta tendrá las cualidades de un seguidor activo y cronológico.

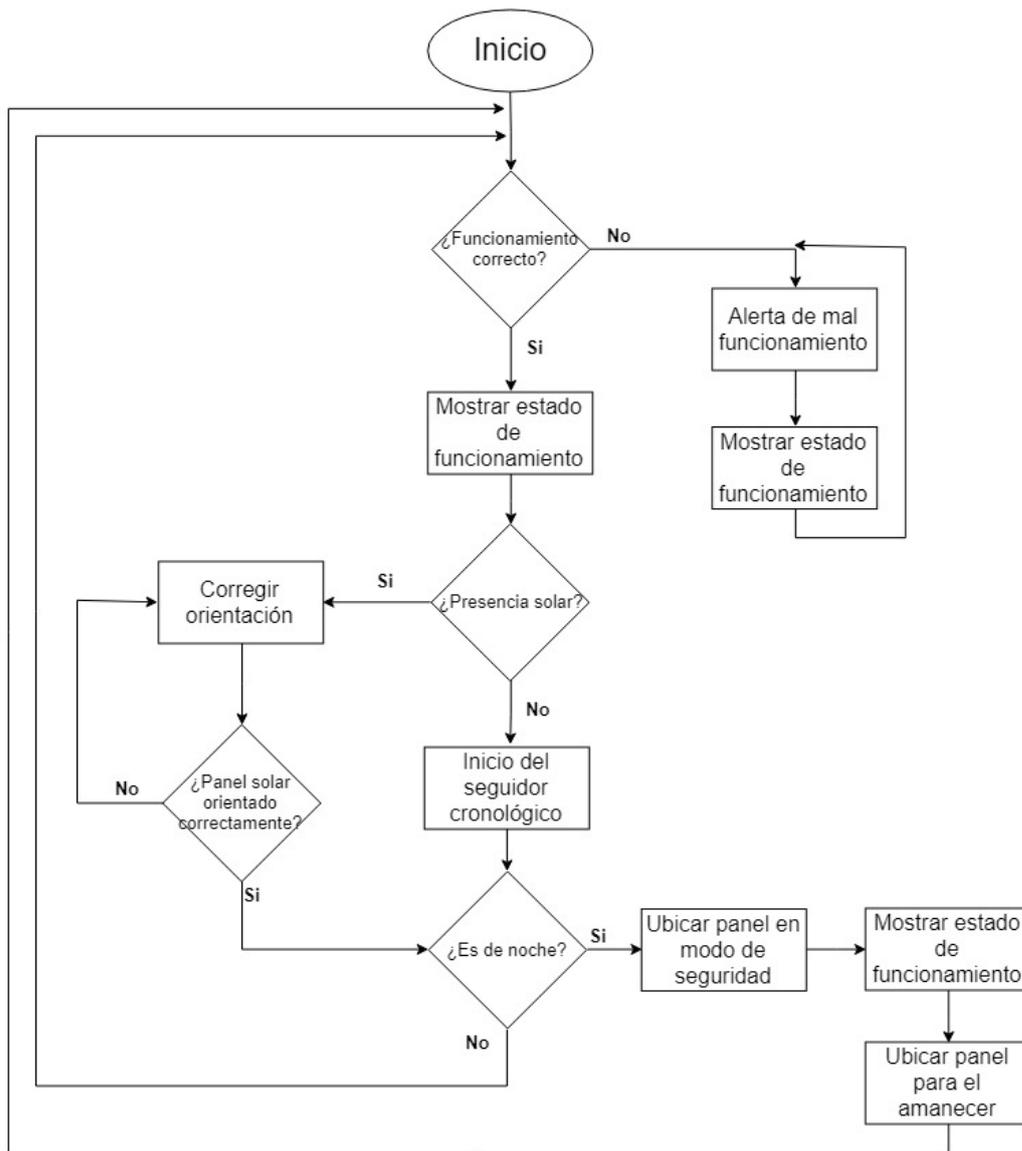


Figura 2. 25 Diagrama de flujo del sistema. Elaboración propia.

En la Figura 2.26, se muestra el proceso que se llevará a cabo para el sistema de protección en caso la presión del viento genere un riesgo para la estructura del seguidor solar.

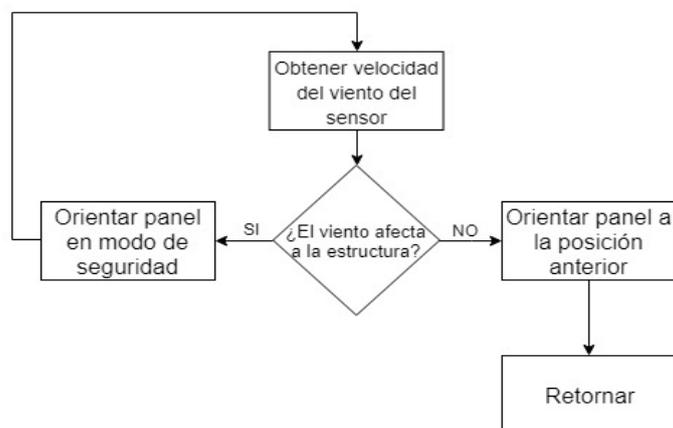


Figura 2. 26 Diagrama de flujo medición de la velocidad del viento. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se logró investigar y asimilar los conceptos teóricos implícitos en la investigación del presente trabajo, que demuestran la existencia de componentes electrónicos y mecánicos capaces de cumplir con el funcionamiento del diseño conceptual. Además, debido a la investigación se identificó que la combinación de un seguidor solar con un control activo y uno cronológico, es decir, un seguidor solar con control híbrido posee un mayor desempeño en la generación de energía eléctrica en condiciones climatológicas variables.

Se logró el diseño conceptual de un sistema capaz de orientar un panel fotovoltaico en la dirección de los rayos solares, con una tecnología de seguimiento que pueda operar tanto en días soleados, como en días nublados; por lo cual, se asegura el aprovechamiento máximo de la generación de energía eléctrica; lo cual, también asegura el funcionamiento del sistema sin una configuración previa.

Se concluyó que haciendo uso de la norma VDI 2206 se logra un concepto de solución óptimo del seguidor solar después de realizar una evaluación técnica – económica sobre tres conceptos preliminares. Se obtuvo el diseño conceptual de un seguidor solar de dos ejes para paneles solares fotovoltaicos que no necesite de algún tipo configuración inicial, además de poseer un sensor anemómetro para identificar cuando la velocidad del viento genera una carga de riesgo para la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

[Abella, 2001]

Miguel A. Abella, “*Sistemas Fotovoltaicos. Introducción al diseño y dimensionado*”, Editorial: SAPT de publicaciones técnicas, 2001.

[Andina, 2019]

Andina, “*Paneles solares beneficiarán a más de 600 mil personas en todo el Perú*”, marzo del 2019. [En línea]. Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-paneles-solares-beneficiaran-a-mas-600-mil-personas-todo-peru-728308.aspx>

[Awasthi, 2019]

Awasthi, A., Shukla, A. K., Murali Manohar, S. R., Dondariya, C., Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020, November 1). Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports*. Elsevier Ltd. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004>

[Bittencourt, 2004]

Bittencourt, Leonardo. *Uso de cartas solares*, 2004. [En línea]. Disponible en: Google Libros.

[Black, 2011]

Black, Richard, “*Energías renovables pueden alimentar al mundo*”, BBC. Mayo del 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/05/110510_verde_energia_renovable_futuro_lh

[Degger, 2016]

Degger Iberica, *Degger tracker 3000NT*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://degeriberica.com/wp-content/uploads/2016/04/Data-Sheet-DEGERtracker-3000NT-ES-4-2016.pdf>

[El Peruano, 2018]

El Peruano, “Energía eléctrica llegó a las islas flotantes de los Uros”, Noviembre del 2018. [En línea]. Disponible en: <https://elperuano.pe/noticia-energia-electrica-llego-a-islas-flotantes-de-uros-72785.aspx>

[Fernández, 2010]

Fernández, Jose, *Compendio de energía solar: Fotovoltaica, térmica y termoeléctrica*, Madrid: Mundi – Prensa, 2010.

[Gob.pe, 2018]

Gob.pe, “Instalan más de 80 mil paneles solares en zonas rurales del Perú”, Setiembre del 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/19215-instalan-mas-de-80-mil-paneles-solares-en-zonas-rurales-del-peru>

[Jamroen, 2020]

Jamroen, C., Komkum, P., Kohsri, S., Himananto, W., Panupintu, S., & Unkat, S. (2020). A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100618>

[Kabir, 2012]

M. S. Kabir, R. R. Chowdhury, M. N. Amin, D. M. Abdullah, W. M. Abdullah and M. A. Arafat, "Solar power enhancement using concentration method, tracking system and fuzzy based control system," *2012 15th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, Chittagong, 2012, pp. 464-468. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6509737>

[Lorentz Etatrack, 2010]

Lorentz, *Etatrack active 1500-A*, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.technosun.com/es/productos/seguidor-solar-1-eje-LORENTZ-ETATRACK-ACTIVE-1500-A.php>

[MecaSolar, 2018]

MecaSolar, *MS – 2E*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://mecasolar.com/es/project/2-axis-tracker-2/>

[Ministerio del Trabajo, 2008]

Ministerio del Trabajo, “Norma Básica de Ergonomía y procedimiento de evaluación de riesgo disergonómico” – Norma N°375,2008. Diario Oficial “El Peruano”. Marzo del 2008.

[Osinergmin, 2018]

Osinergmin, “Supervisión de Proyecto de Electrificación con Sistemas Fotovoltaicos”, [Diapositiva], abril del 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Eventos/Expo-SFV-2017.pdf

[Pacheco, 2012]

F. Pacheco, “Seguidor solar de dos ejes”, ES 22336765B1, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/ES2446765B1/es>

[Sanchez, 2010]

Sánchez, María Milagrosa & Tamayo, David Francisco & Estrada, Ricardo. (2011). Design and Construction of a Dual Axis Passive Solar Tracker, for Use on Yucatán. 10.1115/ES2011-54428. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/267492915_Design_and_Construction_of_a_Dual_Axis_Passive_Solar_Tracker_for_Use_on_Yucatan

[SalixSolar, 2015]

SalixSolar, *Seguidor solar 2 ejes – Salix PV tracker*, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.salixsolar.com/es/productos/seguidor-solar-2-ejes.html>

[Saymbetov, 2018]

Saymbetov, A.K., Nurgaliyev, M.K., Tulkibaiuly, Y. *et al.* Method for Increasing the Efficiency of a Biaxial Solar Tracker with Exact Solar Orientation. *Appl. Sol. Energy* 54, 126–130 (2018). Available: <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.3103/S0003701X18020111>

[Sun & Yang, 2017]

Z. Sun and Z. Yang, "Improved maximum power point tracking algorithm with cuk converter for PV systems," in *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 1676-1681, 2017. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8311188>

[Tassen, 1977]

D. Tassen, “*Sun tracker with dual axis support for diurnal movement and seasonal adjustment*”, US 4172739A, 1977. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US4172739A/en>

[Tharamuttam & Ng, 2017]

Tharamuttam, Jerin K., & Ng, Andrew K. (2017). Design and Development of an Automatic Solar Tracker. In *Energy Procedia* (Vol. 143, pp. 629–634). Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.738>

[Thorne, 2009]

S. Thorne, “*Dual Axis Sun – Tracking Solar Panel Array*”, US 20100175741A1, 2009. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US20100175741A1/en>



ANEXOS

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
A. 1 Resumen de la lista de requerimientos	58
A. 2 Matriz morfológica de diseño.....	60

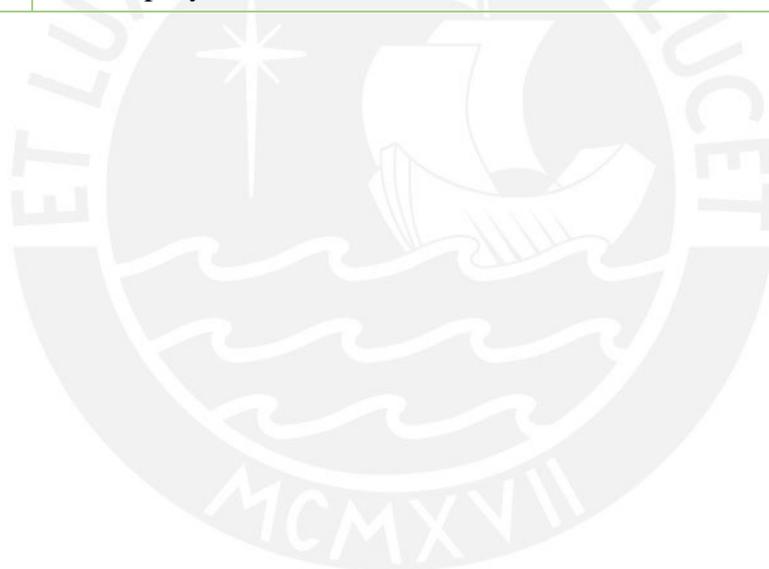


A. 1 Resumen de la lista de requerimientos

Tabla A.1. Lista de requerimientos. Elaboración propia.

Consideración	Requerimiento
Función principal	<ul style="list-style-type: none"> ● Seguidor de dos ejes para paneles solares fotovoltaicos auto configurable.
Geometría	<ul style="list-style-type: none"> ● La estructura podrá aceptar un panel fotovoltaico de 120 Wp, los cuales tienen una dimensión aproximada de 1150mmx900mmx4mm.
Cinemática	<ul style="list-style-type: none"> ● Movimiento angular mínimo de 280° de Este a Oeste y un rango de elevación de 15° a 70°.
Fuerzas	<ul style="list-style-type: none"> ● Los actuadores deben generar la magnitud de la fuerza necesaria para mover los mecanismos bajo las sollicitaciones máximas. ● La fuerza de los actuadores debe garantizar el movimiento del mecanismo en dos ejes de un panel de hasta 10 kg de masa. ● La masa total del sistema debe ser como máximo de 25 kg para facilitar su transporte manual y no exceder los límites de la “Norma Básica de Ergonomía y de procedimiento de evaluación de riesgo disergonómico” [Ministerio del Trabajo, 2008].
Energía	<ul style="list-style-type: none"> ● El suministro de energía eléctrica debe ser proporcionado por el propio sistema de 12 V DC. ● Garantizar la eficiencia energética del sistema y una autonomía energética de 2 días.
Material	<ul style="list-style-type: none"> ● El diseño deberá soportar múltiples repeticiones de ciclos de trabajo diariamente. ● Los componentes del sistema deberán estar hechos de materiales anticorrosivos y resistentes a bajas temperaturas de hasta -5°C
Señales	<ul style="list-style-type: none"> ● Entradas: Señal de encendido, señal de parada, radiación solar y velocidad del viento. ● Salidas: Indicador de estado de funcionamiento e indicador de mantenimiento. ● Controlador capaz de procesar todas las señales analógicas o digitales que recibe de los sensores y enviar señales de control a los actuadores.
Control	<ul style="list-style-type: none"> ● El sistema debe ser capaz de determinar la dirección de los rayos solares y utilizarlo para el control de los actuadores. ● El sistema debe ser capaz de analizar el efecto de la velocidad del viento al panel solar.
Electrónica	<ul style="list-style-type: none"> ● El sistema deberá poder medir la velocidad del viento, la orientación del panel solar
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> ● El sistema de transmisión de potencia y los circuitos deberán estar aislados y no permitir el contacto con el usuario.

	<ul style="list-style-type: none"> ● Controladores y sensores deben trabajar en su rango de temperatura adecuado. ● El sistema debe contar con un grado de protección IP65 según DIN EN 60529 para los sensores y actuadores.
Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> ● Los componentes de la máquina deben poder ser fabricados en talleres de la localidad. ● La mayoría de materiales debe poder encontrarse en el mercado nacional.
Montaje	<ul style="list-style-type: none"> ● Debe ser desarmable para poder acceder a todos los componentes principales. ● Debe poder ser desmontado con relativa facilidad para su reubicación o mantenimiento
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> ● Debe contar con la menor cantidad de piezas para facilitar el mantenimiento y/o cambio de las piezas de fácil desgaste. ● Fácil limpieza en los paneles fotovoltaicos.
Costos	<ul style="list-style-type: none"> ● El desarrollo del proyecto no debe superar los 3500 soles.
Plazos	<ul style="list-style-type: none"> ● El proyecto deberá estar finalizado el 28 de noviembre del 2019.



A. 2 Matriz morfológica de diseño

A continuación, las tablas A.2.1, A.2.3, A.2.4, A.2.5, A.2.6 y A.2.7 muestran la matriz morfológica para cada dominio.

Concepto de solución 1	
Concepto de solución 2	
Concepto de solución 3	

Tabla A.2.1. Matriz morfológica Energía. Elaboración propia.

Dominio de energía			
Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa3
Encender/Apagar	<p>Interruptor</p> 	<p>Botones</p> 	
Acondicionar energía para los dominios de: potencia, actuadores, sensores y control.	<p>Regulador conmutado</p> 	<p>Regulador lineal</p> 	

Tabla A.2.2. Matriz morfológica Sensores. Elaboración propia.

Dominio de sensores			
Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa3
Medir velocidad del viento	<p>Anemómetro</p> 	<p>Veleta</p> 	

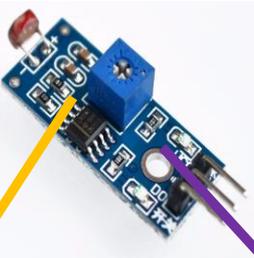
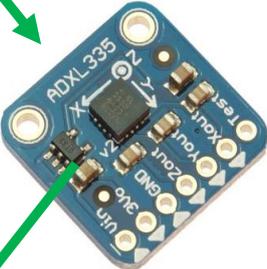
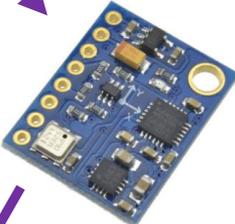
Medir rayos solares	Piranómetro 	Arreglo de fotorresistencias LDR 	
Medir posición angular del primer eje	Encoder 	Acelerómetro 	Sensor IMU 
Medir posición angular del segundo eje	Encoder 	Sensor de distancia 	Sensor IMU 

Tabla A.2.3. Matriz morfológica Potencia. Elaboración propia.

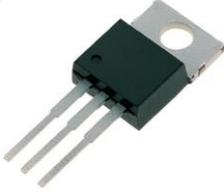
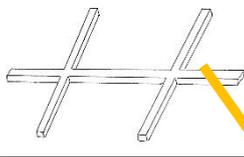
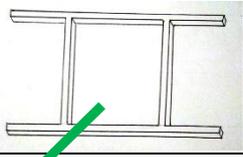
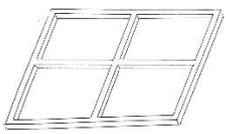
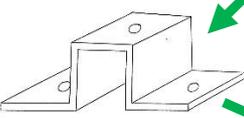
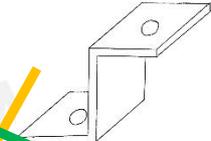
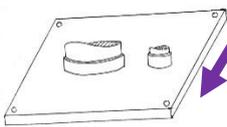
Dominio de potencia			
Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Accionar los actuadores	Driver del motor 	Arreglo de mosfets 	Arreglo de BJT's 

Tabla A.2.4. Matriz morfológica Actuadores. Elaboración propia.

Dominio de actuadores			
Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Transformar e. eléctrica a e. mecánica eje de rotación	Servomotor 	Motor DC 	Motor paso a paso 
Transformar e. eléctrica a e. mecánica eje de inclinación	Servomotor 	Actuador lineal eléctrico 	Motor DC 
Actuador de alerta de mantenimiento	Pantalla LCD 	Juego de LEDs 	Indicador de sonido 
Indicador de estado	Pantalla LCD 	Juego de LEDs 	

Tabla A.2.5. Matriz morfológica Actuadores. Elaboración propia.

Dominio mecánico			
Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa3
Soportar panel solar	Soporte en H 	Soporte en II 	Soporte en marco 
Conectar panel solar	Abrazadera 	Abrazadera 	Tornillo 
Fijar estructura al suelo	Soporte en H 	Soporte plano 	Soporte tipo mesa 
Conectar actuadores	Soporte tipo L 	Soporte de actuador lineal 	Soporte de motor 
Transmitir potencia del primer actuador	Reductor 	Reductores de engranaje 	Acople directo 

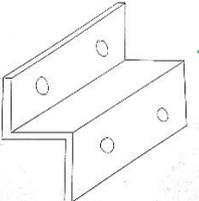
Transmitir potencia del segundo actuador	Reductor 	Reductores de engranaje 	Transmisión por cadena 
Albergar/ soportar/ proteger componentes electrónicos	Bosquejos de la estructura en cada concepto de solución		
Conectar componentes electrónicos	Conector tipo L 	Tornillo 	

Tabla A.2.6. Matriz morfológica Control. Elaboración propia.

Dominio de control			
Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Analizar influencia del viento	PLC 	Microcontrolador 	Microcomputadora 
Controlar mecanismo de orientación			
Analizar funcionamiento de los actuadores			