



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Optimizador de paneles solares por sistema de
seguimiento solar

Solar Panel Optimizer by Solar Tracking System

Autor

Zhong Chen

Director

Javier Esteban Escaño

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia

Noviembre 2023



**Escuela Universitaria
Politécnica** - La Almunia
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Optimizador de paneles solares por sistema de
seguimiento solar

Solar Panel Optimizer by Solar Tracking System

424.22.62

Autor: Zhong Chen

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: Noviembre 2023

INDICE DE CONTENIDO BREVE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	31
3. ESTADO DE ARTE	56
4. DESARROLLO	58
5. RESULTADOS	114
6. CONCLUSIONES	117
7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	119
8. BIBLIOGRAFÍA	120

INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. RESUMEN	1
1.1.1. Palabras claves	1
1.2. ABSTRACT	2
1.2.1. Key words	2
1.3. INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO	3
1.3.1. Concepto histórico - ¿Por qué energía solar?	4
1.4. OBJETIVOS	6
1.5. ANTECEDENTES	6
1.5.1. Sistema de medición IV del panel solar	6
1.5.2. Sistema de seguidor solar - DISEÑO I	8
1.5.2.1. Dimensionar el sistema	8
1.5.2.1.1. Estimar el consumo	9
1.5.2.1.2. Calcular el panel fotovoltaico	10
1.5.2.1.3. Dimensionar el acumulador o batería	11
1.5.2.1.4. Dimensionar el regulador	12
1.5.2.2. Diseño y cálculo de la estructura mecánica	13
1.5.2.2.1. Cálculo del pandeo de la estructura	13
1.5.2.2.2. Cálculo de la fuerza ejercida por el viento.	17

1.5.2.3. Sistema de control	21
1.5.2.4. Conclusión	23
1.5.3. Sistema de seguidor solar - DISEÑO II	24
1.5.3.1. Diseño mecánico	24
1.5.3.2. Estrategia de seguimiento	25
1.5.3.3. Sistema de control	27
1.5.3.4. Conclusión	27
1.5.4. Sistema de autolimpieza del panel solar	28
1.5.4.1. Limpiaparabrisas automáticos	28
1.5.4.2. Bomba de lavado de limpiaparabrisas	30
2. MARCO TEÓRICO	31
2.1. MOVIMIENTO TIERRA-SOL	31
2.1.1. Coordenada ecuatorial	32
2.1.2. Coordenada solar	33
2.1.3. Coordenada horaria	33
2.1.4. Coordenada relativa	33
2.2. LA RADIACIÓN SOLAR	34
2.3. SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR	34
2.3.1. Funcionamiento	35
2.3.2. Tipos de células solares y sus eficiencias	36
2.4. MÓDULO FOTOVOLTAICO	39
2.4.1. Componentes de un módulo fotovoltaico.	39
2.4.2. Curva IV del módulo fotovoltaico	40
2.4.3. Mecanismo de degradación módulo fotovoltaico	42
2.4.3.1. Factores ambientales	43
2.4.3.2. Material de constitución de la célula fotovoltaica	44
2.4.4. Modo de degradación del módulo fotovoltaico	44
2.4.5. Parámetros eléctricos de degradación	46
2.4.6. Conexiones de los módulos fotovoltaicos	47
2.4.6.1. Conexionado en serie	47
2.4.6.2. Conexionado en paralelo	48
2.4.6.3. Conexionado mixto	49
2.4.6.4. Selección de la configuración correcta	49
2.4.7. Aplicaciones de energía solar fotovoltaico	50
2.4.7.1. Sistema fotovoltaico autónoma	50
2.4.7.2. Sistema fotovoltaico conectados a la red eléctrica	50
2.4.8. Modelo de una celda fotovoltaica	51

2.5. SEGUIDOR SOLAR	52
2.5.1.1. Clasificación por los movimientos	53
2.5.1.2. Clasificación por los sistemas fotovoltaicos	53
2.5.1.3. Clasificación por los grados de libertad	53
2.5.1.4. Clasificación por los algoritmos de seguimiento	54
2.5.1.5. Rendimiento de producción energética.	55
3. ESTADO DE ARTE	56
3.1. MÓDULO FOTOVOLTAICO	56
3.2. SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA DEGRADACIÓN	56
3.3. SISTEMA DEL SEGUIDOR SOLAR	56
3.4. SISTEMA DE AUTOLIMPIEZA	56
4. DESARROLLO	58
4.1. DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO	60
4.1.1. Estructura del seguidor solar	62
4.1.1.1. Bastidor	63
4.1.1.2. Soporte panel solar	64
4.1.1.3. Sistema de autolimpieza	65
4.1.1.3.1. Subconjunto limpiaparabrisas	66
4.1.1.3.2. Sistema Autolimpieza – Superior	68
4.1.1.3.3. Sistema Autolimpieza – Inferior	69
4.1.1.3.4. Sistema Autolimpieza – Soporte eje y soporte eje central	70
4.1.1.3.5. Sistema Autolimpieza – Protector	71
4.1.1.3.6. Otras piezas	72
4.1.1.4. Pedestal	73
4.1.2. Cálculo y selección del motor y reductor	76
4.1.2.1. Sistema de autolimpieza	77
4.1.2.2. Ángulo Acimut Solar – Giro	80
4.1.2.3. Ángulo Altura Solar – Inclinación	84
4.1.3. Análisis de los esfuerzos	86
4.1.3.1. Análisis del eje inclinación – Ángulo Altura Solar	87
4.1.3.2. Análisis del eje giro – Ángulo Acimut Solar	90
4.1.3.3. Cálculo y ensayo del Pedestal	93
4.2. SISTEMA DE CONTROL	104
4.2.1. Funcionamiento	104
4.2.2. HLD – Diagrama de alto nivel	105
4.2.3. LLD – Diagrama de bajo nivel	106
4.3. DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO.	111

	INDICES
4.3.1. Componentes _____	111
5. RESULTADOS _____	114
6. CONCLUSIONES _____	117
7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE _____	119
8. BIBLIOGRAFÍA _____	120

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Banco de ensayo del módulo fotovoltaico (Rúa-Ramírez et al., 2021, fig. 2)	6
Ilustración 2 Diagrama unifilar (Rúa-Ramírez et al., 2021, fig. 1)	7
Ilustración 3 Esquema del circuito electrónico de medición (Rúa-Ramírez et al., 2021, fig. 3)	8
Ilustración 4 Diseño conceptual de la estructura (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 23).....	13
Ilustración 5 Valores de K para obtener longitud efectiva en la columna de Esbelta (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 25)	16
Ilustración 6 La fuerza del viento sobre una superficie inclinada (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 34)	17
Ilustración 7 Presión del viento una superficie inclinada (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 35)	17
Ilustración 8 Componentes de la fuerza del viento(Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 36).....	18
Ilustración 9 Esquema de control del seguidor (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 46).....	22
Ilustración 10 Diagramas de bloques del seguidor (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 47).....	22
Ilustración 11 Diagrama de flujo del seguidorr (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 54).....	23
Ilustración 12 Seguidor solar (Balaguer-Zueco, 2016, fig. 15)	24

Ilustración 13 Diagrama de sólido libre de la estructura (Balaguer-Zueco, 2016, fig. 16).....	25
Ilustración 14 Sensor de lluvia de un automóvil (Salas-Moyano, 2021).....	28
Ilustración 15 Funcionamiento del sensor de lluvia (Vitos & Idiarte, 2007, fig. 1.2)	29
Ilustración 16 Despieces de la bomba de lavado limpiaparabrisas de un automóvil (Oborudow, 2019)	30
Ilustración 17 Movimiento Tierra-Sol (Gomez-Azpeitia, 2015)	32
Ilustración 18 Coordenada Solar (Coordenada solar, 2023)	33
Ilustración 19 Efecto fotovoltaico (Rodriguez, 2017).....	35
Ilustración 20 Célula de silicio monocristalino (Cambio energético, 2021)	36
Ilustración 21 Célula perovskita (Cambio energético, 2021)	37
Ilustración 22 Sección transversal de un módulo solar (EDUTEL, 2008c, fig. 36)	39
Ilustración 23 Parámetros generales de la Curva IV (Reguera Gil, 2015, fig. 1) 41	
Ilustración 24 Conexión en serie de los paneles solares (Redacción, 2021)	48
Ilustración 25 Conexión en paralelo de los paneles solares (Redacción, 2021) ..	48
Ilustración 26 Conexión mixto de los paneles solares (Redacción, 2021)	49
Ilustración 27 Circuito equivalente de una celda solar (Eraso et al., 2019, fig. 1)	51
Ilustración 28 La variación de posición del módulo fotovoltaico según el ángulo de inclinación.	60
Ilustración 29 Prototipo seguidor solar de los módulos fotovoltaicos	62
Ilustración 30 Subconjunto Bastidor - Prototipo	63
Ilustración 31 Subconjunto soporte panel solar - Prototipo.....	64
Ilustración 32 Prototipo del sistema de autolimpieza	66
Ilustración 33 Subconjunto limpiaparabrisas	67
Ilustración 34 Prototipo sistema limpieza – superior	68
Ilustración 35 Prototipo sistema limpieza – inferior	69

Ilustración 36 Prototipo sistema limpieza – Soporte eje y soporte eje central ...	70
Ilustración 37 Prototipo sistema limpieza – Protector	72
Ilustración 38 Otras piezas del sistema de autolimpieza.....	73
Ilustración 39 Subconjunto pedestal	74
Ilustración 40 Diagrama de las fuerzas de un cuerpo en un plano inclinado	77
Ilustración 41 Movimiento giratorio de los paneles fotovoltaicos	81
Ilustración 42 Momento de inercia de un paralelepípedo (Tipler & Mosca, 2010, p. 254)	82
Ilustración 43 Motor ABB IM3001/IMB5 - M3AA71	83
Ilustración 44 Reductor de eje paralelo.....	83
Ilustración 45 Reducto de engranajes cilíndricos	85
Ilustración 46 Estructura simplificada para FEA del eje Altura Solar.....	87
Ilustración 47 Trazado de convergencia del eje Altura Solar	88
Ilustración 48 La tensión de VM del eje Altura Solar	88
Ilustración 49 Zona ampliada de las tensiones de VM del eje Altura Solar	89
Ilustración 50 El desplazamiento del eje Altura Solar.....	90
Ilustración 51 Estructura simplificada para FEA del eje Acimut Solar	91
Ilustración 52 Trazado de convergencia del Eje Acimut Solar.....	91
Ilustración 53 La tensión de VM del eje Acimut Solar.....	92
Ilustración 54 Análisis con detalle de la Ilustración 53	92
Ilustración 55 El desplazamiento del eje Acimut Solar	93
Ilustración 56 Estructura simplificada para FEA del Pedestal.....	95
Ilustración 57 Trazado convergencia del Pedestal con la ausencia del viento	96
Ilustración 58 La tensión de VM del Pedestal con la ausencia del viento	96
Ilustración 59 Análisis con detalle en las zonas graves de la Tensión de VM	97
Ilustración 60 El desplazamiento del Pedestal con la ausencia del viento.....	97
Ilustración 61 Trazado de convergencia del Pedestal con la presencia del viento	98

Ilustración 62 La tensión de VM del Pedestal con la presencia del viento	98
Ilustración 63 Análisis con detalle de la Ilustración 62	99
Ilustración 64 Trazado de convergencia del Pedestal modificado con la presencia del viento	100
Ilustración 65 La tensión de VM del Pedestal modificado con la presencia del viento	100
Ilustración 66 Análisis con de la Ilustración 65	101
Ilustración 67 El desplazamiento del Pedestal modificado con la presencia del viento.	101
Ilustración 68 Trazado de convergencia del Pedestal modificado con la ausencia del viento	102
Ilustración 69 La tensión de VM del Pedestal modificado con la ausencia del viento	102
Ilustración 70 Análisis con de la Ilustración 69	103
Ilustración 71 El desplazamiento del Pedestal modificado con la ausencia del viento.	103
Ilustración 72 HLD del Optimizador de paneles solares	105
Ilustración 73 LLD del optimizador solar	107
Ilustración 74 LLD - Sistema de alimentación	108
Ilustración 75 LLD - Sistema de control	109
Ilustración 76 LLD - Sistema de seguimiento	109
Ilustración 77 LLD - Sistema de autolimpieza	110
Ilustración 78 Bomba de agua (Corefluid, 2023)	111
Ilustración 79 Variador de frecuencia V1000 (Yaskawa, 2023)	112
Ilustración 80 ESP32-S3-DevKitC-1 v1.1 (ESPRESSIF, 2023)	112
Ilustración 81 Sensor capacitivo CFAM 12N1600(Baumer, 2023)	113
Ilustración 82 Sensor de lluvia – Regensensor RS12 (H-TRONIC GmbH, 20) ..	113

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Consumo de los equipos del sistema (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, tbl. 3)	9
Tabla 2 Presión frontal del viento en función de su velocidad (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, tbl. 7).....	18
Tabla 3 Escala Beaufort (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, tbl. 8).	20
Tabla 4 Cargas admisible y factor de seguridad de la estructura (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, tbl. 9).....	21
Tabla 5 Resumen de las células y su eficiencia	38
Tabla 6 Resumen modos de degradaciones (Reguera Gil, 2015, tbl. 3)	47
Tabla 7 Las características eléctricas y mecánicas del módulo fotovoltaico	58
Tabla 8 Las fuerzas del viento según el ángulo de inclinación.	61
Tabla 9 Partes del seguidor solar	62
Tabla 10 Los componentes del bastidor	63
Tabla 11 Los componentes del Soporte.....	65
Tabla 12 Los componentes del sistema de autolimpieza.....	66
Tabla 13 Los componentes del limpiaparabrisas.....	67
Tabla 14 Los componentes del subconjunto sistema autolimpieza superior.....	69
Tabla 15 Los componentes del subconjunto sistema autolimpieza inferior	70
Tabla 16 Los componentes del subconjunto sistema autolimpieza – soportes ejes	71
Tabla 17 Los componentes del subconjunto Protector.....	72
Tabla 18 Otras piezas del sistema de autolimpieza.....	73
Tabla 19 Los componentes del subconjunto Pedestal.....	74
Tabla 20 Fuerza mínima requerida según el ángulo de inclinación.	79
Tabla 21 Características del motor del sistema de autolimpieza	80
Tabla 22 Características del Motor ABB.....	82
Tabla 23 Características eléctricas de los motores.....	111
Tabla 24 Selección del variador	112



1. INTRODUCCIÓN

1.1. RESUMEN

Actualmente, la energía que empleamos día a día es la energía eléctrica. Esta energía es limpia, económica y existen varias formas de producirla. Sin embargo, debido al cambio climático y el efecto invernadero se busca una fuente de energía limpia como la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica o de biomasa.

He elegido la energía solar, mejor dicho, los paneles solares fotovoltaicos para producir la energía eléctrica por dos sencillas razones:

- La energía solar es una de las fuentes de energía renovable, limpia e inagotable.
- Es mucho más eficiente que las otras energías renovables.

Además, se puede instalar en cualquier lugar, excepto en algunos lugares cuyas condiciones meteorológicas lo impidan.

No obstante, el rendimiento de la producción no es muy elevado porque depende de luz solar y generalmente las placas fotovoltaicas están fijadas a un determinado ángulo lo que reduce drásticamente su rendimiento.

Entonces, para que se puedan aprovechar las horas de luz al máximo, vamos a realizar un sistema de seguimiento solar, al que añadiremos un original sistema de autolimpieza. Inicialmente se pretendió llevar a cabo un estudio de la degradación de los paneles solares, pero por falta de tiempo no se pudo abordar. Aun con todo se ha conseguido que los paneles generen la mayor cantidad de energía eléctrica posible.

En resumen, trato de buscar una forma de generar la energía eléctrica a través de la energía solar con el mayor rendimiento posible y así evitar o reducir la producción de CO₂.

1.1.1. Palabras claves

Paneles solares fotovoltaico, seguidor solar, sistema de autolimpieza, sistema de medición de la degradación de los paneles solares, curva IV (Intensidad-Voltaje).

1.2. ABSTRACT

Nowadays, the energy we use every day is electrical energy. This energy is clean, economical and there are several ways to produce it. However, due to the climate change and greenhouse effect, there is a search for a clean energy source such as solar, wind, hydro, geothermal or biomass energy.

I have chosen the solar energy, more specifically, the photovoltaic solar panel, to produce electrical energy for two simple reasons:

- The solar energy is one of the renewable, clean, and inexhaustible energy sources.
- It is more efficient than other renewable energies.

In addition, it can be installed anywhere, except in some places where weather conditions prevent it.

Nevertheless, the production performance is not very high because it depends on the sunlight and panels photovoltaics are fixed at a certain angle, which drastically reduces their performance.

So, in order to make the most of the daylight hours, we are going to implement a solar tracking system, to which we will add an original self-cleaning system. Initially, we intended to conduct a study of the degradation of the solar panels, but due to a lack of time, it was not possible to do so. Even so, we have achieved that the panels generate as much electrical energy as possible.

In short, I am trying to find a way to generate a electricity through solar energy with the highest possible performance and thus avoid or reduce the production of CO₂.

1.2.1. Key words

Photovoltaic solar panel, solar follow, self-cleaning system, measuring system of degradation of solar panel, curve IV (Current-Voltage).

1.3. INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en el diseño de un sistema de optimización de los paneles solares, por medio de un sistema de seguimiento solar y un sistema de autolimpieza de los paneles.

- El sistema de seguimiento solar consiste en un mecanismo que siga la trayectoria del sol y que de esta forma aumente la captación de la radiación solar en los paneles. Esto se realiza con la ayuda de dos motores, el primero tiene la misión de efectuar el movimiento giratorio. Mientras, el segundo motor regula el ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos.
- El sistema de autolimpieza, innovación propia, se fundamenta en el mismo concepto que el de los limpiaparabrisas. Éstos barren los paneles solares de forma autónoma cuando los sensores detectan la presencia de agua o suciedad. Además, se impulsa agua a presión sobre los módulos fotovoltaicos para facilitar el barrido y el arrastre de la suciedad acumulada.

A partir de estas ideas, la ubicación del sistema diseñado es universal, es decir, en cualquier lugar de nuestra planeta funcionaría correctamente. Excepto en las ubicaciones donde el nivel de radiación solar anual lo hagan poco rentable.

La aplicación principal del sistema es la generación con conexión a la red eléctrica, es decir, la energía eléctrica producida por los paneles fotovoltaicos es entregada a la red eléctrica.

En este proyecto, el ámbito de la instalación se encuentra en un campo fotovoltaico, de esta forma, se puede beneficiar del uso de una infraestructura común, de forma que sólo será necesaria una única estación meteorológica, compartirá las cajas de Strings, y el sistema de inversores, así como el depósito de agua para el sistema de limpieza.

- La estación meteorológica es un conjunto de instrumentos que miden los parámetros atmosféricos.
- Caja de String se emplea para las conexiones en paralelo de un conjunto de módulos fotovoltaicos que trabajan a una tensión común.
- Inversor es un dispositivo que transforma la alta tensión DC en AC.
- El depósito de agua lleva un sensor de nivel de agua. Cuando el depósito está por debajo de un nivel mínimo, se rellenará automáticamente.

En nuestro proyecto, se enfoca exclusivamente en el diseño del sistema mecánico, eléctrico y control del sistema de seguimiento solar.

1.3.1. Concepto histórico - ¿Por qué energía solar?

A lo largo de la historia, la humanidad ha estado continuamente buscando recursos y fuentes de energía. El principio de esta búsqueda se inició en la prehistoria con el descubrimiento del fuego que empleamos para calentar, alumbrar, cocinar alimentos, etc. Más tarde, en la Edad Media surgió el carbón como principal fuente de energía que reemplazó a las maderas. Este recurso es fundamental en la I Revolución Industrial, durante al final del siglo XVIII y principio del siglo XIX. Después, con la llegada del petróleo, en la II Revolución Industrial fueron sustituyendo el protagonismo del carbón durante al final del siglo XIX y principio del siglo XX (INVESTIGANDO LA ENERGÍA, 2021). En el mismo periodo también aparecieron otras fuentes de energía como la nuclear y también nuevos sistemas de transporte como las redes de electricidad. De estos sistemas nacen la energía eólica, hidráulica, solar, etc. (DesQbre, 2021).

No obstante, al comienzo del XXI, la preocupación por la contaminación de la atmosfera, el cambio climático y el incremento de coste de los recursos fósiles se canaliza por energías renovables. Por este motivo, la energía es un elemento fundamental para cubrir las necesidades de los seres humanos. (INVESTIGANDO LA ENERGÍA, 2021).

*"Se define la **energía** como la capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo, es decir, para hacer cualquier cosa que implique un cambio físico como el movimiento, la variación de temperatura, transmisión de onda, etc."* (EDUTEL, 2008a, Capítulo 1).

El sistema energético se puede clasificar en dos grandes bloques:

- **Energías primarias** son recursos o fuentes naturales, dentro de ella se puede dividir en:
 - NO RENOVABLES: fósiles como el carbón, petróleo, gas natural, etc. y no fósiles como nuclear.
 - RENOVABLES: hidráulica, eólica, solar, geotérmica, etc.
- **Energías secundarias o finales** son energías aptas para la aplicación por usuario final de la cadena de energía (EDUTEL, 2008a, Capítulo 1).

Hoy en día, las fuentes de energía más demandas siguen siendo el petróleo (29%), el carbón (27%) y el gas natural (24%), es decir, el 80% de las energías más explotadas son los recursos fósiles y esto se traduce a una mayor emisión de CO₂ que causa el cambio climático y el efecto invernadero (Enerdata, 2019).



Gráfica 1 Datos estadísticos energéticos mundiales (Enerdata, 2019).

“Una de las soluciones es emplear energías verdes, es decir, las energías renovables” (Gamez, 2023) en las cuales, “podemos reducir la emisión de CO₂” (Gamez, 2023). Por ejemplo, la energía eléctrica es una energía limpia y cubre casi todas las necesidades de los seres humanos. Sin embargo, esta energía es generada por otras fuentes de energía, mayoritariamente de los recursos fósiles. Para seguir en la línea de la energía verde es producir la electricidad mediante los recursos renovables como paneles solares, centrales hidroeléctricas, parque eólicas, etc.

Por otro lado, desgraciadamente, las guerras actuales, nos transmiten la importancia de la independencia energética de otros países.

Frente a estos problemas, la motivación de realizar el estudio de optimización de energía solar. He elegido esta energía renovable y no otras, es porque a nivel geográfico, en cualquier parte de la tierra tenemos la oportunidad de disfrutar esta energía, excepto cuando las condiciones meteorológicas la impidan. En el caso de las otras energías se necesitan unos requisitos a nivel geográfico, por ejemplo, las estaciones hidroeléctricas se debe localizar próximo al agua como el río, el lago o el mar y en muchos ubicaciones no se disponen por escasez del agua. Igual que la energía eólica se aprovecha en las zonas favorables al viento.

1.4. OBJETIVOS

Generalmente en la instalación de los paneles solares son fijados en el suelo o el tejado con un determinado ángulo de inclinación para de esta forma aprovechar las máximas horas útiles del sol. No obstante, este tiempo que reciben el sol los paneles solares no es óptimo, por lo que, trata de estudiar:

- **La superficie de paneles solares 25m²** para la producción de la energía eléctrica.
- **La optimización de los paneles solares por sistema de seguimiento solar** para aprovechar todas las horas útiles.
- **Sistema de autolimpieza** que limpiara los paneles solares cuando detecta suciedad (polvo) o/y fluidos.
- **Sistema detección de suciedad y degradación** de los paneles solares.

1.5. ANTECEDENTES

1.5.1. Sistema de medición IV del panel solar

El banco de ensayo o de prueba del módulo solar es un sistema que es capaz de medir y evaluar los parámetros eléctricos característicos del panel fotovoltaico según la radiación recibida.



Ilustración 1 Banco de ensayo del módulo fotovoltaico (Rúa-Ramírez et al., 2021, fig. 2)

Este sistema de medición es implementado por cinco autores (Rúa-Ramírez et al., 2021) e indican que solo la curva I-V (Intensidad- Voltaje) logra medir con precisión los parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico. El comportamiento de estos parámetros varían en función de la radiación solar, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y otros factores que producen la degradación del panel fotovoltaico, lo cual, fluyen la producción de la energía eléctrica.

Por lo que, se diseña un circuito electrónico donde el panel es conectado a una carga resistiva variable y se registra el valor de corriente y de voltaje. El diseño del circuito se basa en conjunto de transistores, en concreto MOSFET IRF540N, y resistencias de carga, microcontrolador Arduino, sensores de corriente y voltaje con alta resolución y frecuencia de muestreo. Este circuito electrónico es capaz de examinar todos los punto de la curva IV.

El diseño de medición está optimizado para un voltaje alto de circuito abierto hasta 6kV y una baja intensidad de corriente por debajo de 100mA.

El diagrama unifilar, Ilustración 2, representa todos los componentes y sus conexiones que constituyen el banco de ensayo. En este diagrama, se puede observar, la generación de la electricidad a través de los paneles solares están conectado a un multímetro digital que se mide la tensión DC. También están conectado una caja de Breaker de protección, o bien, un regulador que entrega la electricidad a la batería o/y al inversor. Luego, en el inversor se coloca otro multímetro digital que mide la tensión AC.

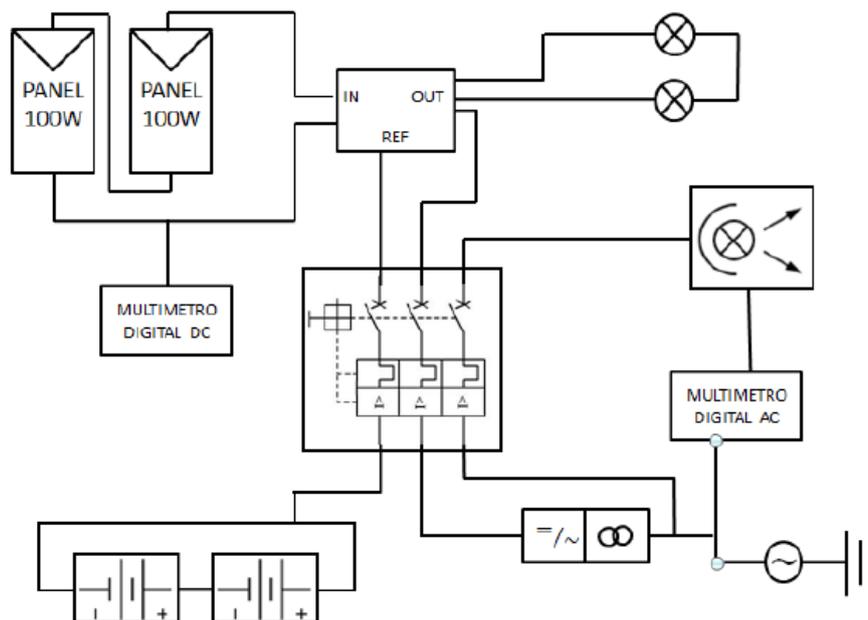


Ilustración 2 Diagrama unifilar (Rúa-Ramírez et al., 2021, fig. 1)

Para validar el funcionamiento del banco de ensayo se realizaron las mediciones sobre una carga resistiva variable. En ella se mide la tensión e la intensidad de corriente, Ilustración 3.

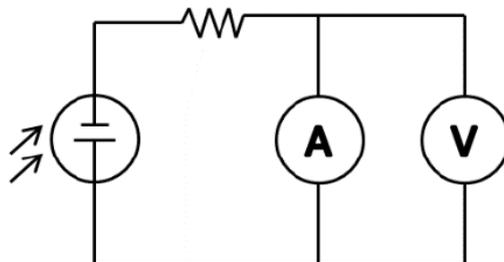


Ilustración 3 Esquema del circuito electrónico de medición (Rúa-Ramírez et al., 2021, fig. 3)

CONCLUSIÓN

Los autores (Rúa-Ramírez et al., 2021) recalcan que la curva IV, actualmente, es la única forma de estudiar la degradación de los paneles solares con precisión. Este método consiste en medir la tensión y la intensidad generada por los paneles solares y realizar una comparativa. Este sistema de medición se puede emplear para cualquier tipo de tecnología de panel solar.

No obstante, no explican el funcionamiento del sistema, ni menciona las comparativas que se realizan. Por ejemplo, la carga resistiva variable, los autores han mencionado que se emplea este componente para estudiar el comportamiento de los parámetros eléctricos del panel fotovoltaico, pero en ningún momento explica el por qué ni el funcionamiento del sistema de medición.

1.5.2. Sistema de seguidor solar - DISEÑO I

El diseño implementado se trata de un seguidor solar autónomo para un sistema de bombeo. La tipología del seguidor es activo y dos ejes con sistema de control mediante los fotosensores.

Este diseño se focaliza en dimensionar el sistema, calcular y diseñar la estructura mecánica y el sistema de control. Los procedimientos a seguir del diseño del apartado es implementado por un autor y una autora (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018).

1.5.2.1. Dimensionar el sistema

En este apartado se estudia los componentes adecuados para el correcto funcionamiento del seguidor solar. Por lo que, se realizó una estimación del consumo para dimensionar y estudiar el panel fotovoltaico, la capacidad de la acumulador o batería y el regulador apropiado.

1.5.2.1.1. Estimar el consumo

Se determina los puntos de consumo necesario para el funcionamiento del sistema. La estimación del consumo tiene que tener en cuenta la potencia y el tiempo de uso de cada componente de la instalación. Y esto se determina con la siguiente expresión:

$$E_{DC} = \sum P_{DC} \cdot t_{di} \quad 1$$

Donde:

E_{DC} : energía directa del sistema en DC [Wh]

P_{DC} : potencia nominal [W]

t_{di} : tiempo diario de uso [h]

Conociendo esto, se resume estos puntos de consumo en la Tabla 1

Tabla 1 Consumo de los equipos del sistema (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, tbl. 3)

Descripción del equipo	Potencia en DC [W]	N.º de equipos	Tiempo de funcionamiento al día en horas [h]	Consumo [Wh]
Bomba 12V DC	115	1	6	460
Motor Actuador lineal Acimut	46	1	0.54	24.84
Motor Actuador lineal Altitud	46	1	0.54	24.84
Extractor de calor para los circuitos electrónicos 12V	3	2	4	24
PLC	3	1	8	24
Sensores (LDR), Arduino, driver motor.	3	4	0.84	2.52
Total				560.3

No obstante, hay que tener en cuenta los rendimientos de los componentes de la instalación. Para ello se emplea la siguiente expresión:

$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{BAT}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{BAT} \cdot \eta_{INV}} \quad 2$$

Donde:

E_T : energía real o consumo requerida por el sistema [Wh].

E_{AC} : energía directa por sistema en AC [Wh].

η_{BAT} : rendimiento de la batería.

η_{INV} : rendimiento del inversor.

Como el seguidor del sistema no emplea componentes AC, la expresión 2 se quedará deducida en:

$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{BAT}}$$

Por otro lado, rendimiento de la batería establecido por el autor es 80%, entonces:

$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{BAT}} = \frac{560.3}{0.8} = 692.4 \text{ Wh}$$

1.5.2.1.2. Calcular el panel fotovoltaico

Se calcula la potencia de pico que puede suministrar el módulo fotovoltaico para cubrir la potencia requerida, calculado en el apartado 1.5.2.1.1. El escritor de este artículo se basa en la implementación de un solo módulo fotovoltaico, de esta forma, el diseño de la estructura mecánica será sencilla.

La potencia de pico que requiere la instalación se muestra en la siguiente expresión:

$$P_P = \frac{E_T}{N \cdot G_{m\beta} \cdot P_G} \quad 3$$

Donde:

P_P : potencia de pico del módulo fotovoltaico.

N : N.º de módulo fotovoltaico.

$G_{m\beta}$: radiación global sobre una superficie inclinada un ángulo β [kWh/m²].

P_G : factor global de perdidas (varía entre 0.65 y 0.9).

Suponiendo que $G_{m\beta} = 5kWh/m^2$ y $P_G = 0.75$ entonces la potencia de pico requerido será:

$$P_P = \frac{692.4}{1 \cdot 5 \cdot 0.75} = 148W$$

Como resultado la potencia de pico mínima que se necesita la instalación es de 148W. Por lo que, el panel fotovoltaico que seleccionaron el autor y la autora tiene la siguientes características:

- $P_P = 150W$
- $I_{SC} = 9.26A$
- $V_{OC} = 21.6V$
- $I_{m\acute{a}x} = 8.72A$
- $V_{m\acute{a}x} = 17.20V$
- Peso: 14Kg

1.5.2.1.3. Dimensionar el acumulador o batería

Se estudia la capacidad de la batería en Wh y en Ah. Sus expresiones se definen como:

$$Cn(Wh) = \frac{E_T \cdot D}{P_d} = [Wh] \quad 4$$

$$Cn(Ah) = \frac{Cn(Wh)}{V_{Bat}} = [Ah] \quad 5$$

Donde:

Cn : capacidad nominal de la batería [Wh] o [Ah].

D : N.º de días.

P_d : Máxima profundidad de descarga de la batería.

V_{Bat} : Tensión nominal de la batería [V].

Suponiendo la máxima profundidad de descarga está definida en un 60% ($P_d = 0.6$) y dos días de autonomías ($N = 2$) para asegurar la disposición de energía en los días nublados. Entonces la capacidad de la batería para este sistema sería:

$$Cn(Wh) = \frac{555,33 \cdot 2}{0,6} = 1851.1Wh$$

$$Cn(Ah) = \frac{1851.1}{12} = 155Ah$$

1.5.2.1.4. Dimensionar el regulador

La dimensión del regulador depende de la intensidad de corriente máxima que circula por la instalación. Se realiza una comparación entre la intensidad de corriente del generador o los módulos solares y la que consume la carga, la máxima de estas dos corrientes es la que se debe soportar el regulador. Las ecuaciones para calcular las intensidades de corrientes son:

$$I_G = I_M \cdot N_P \quad 6$$

$$I_R = \frac{P_p \cdot \eta_m}{V_m} \quad 7$$

$$I_C = \frac{P_{DC}}{V_{Bat}} + \frac{P_{AC}}{220} \quad 8$$

Donde:

I_G : corriente del generador [A].

I_M : corriente del módulo por cada rama en paralelo [A].

N_P : N.º de módulos en paralelo.

η_m : rendimiento del módulo.

V_m : tensión nominal del módulo [V].

I_C : corriente de carga [A].

P_{DC} : potencia de cargas en DC [W]

P_{AC} : potencia de cargas en AC [W]

Conociendo estas expresiones, primero verificamos la intensidad de corriente que se necesita el regulador:

$$I_R = \frac{150 \cdot 60\%}{9.26} = 9.78A$$

Como solo se emplea un solo módulo fotovoltaico:

$$I_G = I_R = 9.78A$$

Por otro lado, la corriente de carga, teniendo en cuenta que en esta instalación no emplea componentes AC, es:

$$I_C = \frac{P_{DC}}{V_{Bat}} = \frac{113.2}{12} = 9.5A$$

El resultado es encontrar un regulador que es capaz de soportar una intensidad de corriente mínima de 9.78A.

1.5.2.2. Diseño y cálculo de la estructura mecánica

1.5.2.2.1. Cálculo del pandeo de la estructura

Se define la altura del seguidor en 2m partiendo de las dimensiones del panel solar seleccionado que permite realizar libremente el movimiento de cada eje y evitar las sombras durante las horas de funcionamiento.

Se considera que todas las estructuras inclinadas someten a la fuerza de compresión y de tracción por las presiones ejercidas del viento.

El recorrido del seguidor se recopila una variación de grado desde la salida del sol hasta la puesta del sol. La medición del ángulo se ha realizado con la ayuda del piranómetro y carta solar estereográfica de la página Web SunEarth Tools.

El diseño conceptual es simulado en un software CAD SolidWorks, cuya estructura se muestra en la Ilustración 4.



Ilustración 4 Diseño conceptual de la estructura (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 23).

Los elementos de la Ilustración 4 son:

1. Soporte base.
2. Canasta, donde se aloja el módulo solar.
3. Tubo de inclinación.
4. Actuador que modifica la inclinación Acimut.
5. Actuador que modifica la inclinación Altitud.
6. Horquilla que efectúa el giro en Acimut
7. Horquilla que efectúa el giro en Altitud.

Estas piezas generalmente son perfiles o tubos comerciales, cuyo material es acero al carbono y su esfuerzo de fluencia es 322Mpa. Luego, las dimensiones de estos componentes son:

- Tubo cuadrado 2"x2" para el soporte base.
- Tubo rectangular 2"x1" para el tubo de inclinación.
- Perfil angular 2"x2"x1/16" para la canasta.
- Tornillerías normalizas como elemento de unión.

Inicialmente se hicieron cálculos de la resistencia de los materiales seleccionados para hacer una comprobación inicial y definir la geometría final de los componentes del seguidor solar.

Por otro lado, se calcula la carga crítica para verificar la esencia del pandeo. Por lo que, se emplea la ecuación (9) de carga critica de Euler para columna larga y la ecuación (10) de carga critica de Johnson para columna corta.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_e^2} \quad 9$$

$$P_{cr} = A \cdot F_f \left[1 - \frac{F_f \cdot \left(\frac{L_e}{r_{\min}} \right)^2}{4\pi^2 \cdot E} \right] \quad 10$$

Donde:

P_{cr} : carga critica.

E : módulo de elasticidad.

I : momento de la inercia.

L_e : longitud efectiva.

A : área transversal.

F_f : esfuerzo de fluencia o limite elástico.

Para averiguar si se trata de una columna larga o corta, se emplea la ecuación de Esbeltez de pandeo o constate de la columna, C_c , y verificar con la relación de Esbeltez, SR :

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot E}{F_f}} \quad 11$$

$$SR = \frac{L_e}{r_{\min}} = \frac{K \cdot L}{r_{\min}} \quad 12$$

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad 13$$

Como resultado:

- Si $SR > C_c$, la columna es larga, se emplea la expresión 9.
- Si $SR < C_c$, la columna es corta, se emplea la expresión 10.

En cuanto al momento de inercia, I , es la diferencia entre el momento de la sección transversal y el momento centroidal. Además, el momento de inercia varía según la sección transversal, por ejemplo, para sección rectangular será:

$$I = \frac{1}{12} b \cdot h^3 - \frac{1}{12} b' \cdot h'^3 \quad 14$$

Ahora se procede la verificación del pandeo:

Primero se calcula el constante de la columna, expresión 11:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot 200 \cdot 10^9}{322 \cdot 10^6}} = 110.73$$

Luego, relación de Esbeltez, ecuación 12, se necesita determinar los valores de K , L y r_{\min} . Para este último término hay que hallar el momento de inercia, I , y la sección de la barra, A :

$$I = \frac{1}{12} 2 \cdot 2^3 - \frac{1}{12} (2 - 0,011811) \cdot (2 - 0,011811)^3 = 0.2881 \text{ in}^4$$

$$A = b \cdot h - b' \cdot h' = (2 \cdot 2) - (2 - 0,011811)(2 - 0,011811) = 0.4585 \text{ in}^2$$

Con esto se calcula r_{\min} :

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{0.2881}{0.4585}} = 0.7927 \text{ in}$$

No hay que olvidar que la longitud de la barra es de 2m, es decir, 78.74in. Y en cuanto el valor de la K depende del alojamiento de la estructura, como se muestra en la Ilustración 5. Para una columna con un extremo empotrado y otro libre, $K = 2$.

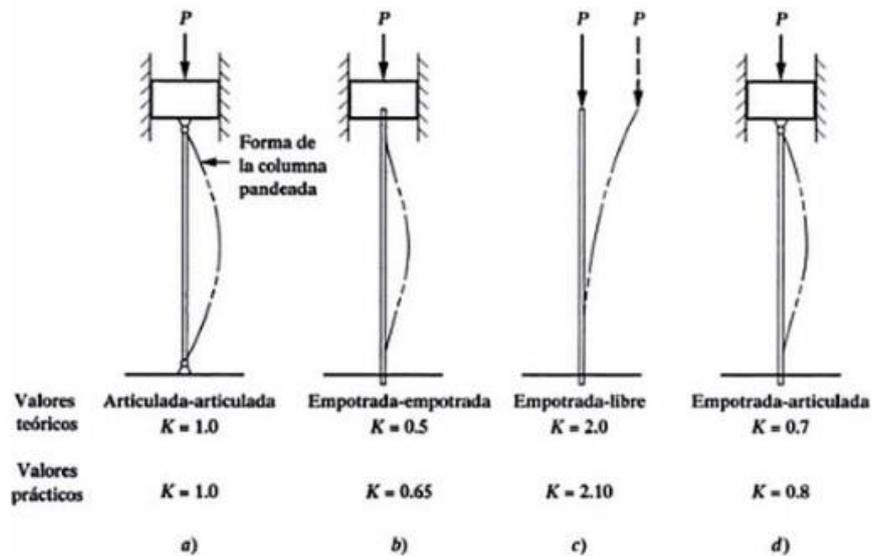


Ilustración 5 Valores de K para obtener longitud efectiva en la columna de Esbelta (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 25)

Entonces el SR será:

$$SR = \frac{K \cdot L}{r_{\min}} = \frac{2 \cdot 78.74}{0.7927} = 198.67$$

Como resultado, $SR = 198,67 > C_c = 125,66$, se trata de una columna larga, por lo que, se emplea la ecuación de Euler (9):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_e^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 0,2881}{(2 \cdot 78.74)^2} = 3325lb = 14.79KN$$

Esta es la carga mínima que produce el pandeo de la columna. No obstante, habrá que aplicar un factor de seguridad, N , para evitar la carga crítica. Y esta nueva carga se denomina carga admisible, P_a :

$$P_a = \frac{P_{cr}}{N} \quad 15$$

Considerando el factor de seguridad, $N=3$, entonces la carga admisible será:

$$P_a = \frac{14.79}{3} = 4.93KN$$

Ahora, se comprueba si la columna resiste el peso del panel fotovoltaico, la estructura y los accesorios. Además, a este peso aumentamos un 20% como factor de seguridad. A este conjunto vamos a denominarle como peso total, P_{total} :

$$P_{total} = (P_{panel} + P_{estructura} + P_{accesorios}) \cdot (1 + \%) \cdot g \quad 16$$

$$P_{total} = (14 + 10 + 5) \cdot (1 + 0.2) \cdot 9.8 = 341.4N$$

Por efecto, $P_{total} = 341.4N < P_a = 4930N$, la estructura no se somete al fenómeno de pandeo.

1.5.2.2.2. Cálculo de la fuerza ejercida por el viento.

El viento también es un factor importante para la estabilidad de la estructura debido a que genera fuerza de compresión o tracción en las estructuras inclinadas.



Ilustración 6 La fuerza del viento sobre una superficie inclinada (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 34)

Para este cálculo tenemos que saber la expresión del presión, P :

$$P = \frac{F}{S} \quad 17$$

Donde:

F : fuerza [N] (fuerza ejercida por el viento).

S : sección [m^2] (sección de la superficie inclinada).

Entonces la protección de la sección en el eje vertical se expresa:

$$S_y = S \cdot \sin \alpha \quad 18$$

Donde:

α : el ángulo de inclinación

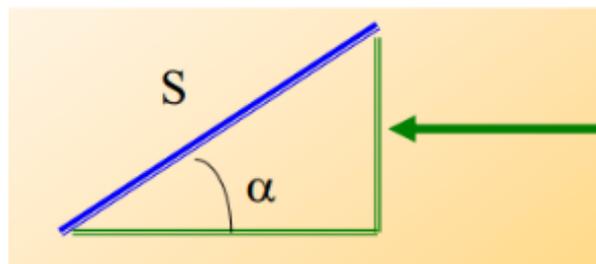


Ilustración 7 Presión del viento una superficie inclinada (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 35)

Por lo que, la fuerza que actúa sobre la proyección en eje vertical es definido como:

$$F = P \cdot S_y = P \cdot S \cdot \sin \alpha \quad 19$$

No obstante, esta fuerza se descompone en dos fuerzas, f_1 y f_2 .

$$f_1 = F \cdot \sin \alpha \quad 20$$

$$f_2 = F \cdot \cos \alpha \quad 21$$

La fuerza f_1 actúa perpendicularmente a la superficie e intenta levantar la estructura anclada. Y la fuerza f_2 actúa paralelamente y sus efectos se desvanecen en rozamientos y remolinos a lo largo de la superficie, como muestra en la Ilustración 8.

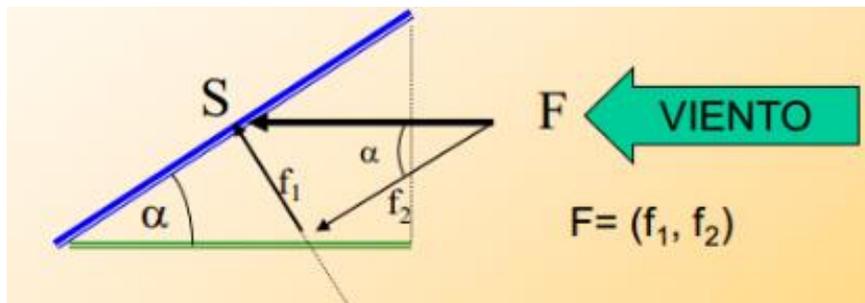


Ilustración 8 Componentes de la fuerza del viento (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 36)

De acuerdo de la Ilustración 8, la fuerza f_1 ejerce en sentido normal al panel fotovoltaico y, por esta razón, es la única fuerza importante que hay que tener en cuenta y esta expresión quedara marcado como:

$$f_1 = F \cdot \sin \alpha \cdot \sin \alpha = P \cdot S \cdot \sin^2 \alpha \quad 22$$

Con esto se puede concluir que la presión ejercida sobre el módulo fotovoltaico depende su ángulo inclinación y la fuerza del viento. A medida de la velocidad del viento, se ejerce más o menos presión sobre los paneles solares. Por las cuales, empleamos la Tabla 3 que muestra la descripción de la escala del viento y su velocidad. Luego, en la Tabla 2, las equivalencias de presión en función de la velocidad.

Tabla 2 Presión frontal del viento en función de su velocidad (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, tbl. 7).

V [m/s]	V [km/h]	P [N/m ²]	P [Kp/m ²]
5	18.0	15	1.5
6	21.6	22	2.2
7	25.2	30	3.1

V [m/s]	V [km/h]	P [N/m²]	P [Kp/m²]
8	28.8	39	4.0
9	32.4	50	5.1
10	36.0	61	6.2
11	39.6	74	7.5
12	43.2	88	9.0
13	46.8	103	10.5
14	50.4	120	12.2
15	54.0	138	14.1
16	57.6	157	16.0
17	61.2	177	18.0
18	64.8	198	20.2
19	68.4	221	22.5
20	72.0	245	25.0
21	75.6	270	27.5
22	79.2	296	30.2
23	82.8	323	32.9
24	86.4	352	35.9
25	90.0	382	38.9
26	93.6	413	42.1
27	97.2	446	45.5
28	100.8	479	48.8
29	104.4	514	52.4
30	108.0	550	56.1
31	111.6	558	56.9
32	115.2	626	63.8
33	118.8	666	67.9
34	122.4	707	72.1
35	126.0	749	76.4

Tabla 3 Escala Beaufort (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, tbl. 8).

Escala	V [m/s]	Denominación	Característica
0	0.1	Calma	El humo sube verticalmente.
1	0.9	Ventolina	La dirección se muestra por la dirección del humo. Las veletas no alcanzan a moverse.
2	2.4	Brisa muy débil	Se siente el viento en la cara, las hojas de los árboles se mueven; las veletas giran lentamente.
3	4.4	Brisa débil	Las hojas y las ramas pequeñas se mueven constantemente; el viento despliega las banderas.
4	6.7	Brisa modelada	Se levantan el polvo y los papeles del suelo; se mueven las ramas pequeñas de los árboles.
5	9.4	Brisa fresca	Los árboles pequeños se mueven; se forman olas en las aguas quietas.
6	12.3	Brisa fuerte	Se mueven las ramas grandes de los árboles; los paraguas se mantienen con dificultad
7	15.5	Viento fuerte	Los árboles grandes se mueven; se camina con dificultad contra el viento.
8	19.0	Viento duro	Se rompen las ramas de los árboles; no se puede caminar en contra del viento.
9	22.6	Viento muy duro	El viento arranca tejados y chimeneas; se caen arbustos; ocurren daños fuertes en las plantaciones.
10	26.4	Temporal huracanado	Raro en los continentes; arranca los árboles y las viviendas sufren daños muy importantes.
11	30.5	Borrasca.	Destrucción en todas partes, lluvias muy intensa, inundaciones muy altas. Voladura de personas y de otros muchos objetos.

Escala	V [m/s]	Denominación	Característica
12	32.7	Huracán.	Voladura de vehículos, arboles, vasas, techos y personas.

El autor y la autora se han seleccionado la fuerza de viento que puede presentar durante la tormenta. Es decir, se trata de un Viento duro de la Tabla 3 y llevando la velocidad del viento a la Tabla 2, la presión sobre la superficie es 221Pa, entonces la fuerza del viento será:

$$f_1 = P \cdot S \cdot \sin \alpha^2 = 221 \frac{N}{m^2} \cdot (1.1 \cdot 0.66)m^2 \cdot (\sin 70)^2 = 193.5N$$

Esta es la fuerza que se debe tener en cuenta en el diseño de la estructura. Posteriormente, se realizaron los ensayos de esfuerzo mediante el software SolidWorks. Como resultado, en la Tabla 4, las cargas admisibles que puede resistir cada componente y su factor de seguridad que se ha aplicado.

Tabla 4 Cargas admisible y factor de seguridad de la estructura (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, tbl. 9).

Componentes	Esfuerzos [MPa]	Factor de seguridad N
Columna base	227.6	1.42
Canasta	86.6	3.7
Tubo de inclinación	239	1.4

1.5.2.3. Sistema de control

El sistema del seguidor solar se emplea la configuración de cuatro sensores fotorresistencias (LDR) que determinan la intensidad de la luz solar. Luego, se emplean el microcontrolador Arduino para comparar los valores de las cuatro LDR y enviar los señales a los actuadores para mover la estructura y corregir el desbalance que hay respecto al sol. Es decir, se establece el sentido de giro para favorecer la recepción de la radiación solar cuando uno de los fotosensores no la recibe y se produce un desbalance de luz. A este seguidor también hay añadirle un seguimiento cronológico con el Controlador Lógico Programable (PLC) que enciende y apaga cada 15 minuto para mantener un 1minuto de funcionamiento en las correcciones necesaria de la posición durante 8 horas.

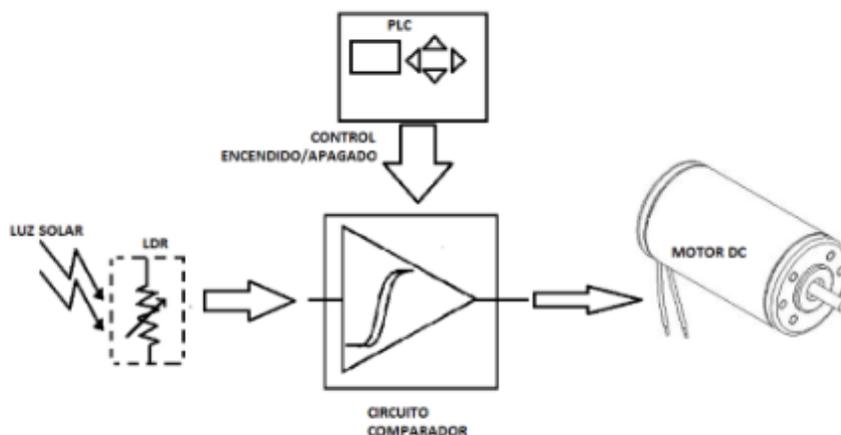


Ilustración 9 Esquema de control del seguidor (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 46).

Y el diagrama de bloque de los componentes del seguidor solar sería:

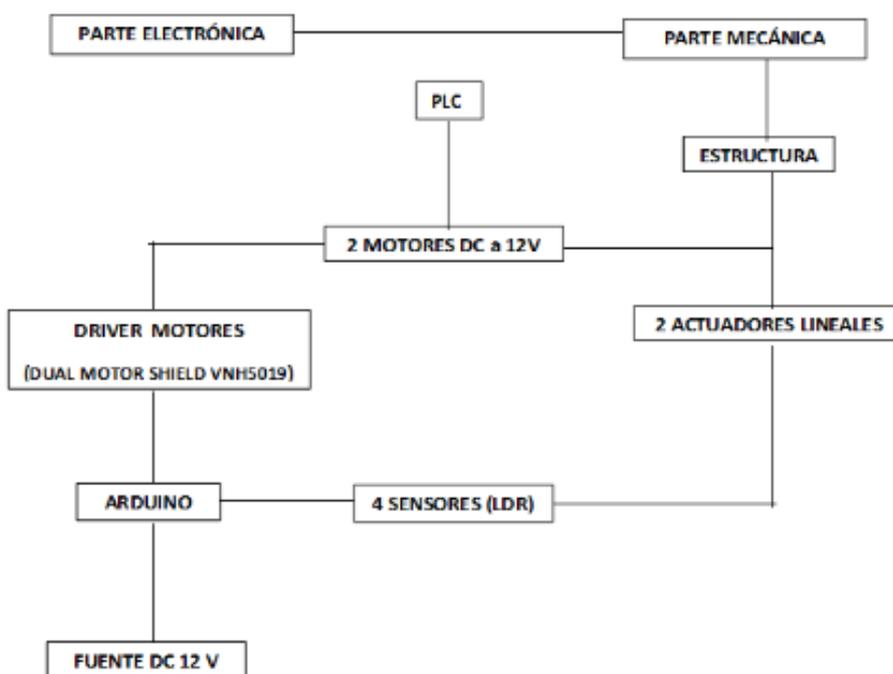


Ilustración 10 Diagramas de bloques del seguidor (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 47).

Antes de implementar la programación se necesita conocer el diagrama de flujo de funcionamiento del sistema como se muestra en la Ilustración 11. Esto favorece a cualquier tipo lenguaje de programación.

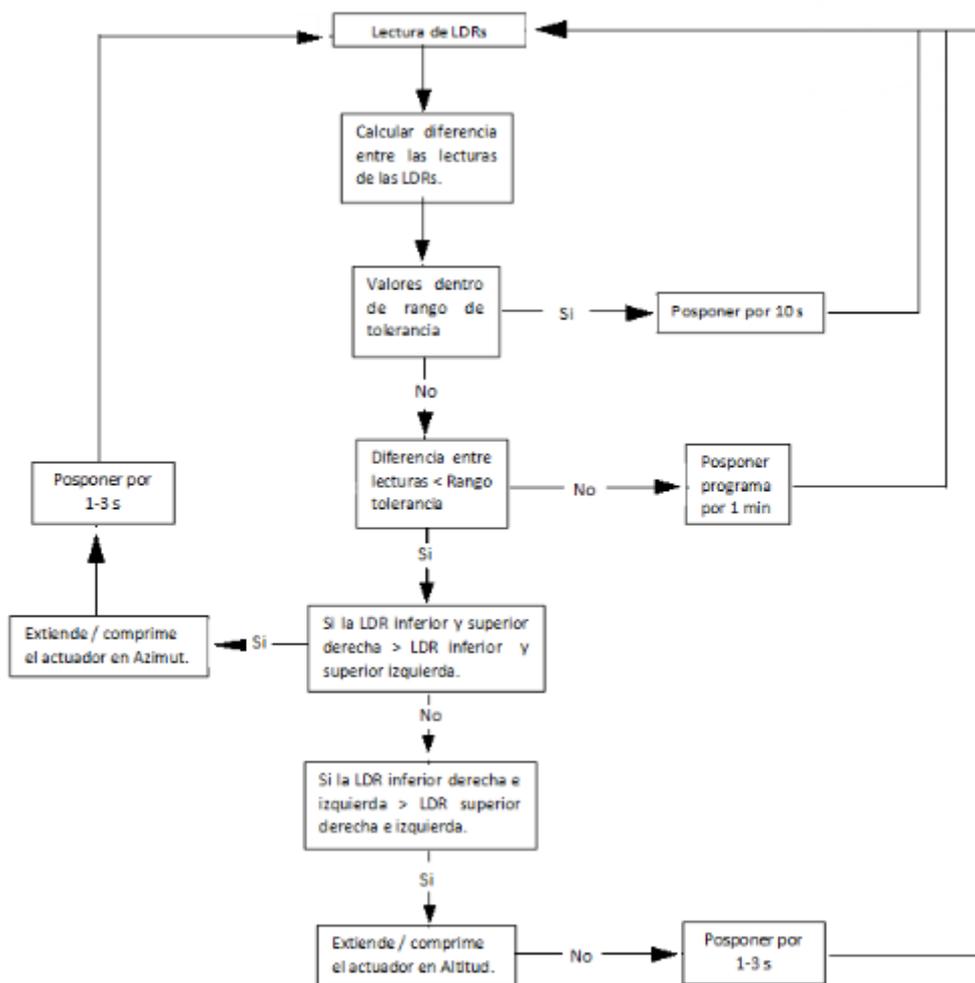


Ilustración 11 Diagrama de flujo del seguidor (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018, fig. 54)

1.5.2.4. Conclusión

Las ecuaciones matemáticas aportadas por el autor y la autora (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018) para el cálculo de la estabilidad de la estructura son fundamentales para los nuevos y futuros diseños del seguidor solar. A pesar de que los resultados de cálculos son erróneos, los procedimientos realizados son claro y sencillo.

Después, se realiza un ensayo de esfuerzo de la estructura mediante las simulaciones del software SolidWorks. Los esfuerzos de simulación que ejercen en el sistema son las cargas que han obtenido de las expresiones matemáticas. No obstante, la forma que se han implementado es incorrecta debido a que se han tomado un solo ángulo de inclinación para el cálculo de la fuerza del viento, por lo que, no se conoce las situaciones de los otros ángulos de inclinación. La mejor forma de analizar sería calcular la fuerza del viento para diferentes ángulos de inclinación y construir un gráfico, donde se puede visualizar fácilmente la cuál es la carga de mayor importancia y el ángulo a qué se encuentra.

En cuanto al sistema de control, se han empleado el microcontrolador Arduino y un PLC para el control, las fotorresistencias como los sensores y los motores para modificaciones de la posición. Junto al diagrama de flujo, la Ilustración 11, se entiende perfectamente el funcionamiento del sistema.

Se podría decir que proyecto se centra más en la parte mecánica que en el sistema de control.

1.5.3. Sistema de seguidor solar - DISEÑO II

La implementación de este segundo diseño también se trata de un seguidor solar autónomo. La tipología del seguidor es activo y dos ejes con sistema de control mediante las ecuaciones solares que describen el movimiento del Tierra-Sol. El diseño de este seguidor es realizado por un autor (Balaguer-Zueco, 2016).

1.5.3.1. Diseño mecánico

El base de diseño estructural se muestra en la Ilustración 12.

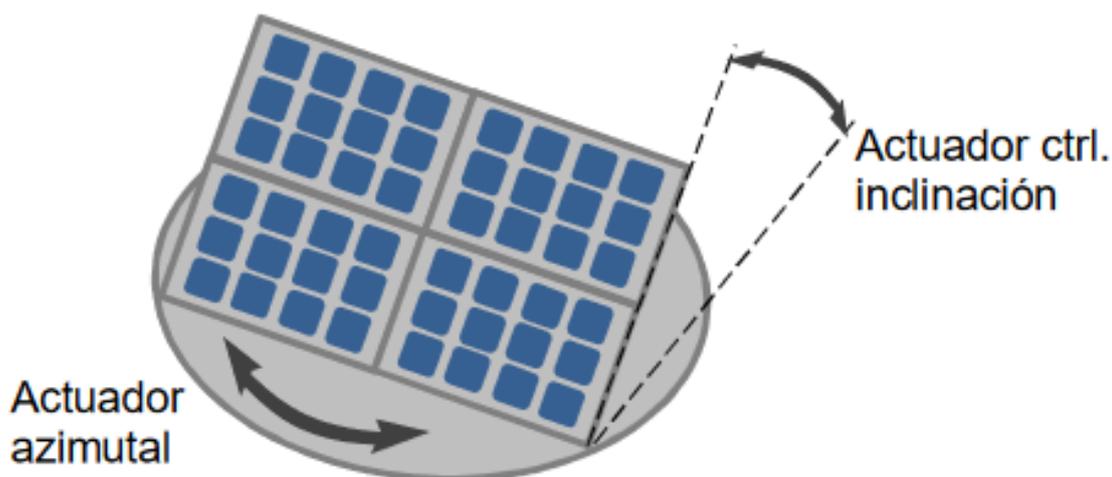


Ilustración 12 Seguidor solar (Balaguer-Zueco, 2016, fig. 15)

El mecanismo consiste dos actuadores, uno que controla la rotación y otro modifica el ángulo de inclinación del módulo solar como se muestra en la Ilustración 13.

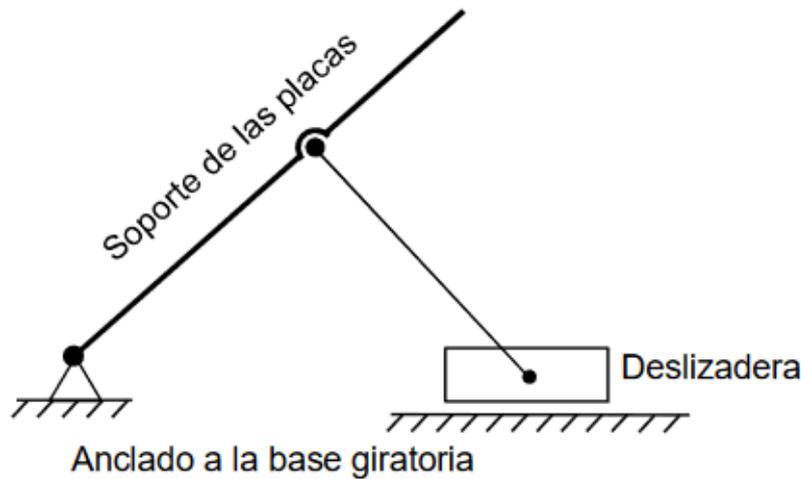


Ilustración 13 Diagrama de sólido libre de la estructura (Balaguer-Zueco, 2016, fig. 16)

El funcionamiento del sistema es sencillo, mediante el desplazamiento de una deslizadera para controlar la inclinación de los paneles. Posteriormente, este mecanismo se monta sobre una base giratoria que permite el movimiento acimutal.

El mecanismo del sistema, para que sea fácil la programación, se ha elegido dos movimientos, rotación horizontal y rotación vertical.

- Rotación horizontal: movimiento paralelo respecto al suelo y se emplea un motor con reductora situada en la parte alta del mástil
- Rotación vertical: movimiento perpendicular respecto al suelo que varía el ángulo de inclinación del módulo solar y se emplea un motor conectado a un tornillo sin fin.

1.5.3.2. Estrategia de seguimiento

El seguimiento del Sol se basa en la ecuación solar y la estrategia de seguimiento es marcado por las siguientes rutinas:

- I. Cálculo de la hora y acimut de la salida y puesta del Sol.
- II. Colocación en la posición correspondiente a la salida del Sol.
- III. A partir de la salida del Sol, recalculando su próxima posición.
- IV. Una vez llegada la hora de puesta del Sol, se detiene la rutina III y vuelve a empezar en la rutina I.

Proceso de cálculo

La representación de la elevación del Sol viene dado por la Ecuación de la Altitud Solar:

$$\sin \gamma_s = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos h \quad 23$$

Tenemos que saber que Altitud Solar, γ_s , es nula a la hora de amanecer y anochecer, a partir de la expresión 23 obtenemos:

$$0 = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos h \quad 24$$

Donde:

ϕ : latitud que es constante en todo el tiempo.

δ : declinación que depende del día del año, es definido como:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284 + z}{365} \right) \quad 25$$

z : el día del año expresado entre 1 y 365.

h : ángulo horario.

Despejando la h de la expresión 24:

$$h = \cos^{-1} \left(-\frac{\sin \phi \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta} \right) \quad 26$$

De la ecuación 26, obtenemos dos valores de h , uno comprendido entre 0° y 180° y el otro entre 180° y 360° , relacionado con la salida y la puesta de sol respectivamente. Con este valor se calcula las dos horas solares, TSV :

$$TSV = 12 - \frac{h}{15} \quad 27$$

Con las horas solares se obtiene la Hora Oficial, HO , de salida y puesta de Sol:

$$HO = TSV + \varepsilon - ET + \frac{\lambda - \lambda_m}{15} \quad 28$$

Donde:

ε : corrección horaria (1 hora en invierno, 2h en verano).

λ : longitud del huso horario del punto de la instalación.

λ_m : longitud del punto de la instalación.

ET : ecuación del tiempo, es definida como:

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7.53 \cdot \cos B - 1.5 \sin B \quad 29$$

Siendo B

$$B = \frac{360}{364}(z - 81) \quad 30$$

De la expresión 30, se obtiene horas de Sol, T_{Sol} , de ese día:

$$T_{Sol} = HO_{Puesta} - HO_{Salida} \quad 31$$

Por otro lado, hay que calcular el ángulo acimutal de salida y puesta de Sol:

$$\cos \Psi_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin h}{\cos \gamma_s} = \frac{\cos \delta \cdot \sin h}{\cos 0} = \cos \delta \cdot \sin h \quad 32$$

El resultado del ángulo acimutal es de salida o puesta de Sol depende del ángulo horario, h .

1.5.3.3. Sistema de control

El sistema de seguimiento se va a aplicar la ecuación solar para determina la posición del Sol. El control del seguidor solar es gobernado por un microcontrolador Arduino.

En el Software del Arduino, se introduce los parámetros de la ecuación solar y nos calculará la posición del Sol. Según la posición del Sol, enviará unos señales, al Hardware, a los moteres eléctricos que accionara el seguimiento de la trayectoria solar.

1.5.3.4. Conclusión

El sistema de seguimiento se procede mediante la ecuación solar. Esta ecuación es fundamental para el seguimiento de la trayectoria del Sol y es sencilla de aplicar. Además, esta técnica de seguimiento se puede ahorrar las energías consumidas por los fotorresistencias respecto a la estrategia de seguimiento solar de los fotosensores.

El control del sistema se basa en el Arduino con la misión de calcular la posición del sol y ejecutar sobre los motores para realizar el seguimiento. El autor presenta las líneas de código de programación del Arduino donde se describe los comandos de la ecuación solar y las activaciones de salida. No obstante, no explica funcionamiento del sistema y tampoco se podría emplear para los otros tipos de microcontroladores.

También hay otro problema, en caso de que hubiese varios días nublados y la batería está totalmente descargada, al volvemos a tener el acceso de energía eléctrica para alimentar al Arduino. El microcontrolador no va poder ejecutar correctamente el funcionamiento del sistema porque se produce un Reset, es decir, el Arduino ejecuta los parámetros iniciales que se introdujo y reinicia los cálculos de la ecuación solar. Para evitar este problema es tener conexión WIFI para estar actualizando continuamente estos parámetros.

En este diseño, el autor se ha concentrado mucho en la parte de la ecuación solar y sistema de control frente al diseño mecánico.

1.5.4. Sistema de autolimpieza del panel solar

Actualmente, no existe ningún sistema de autolimpieza para los paneles solares. En este apartado, me gustaría marcar las informaciones recopiladas para el diseño de este sistema.

1.5.4.1. Limpiaparabrisas automáticos

El limpiaparabrisas automático es el sistema electromecánico, un componente esencial en el medio de transporte, que limpia la suciedad cuando detecta agua sobre la parabrisas o la luna del vehículo. El funcionamiento de este sistema se basa en el sensor de lluvia y limpiaparabrisas (Salas-Moyano, 2021).



Ilustración 14 Sensor de lluvia de un automóvil (Salas-Moyano, 2021)

El **limpiaparabrisas** es una tira de goma de sección rectangular que presiona el cristal y desplaza el agua, en las cuales, arrastra la suciedad.

El **sensor de lluvia** se basa en el principio físico de la propagación de la luz, refracción y reflexión.

- Refracción: cuando la luz atraviesa perpendicularmente por un medio y , a la salida, cambia su dirección.
- Reflexión: el medio que se atraviesa la luz se comporta como un espejo que la refleja con el mismo ángulo de incidencia.

Este sensor está compuesto de un diodo emisor y un diodo receptor. El diodo emisor está colocado a un determinado ángulo, de esta manera, la luz incide sobre la superficie exterior del cristal y se refleja, el haz de luz reflejada es recogido por el diodo receptor.

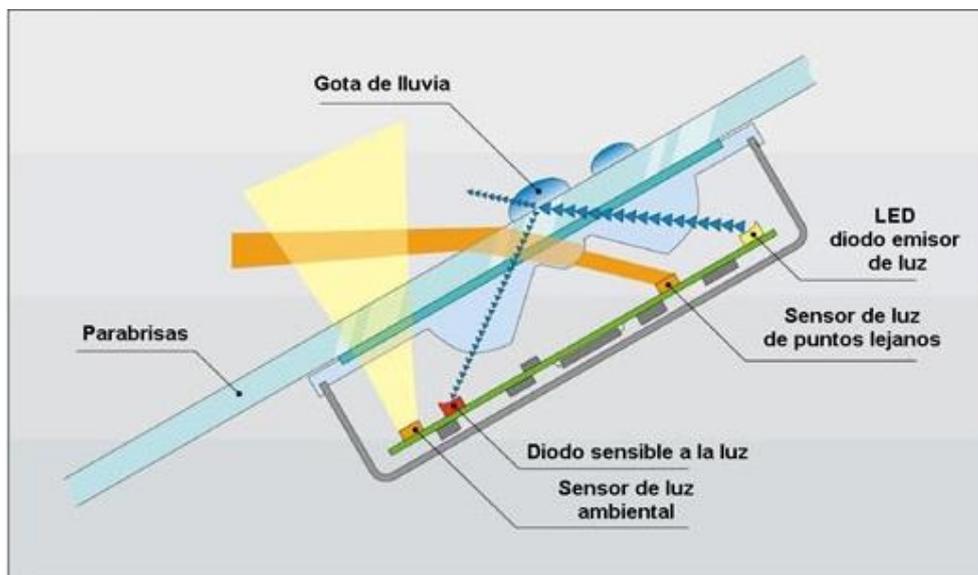


Ilustración 15 Funcionamiento del sensor de lluvia (Vitos & Idiarte, 2007, fig. 1.2)

Con estos conocimientos, se puede comprender sencillamente el funcionamiento del sensor. Cuando la luna está seca, se refleja todo el rayo de luz emitido. Por contrario, cuando se acumula las gotas de agua en la luna, las características de la superficie de reflexión varía, es decir, una parte del haz de luz se pierde por la refracción y el resto será reflejado. Debido a este efecto, el diodo receptor dejara conducir más o menos corrientes eléctrica en función de la cantidad de luz recogida. Además, contine un microchip que estima la cantidad de agua depositada en la zona y determina la cantidad de veces que el limpiaparabrisas deberá entrar en acción (Vitos & Idiarte, 2007, pp. 7, 8).

1.5.4.2. Bomba de lavado de limpiaparabrisas

La bomba de limpiaparabrisas es una pequeña bomba que expulsa el líquido desde el depósito hasta las boquillas del limpiaparabrisas.

El funcionamiento del sistema está compuesto un depósito unido a la bomba, o bien, un motor eléctrico que genera presiones para impulsar el fluido al exterior de la boquilla del limpiaparabrisas (Alfaro, 2022).

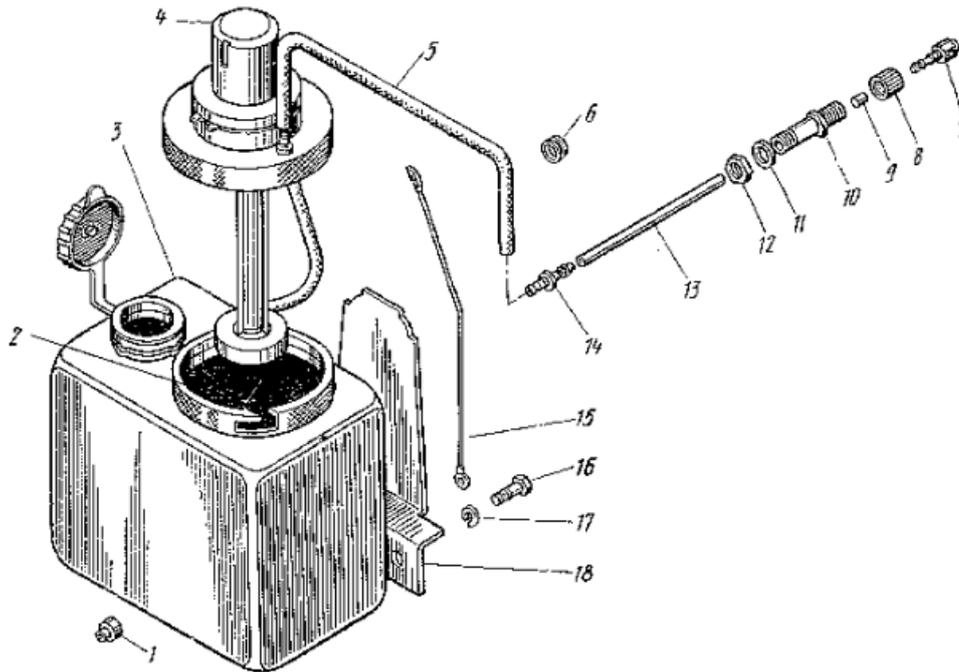


Ilustración 16 Despieces de la bomba de lavado limpiaparabrisas de un automóvil (Oborudow, 2019)

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MOVIMIENTO TIERRA-SOL

El movimiento Tierra-Sol se descompone de dos movimientos: Traslación y Rotación.

Traslación: la tierra gira alrededor del sol siguiendo la trayectoria elíptica, denominado el plano elíptico. Tarda un año para realizar toda la trayectoria.

Esta trayectoria tiene dos días significativo:

- Solsticio de verano: el periodo de luz solar es máximo debido a que la incidencia de rayo solar sobre superficie terrestre es mayor. Y esto coincide con la posición más alejada del sol para el hemisferio norte (21 de junio) .
- Solsticio de invierno: el periodo de luz solar es mínima debido a que la incidencia de rayo solar sobre superficie terrestre es menor. Y esto coincide con la posición más cercana al sol para el hemisferio norte (21 de diciembre).
- Equinoccio (de primavera y otoño); el periodo de igual duración del día y noche (12 horas). En el hemisferio norte son el día 21 de marzo y 23 de septiembre.

En el hemisferio sur ocurrirá justamente lo contrario.

Rotación: la Tierra gira sobre si misma alrededor de un eje imaginario que pasa por su polo tardando un día entero en realizar un giro completo.

El eje de rotación terrestre forma un ángulo de 23.45° , es al ángulo que está comprendido entre plano ecuatorial y el plano elíptico, se denomina oblicuidad de la elíptica. Debido a esta oblicuidad, el ángulo formado el plano ecuatorial va variando entre $+23.45^\circ$ y -23.45° . Este ángulo se conoce como declinación solar δ , se puede considerar el constante para cada día del año.

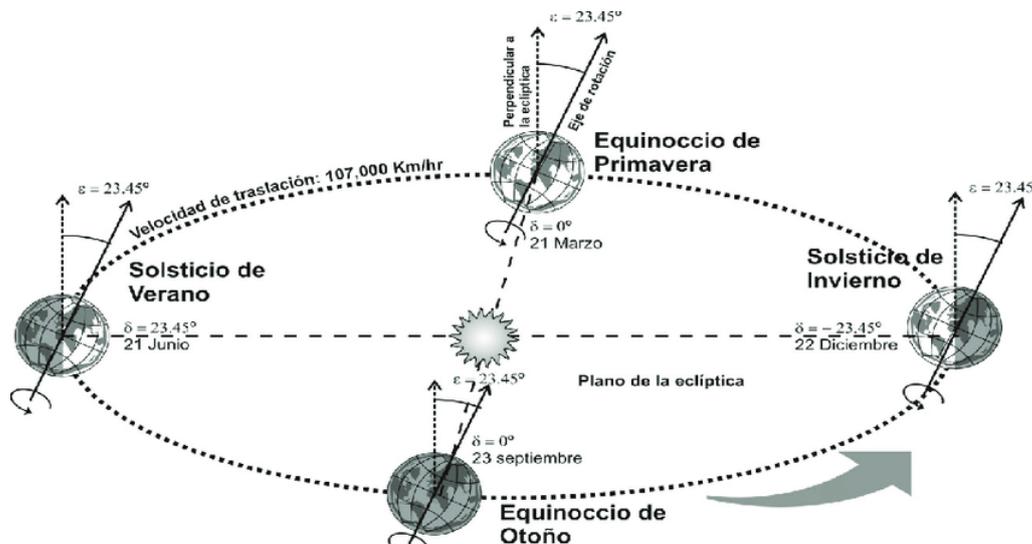


Ilustración 17 Movimiento Tierra-Sol (Gomez-Azpeitia, 2015)

Por esta razón, el ángulo de incidencia sobre la superficie terrestre varía a lo largo del año. Para el hemisferio norte, el ángulo de incidencia solar máximo se encuentra en el solsticio de verano. Por lo contrario, el ángulo de incidencia solar mínimo en el solsticio de invierno. Y mientras los equinoccios los ángulos son intermedios.

Para determinar la posición de la superficie Tierra al Sol tenemos que conocer la coordenada ecuatorial, solar, horaria y relativa (EDUTEL, 2008a, Capítulo 3).

2.1.1. Coordenada ecuatorial

Es un método para indicar la posición del sol respecto de un punto situado sobre superficie terrestre, las coordenadas ecuatoriales se basan en:

- **Longitud (L)** son los círculos máximos que pasan por los polos y se llaman meridianos, que mide el ángulo a lo largo del ecuador desde cualquier punto de la Tierra.
- **Latitud (Φ)** es el arco meridiano que se extiende desde el ecuador hasta el paralelo del lugar en el que nos encontramos que va aumentando de 0° a 90° . Por criterio internacional, se toman los valores positivos para hemisferio norte y negativo para el sur.
- **Declinación solar (δ)** es el ángulo comprendido entre el plano ecuatorial y el plano de órbita terrestre, plano elíptica.
- **Ángulo horario (ω)** representa el desplazamiento angular del Sol, del este al oeste del meridiano local. El recorrido es de 360° , es decir, cada hora recorre 15° (EDUTEL, 2008a, Capítulo 3).

2.1.2. Coordenada solar

Se emplea para calcular la radiación solar que llega a una superficie horizontal en la Tierra, es decir, conocer el posición del Sol en cualquier momento. Para se debe determinar dos ángulos:

- **Acimut solar (Ψ)** es el ángulo entre la proyección del rayo solar en el plano horizontal y la dirección sur-norte.
- **Altura solar (α)** es el ángulo comprendido entre el rayo solar y la protección del mismo sobre un plano horizontal.
- **Ángulo cenital (θ_z)**: es el ángulo entre los rayos del Sol y una línea perpendicular al plano horizontal (EDUTEL, 2008a, Capítulo 3).

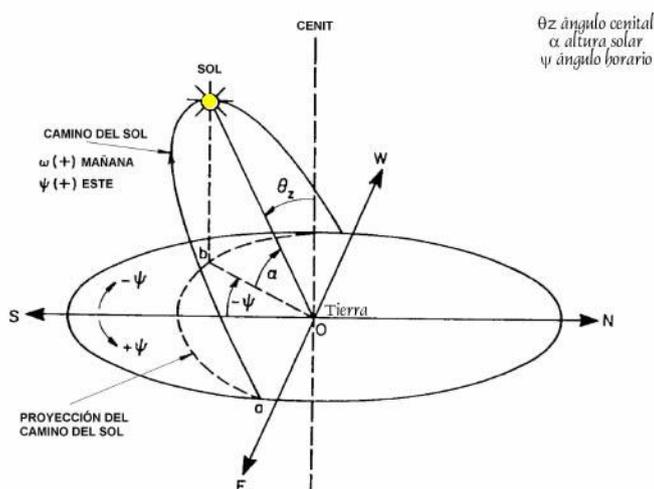


Ilustración 18 Coordenada Solar (Coordenada solar, 2023)

2.1.3. Coordenada horaria

Determina las horas de salida y de puesta del Sol por el horizonte, o bien, la hora útil de Sol (EDUTEL, 2008a, Capítulo 3).

2.1.4. Coordenada relativa

Determina la incidencia de los rayos solares sobre distintas superficies de la Tierra. La coordenada relativa está compuesta por:

- **Orientación (θ)** es el ángulo comprendido entre la protección de la normal de la superficie sobre el plano horizontal y la dirección Sur.
- **Pendiente o inclinación (B)** es el ángulo formado por la superficie considerada y el plano horizontal.

- **Ángulo de la normal a la superficie** (φ) se alza perpendicularmente sobre la pendiente, en este momento la incidencia solar es mayor.
- **Ángulo de incidencia solar** (σ) especifica la divergencia entre los rayos solares y la Normal que se va estudiar (EDUTEL, 2008a, Capítulo 3).

2.2. LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía electromagnética que se genera en los procesos de fusión del hidrogeno (90%) en átomos de helio (7%). El Sol emite todas las gamas del espectro magnético, de las cuales solo podemos aprovechar, en termino de energía, son las radiaciones térmicas: el rayo ultravioleta (UV), la radiación visible (V) y la infrarroja (IR). Estas son las radiaciones que se captan para obtener calor (energía solar térmica) o electricidad (energía solar fotovoltaico).

La intensidad de la radiación solar extraterrestre varía entre 1398 W/m² y 1310 W/m², cuando esta energía llega al superficie terrestre, esta es aproximadamente unos 1000 W/m² (EDUTEL, 2008a, Capítulo 3).

Esto es debido a la condición ambientales normal o condición de prueba estándar (Standard test conditions, STC) corresponde a una irradiancia de 1000 W/m² a una temperatura de 25°C y un coeficiente de masa, Air mass (AM) de 1.5 (Ospina-Agudelo, 2018, p. 6).

2.3. SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

El aprovechamiento de la energía solar es directa en forma de calor (energía calorífica) y de la radiación incidente (energía eléctrica). Las podemos clasificar en dos sistemas: pasivo y activo.

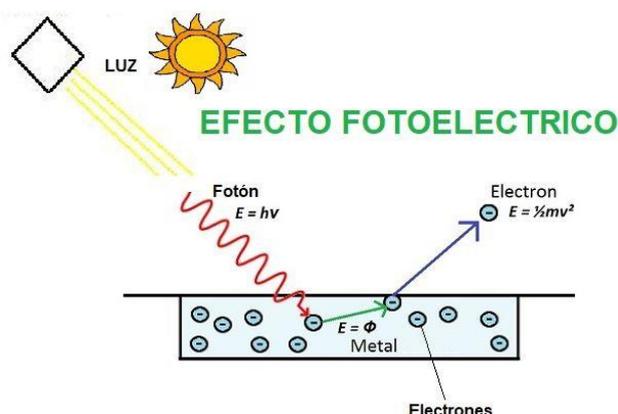
- **Sistema pasivo:** se refiere al diseño de la arquitectura que permite que los edificios utilicen sus mejores recursos energéticos, es decir, aumenta la temperatura interior en el invierno y enfría en el verano. Sin embargo, esta teoría es muy complicada de cumplir.
- **Sistema activo:** se basa en la captación de la radiación solar y se puede dividir en dos tipos de conversiones:
 - Conversión térmica: transformación de la radiación solar en calor.
 - Conversión eléctrica (efecto fotovoltaico): transformar la energía electromagnética (los fotones) del Sol en energía eléctrica (EDUTEL, 2008b, Capítulo 1).

2.3.1. Funcionamiento

En este proyecto está enfocado en transformar la energía solar en energía eléctrica, es decir, efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico es un fenómeno físico que transfiere la energía solar en energía eléctrica, esto es debido a los fotones de luz que inciden sobre un material semiconductor que es capaz de impulsar los electrones despedidos a través de un circuito exterior.

Explicando con más detalle, desde el punto de vista de la física, el efecto fotovoltaico se produce un proceso de generación radiactivo cuando un semiconductor se ilumina con fotones de energía mayor a energía de gap (es la energía que separa la banda de conducción y la banda de valencia de la estructura cristalina del enlace covalente, unión metal-no metal). Estos fotones consiguen transmitir la energía a los electrones de la capa de valencia, favoreciendo la aparición de pares de electrón-hueco, por lo que aumenta la conductividad.



Efecto Fotoeléctrico = Emisión de los electrones de un metal cuando incide sobre el metal una luz

Ilustración 19 Efecto fotovoltaico (Rodríguez, 2017)

La célula fotovoltaica es el dispositivo que se encarga de realizar el efecto fotovoltaico. Está constituido por una lámina de silicio cristalino, cuyo grosor está comprendido entre 0.25 y 0.3 mm y la superficie entre 10x10 cm² y 16x16 cm².

El proceso de fabricación y elaboración es complejo y delicado con el objetivo de conseguir una homogeneidad del material. Luego, estas células están dotadas de unos contactos eléctricos para canalizar la energía producida. Estos contactos están diseñados de forma ramificada, de baja resistividad y provocando la mínima sombra sobre el material.

No obstante, en practica, las células están asociadas eléctricamente entre sí y encapsuladas en un bloque llamado panel o módulo fotovoltaico. Un módulo fotovoltaico está compuesto por 36 células, cuya medida oscila entre 0.5 y 1 m² y el grosor entre 3.5 y 5cm (EDUTEL, 2008c, Capítulo 1).

2.3.2. Tipos de células solares y sus eficiencias

La eficiencia de las células se basan en la capacidad de conversión de energía luminosa en energía eléctrica. Esto es definido por "teoría de balance" desarrollado por *Schockley y Queiseer*, "la corriente producida por una celda fotovoltaica es determinada por la diferencia del número de fotones que son absorbido entre el número de fotones que son emitidos por el panel" (Reguera Gil, 2015).

La materia prima para la fabricación de la célula fotovoltaica más empleada es silicio (principal elemento para la fabricación de los semiconductores) ya que su conductividad se puede modificar agregando pequeña cantidad de impureza.

El silicio empleado para la fabricación de las células que componen en los módulos fotovoltaicos se presenta en tres formas diferentes:

- **Silicio monocristalino:** el silicio que compone las células de los módulos es un único cristal. La red cristalina es la misma en todo el material y tiene muy pocas imperfecciones, por lo que la célula es de un color uniforme, azul o negro. El proceso de cristalización es complicado y costoso.



Ilustración 20 Célula de silicio monocristalino (Cambio energético, 2021)

- **Silicio policristalino:** la red cristalina no es la misma en todo el material, por lo que tienen zonas de colores diferentes. El proceso de fabricación es más barato.
- **Silicio amorfo (a-Si):** no hay red cristalina, está formado por capas delgadas sucesivas depositadas al vacío sobre un cristal, plástico o metal. Además, se degrada o disminuye su eficacia tras una prolongada exposición solar (EDUTEL, 2008c, Capítulo 1).

También existen otras tecnologías no basada en silicio como:

- **Célula solar de película delgada:** son células mucho más delgadas, ligeras y flexibles. Hay cuatro tipos de materiales para fabricar las células solares: telururo de cadmio (CdTe), seleniuro de cobre, indio, galio (CIGS) y arseniuro de galio (GaAs) (Cambio energético, 2021).
 - **Célula de CdTe:** la eficiencia es similar a la célula de silicio monocristalino. Además, el coste de producción es bajo y se necesita muy poco recurso. Y sobre todo, estas células son aptas para incorporar las ventanas y los paredes (Sanz, 2021).
 - **Célula de CIGS:** la principal ventaja es que el coste de producción es menos costoso en comparación con el silicio monocristalino (DS New Energy, 2019).
 - **Célula de GaAs:** tiene un elevado coeficiente de absorción y puede trabajar a temperatura elevada con menos pérdidas. Su rendimiento es mucho mayor que el silicio monocristalino. El principal problema es que este materia es escasa y la tecnología de manipulación esta poca avanzada y elevado coste económico (EDUTEL, 2008c, Capítulo 1).
- **Células Perovskita** es una estructura cristalina compuesta por el óxido de calcio y titanio, un material semiconductor similar al silicio y es mucho más delgado en comparación con la célula de silicio. Además, la célula perovskita presenta elevada potencial de eficiencia y el coste de producción es bajo. No obstante, esta tecnología no está ampliamente disponibles (Cambio energético, 2021)

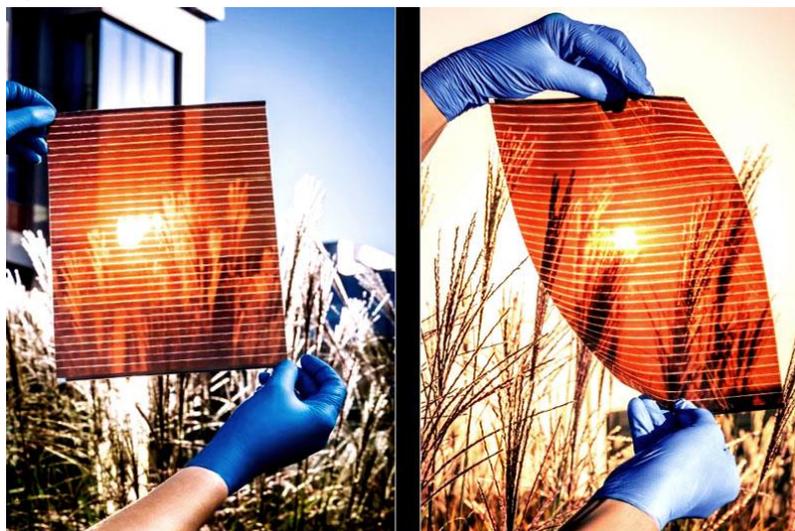


Ilustración 21 Célula perovskita (Cambio energético, 2021)

- **Célula solar orgánica:** la constitución se basa en carbono. Esta célula es flexible, duradera e incluso puede llegar a ser transparente, es decir, ideal para la fabricación de las ventanas solares. No obstante, esta tecnología aun no es viable para la comercialización (Cambio energético, 2021).

Podemos resumir todas estas tecnologías para la fabricación de las células y sus eficiencias teóricas bajo la condición STC (Green et al., 2022, tbl. 1) en la Tabla 5.

Tabla 5 Resumen de las células y su eficiencia

Tecnología de la célula	Materiales	Estado de fabricación	Eficiencia [%]
Silicio monocristalino	Red cristalina de un único material, silicio.	Complicado y costoso.	26.7 ± 0.5
Silicio policristalino	Red cristalina de silicio mezclado con otros materiales	Barato.	--
Silicio amorfo	Cristal, plástico o metal.	Se degrada o disminuye su eficiencia tras prolongada exposición al sol.	10.2±0.5
CdTe	Compuesto de Teluro y Cadmio.	Se necesita poco recurso y bajo costo de producción.	21.0±0.4
CIGS	Seleniuro de cobre, seleniuro de indio y seleniuro de galio.	Bajo coste de fabricación.	23.35±0.5
GaAs	Arseniuro de galio.	Poco avanzado y elevado coste económico.	29.1±0.6
Perovskita	Oxido de calcio y titanio.	Elevado producción y bajo coste de fabricación. No está ampliamente disponible.	23.7±0.5
Orgánica	Carbón.	Flexible, durable e incluso transparente.	15.2±0.2

2.4. MÓDULO FOTOVOLTAICO

El módulo o panel fotovoltaico es el dispositivo que transforma la energía luminosa en energía eléctrica. Este componente se puede conectar en serie o en paralelo para combinar cualquier combinación de tensiones o corriente (EDUTEL, 2008c, Capítulo 3).

2.4.1. Componentes de un módulo fotovoltaico.

El módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células solares conectadas en serie o en paralelo. Estas células están encapsuladas entre cristal templado y varias capas de plástico que protegen frente a las condiciones meteorológicas desfavorables.

Todo el conjunto está compuesta mediante perfiles metálicos de aluminio que dan facilidad para acoplar a la estructura del soporte. Y por la parte posterior del módulo, se encuentra las cajas de conexiones con los terminales (EDUTEL, 2008c, Capítulo 3).

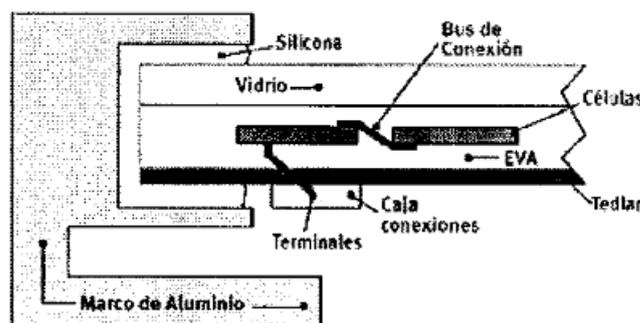


Ilustración 22 Sección transversal de un módulo solar (EDUTEL, 2008c, fig. 36)

A continuación describimos específicamente cada una de las parte del módulo fotovoltaico.

- **Cubierta exterior:** su principal función es proteger las condiciones meteorológicas desfavorables. Por lo que, se emplea un cristal templado por su excelencia resistencia mecánica a los impactos y garantiza una excelente transmisión a la radiación solar. Además, el cristal debe ser liso en el parte exterior para evitar retención de la suciedad y rugoso en el parte interior para mejorar la adherencia con las células solares encapsuladas. Su espesor suele ser de 4mm.
- **Capas encapsulantes:** el material más empleado es el etileno-vinilo-acetato (EVA) que proporciona un excelente transmisión de la radiación solar a las células. Además, EVA posee elasticidad que evita las posibles vibraciones exteriores. No obstante, EVA se degrada por las radiaciones UV.

- **Protección posterior:** tiene la misma misión que la cubierta exterior, ejerciendo una barrera contra humedad. Su composición es material acrílico.
- **Marco soporte:** es la parte mecánica del conjunto y debe permitir la sencillez de fijación en el soporte. Generalmente son de aluminio anodizado.
- **Cajas de conexiones** son los contactos que nos permiten conectar con otros módulos fotovoltaicos o acceder a la energía eléctrica producida.

2.4.2. Curva IV del módulo fotovoltaico

Las características eléctricas de un módulo fotovoltaico es definido por la curva IV (Intensidad-Voltaje). Los parámetros típicos IV son:

- **Intensidad de corto circuito** (I_{sc}) es la intensidad que produce el módulo cuando es forzado a trabajar a tensión cero ($V=0$), es decir, la carga del módulo tiene una resistencia nula al paso de corriente. Este valor varía en función de la radiación absorbida en la superficie de la célula.
- **Tensión de circuito abierto** (V_{oc}) es la tensión medido entre los bornes de un módulo al no estar conectado con ninguna carga ($I=0$). Esta tensión puede alcanzar un voltaje muy elevado respecto a la tensión nominal.
- **Intensidad de máxima potencia** ($I_{m\acute{a}x} = I_{MPP}$) es la intensidad que ofrece el módulo cuando las condiciones de carga permiten trabajar a máxima potencia.
- **Tensión de máxima potencia** ($V_{m\acute{a}x} = V_{MPP}$) es la tensión que ofrece el módulo en su máxima potencia.
- **Máxima potencia** ($P_{m\acute{a}x} = P_{MPP}$) la potencia máxima que suministra el módulo solar, se define como:

$$P_{MPP} = I_{sc} \cdot V_{oc} \quad 33$$

- **Potencia nominal o de pico** (P_p) es determinada por el punto de máxima potencia con los valores de STC (EDUTEL, 2008c, Capítulo 1):

$$P_p = I_{PP} \cdot V_{MPP} \quad 34$$

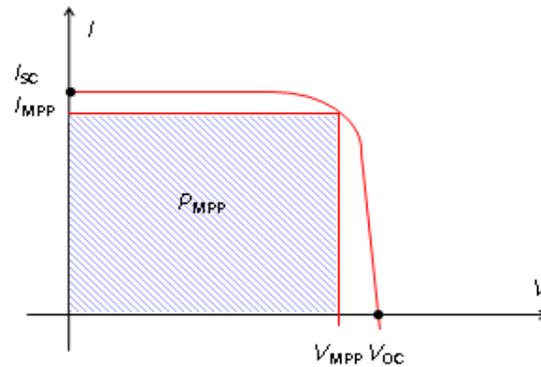


Ilustración 23 Parámetros generales de la Curva IV (Reguera Gil, 2015, fig. 1)

En la Ilustración 23 se puede observar que los parámetros fundamentales de módulo fotovoltaico que construyen la curva IV. Con estos parámetros se pueden determinar la degradación del módulo fotovoltaico mediante la comprobación del estado de P_{MPP} , es decir, si:

- $P_{MPP} \approx P_p$, el módulo fotovoltaico está en estado óptimo.
- $P_{MPP} \ll P_p$, el módulo fotovoltaico está degradando.

La potencia útil o máxima suministrada en Wh por el panel fotovoltaico se expresa:

$$E_{\tau} = \int_{t_1}^{t_2} P_{MPP}(t) dt \quad 35$$

Donde τ es el variable del tiempo y con esto se puede emplear la potencia como término de energía (Reguera Gil, 2015, pp. 3, 4,).

No obstante, en la realidad, se emplea otros dos términos para determinar la degradación basado los parámetros de la curva IV:

- **Fill factor o Factor de forma** es una comparación entre la potencia de pico con la potencia máxima, se define mediante siguiente expresión:

$$FF = \frac{P_p}{P_{MPP}} = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad 36$$

El valor máximo de FF es la unidad, es decir, $FF=1$ y este es el valor óptimo teórico. En la práctica, el FF , por ejemplo, de las células de monocristalino está comprendido entre 0.7 y 0.8. Por lo que, la célula será mejor cuando FF se aproxime más hacia 1.

- **Eficiencia o rendimiento (η)** es la que indica la calidad de la célula, se define como:

$$\eta = \frac{P_p}{A \cdot G} \quad 37$$

Donde:

G es la potencia luminosa en condición estándar $1000\text{W}/\text{m}^2$.

A es la área de la célula.

- **Resistencia serie y paralelo:** estos dos factores alteran el comportamiento de la célula fotovoltaica, especialmente al FF , como consecuencia, a la eficiencia de la célula.
 - **Resistencia serie (R_s):** una resistencia interna de la propia célula que se debe a la malla de metalización. Hay un compromiso entre el factor de recubrimiento de la célula y la resistencia serie, al minimizar el factor de recubrimiento, la malla de metalización deja pasar más luz. Y como consecuencia, la resistencia en serie tiene a incrementarse hacia infinito.
 - **Resistencia paralelo (R_p):** es originado por las imperfecciones en la calidad de la unión P-N que constituye la célula y es la responsable de permitir la existencia de fuga de corriente.
- **Influencia de la temperatura y la radiación en los parámetros básicos,** para ellas, hay que tener en cuenta dos conceptos fundamentales:
 - La tensión en la bornas de una unión P-N varía en función de la temperatura.
 - La corriente suministrada por una célula fotovoltaica a un circuito exterior es proporcional a la intensidad de la radiación y a la superficie de la célula.

Mediante la curva IV, se puede concluir que el rendimiento de la célula disminuye con el incremento de la temperatura. Y por otro lado, el rendimiento de la célula aumenta con el incremento de la radiación solar (EDUTEL, 2008c, Capítulo 1) (Reguera Gil, 2015, p. 4).

2.4.3. Mecanismo de degradación módulo fotovoltaico

La degradación es un fenómeno natural e inevitable que disminuye la producción energética y los beneficios energéticos (Reguera Gil, 2015). Es importante determinar la degradación de los módulos fotovoltaicos porque una degradación del 20% o más respecto a las especificaciones nominales se consideran como falla. Además, la degradación no solo reduce la eficiencia eléctrica producida, sino que también acorta la vida útil del módulo fotovoltaico (Ospina-Agudelo, 2018, p. 4).

La degradación de panel fotovoltaico se refiere a una reducción de eficiencia en la conversión de la energía solar a energía eléctrica. Esto puede ser provocado por la sombra, condición ambiental, exceso de suciedad, fallos del sistema, degradación prematura o por envejecimiento (Ospina-Agudelo, 2018, p. 10).

Generalmente la degradación del panel es gradual que va evolucionando a lo largo del tiempo. Esto es debido a la condición ambiental y las propiedades de materiales de fabricación.

El mecanismo de degradación es provocado por factores ambientales y el tipo de material que está constituido la célula fotovoltaica.

2.4.3.1. Factores ambientales

Por causa de la condición ambiental, el módulo fotovoltaico experimenta el fenómeno de la fatiga, y estos factores son:

- **Radiación solar:** el principio de funcionamiento del módulo fotovoltaico. No obstante, a elevada temperatura es perjudicial, disminuye la transformación de energía solar a energía eléctrica.
- **Humedad:** es la cualidad meteorológica más agresiva para el módulo fotovoltaico. Esta puede penetrar en el módulo y producir oxidaciones o corrosiones a las conexiones eléctricas.
- **Nieve:** la acumulación del copo de nieve puede dar una carga estática que varía entre 30 kg/m^3 y 50 kg/m^3 , mientras la nieve congelada varía entre 800 kg/m^3 y 900 kg/m^3 que puede originar la rotura del módulo fotovoltaico o la estructura sobre la que se apoya.
- **Viento:** la prolongación del viento puede ocasionar carga estática y dinámica para los paneles fotovoltaicos. Según la norma IEC 6121534, la característica del viento se considera más la presencia de carga estática que la carga dinámica, lo cual ha sido estandarizado.
- **Granizo:** la acumulación de los impactos causan la rotura del cristal templado u otro elemento de protección debido a la fatiga mecánica del material.
- **Delaminación** o cambios de temperatura afecta la fatiga termo-mecánica debido a que cada componente que constituye el módulo fotovoltaico tiene diferentes módulos de Young y coeficiente de dilatación. Y este fenómeno produce tensiones que causaran la rotura de la célula fotovoltaica o la separación entre los diferentes componentes.

- **Polvo, tierra y suciedad** es el principal factor que disminuye la eficiencia. Además, combinando con el viento (tormenta de arena) actúa abrasión que daña la superficie exterior del módulo fotovoltaico. Ocurre el mismo efecto con los restos orgánicos de los aves.
- **Sal:** se produce corrosión de los elementos metálicos y la degradación de los polímero del módulo, esto es frecuente en las instalaciones cercanas de la costa.
- **Gases:** instalaciones que ubican próxima de las industrias que emiten gases como O_3 , NH_3 , SO_2 , NO_2 , H_2S , Cl_2 , etc. que afectan de forma individual o combinando con humedad. Esta mezcla produce una reacción química que forma ácidos como HNO_3 , HCl , H_2SO_4 , que son muy corrosivo para los metales.

Todos estos factores no suelen actuar de manera individual, sino que actúa de forma combinada, lo cual, la degradación de los módulos aumentan (Reguera Gil, 2015, p. 18).

2.4.3.2. Material de constitución de la célula fotovoltaica

Los principales materiales que componen el módulo fotovoltaico son:

- **Vidrio:** la cubierta frontal del panel fotovoltaico. La degradación puede ser afectado por la combinación de viento, polvo y tierra que reduce la transmisibilidad óptica, afectando la potencia entregada.
- **Metal:** está en presente tanto en parte exterior o interior del panel. El principal agresor es la corrosión y junto a la humedad, el metal será destrozado.
- **Polímeros:** para los encapsulados o las juntas que impiden la penetración de la humedad. Estos sufren una fuerte exposición a radiación UV que debilitaran su estructura química generando el mecanismo de degradación, conocido como decoloración (Reguera Gil, 2015, p. 20).

2.4.4. Modo de degradación del módulo fotovoltaico

El modo o mecanismo de degradación es un procedimiento que sufre los módulos fotovoltaicos cuando empiezan a perder sus propiedades características.

- **Delaminación:** se produce cuando se pierde la adhesión entre los diferentes elementos que componen el panel fotovoltaico. Esto es un problema muy importante porque se incrementa la reflexión

de la luz, por lo que, reduce la incidencia de la radiación solar. Además se puede penetrar la humedad y producir corrosión en el interior del panel fotovoltaico.

- **Decoloración:** Se produce por la degradación del encapsulante o del material adhesivo entre el cristal y las células fotovoltaicas. Por este motivo, el encapsulante cambia a color amarillo (decoloración parcial) o marrón (decoloración total) y, por tanto, la energía generada se reduce.
- **Corrosión:** un fenómeno natural que destruye un material metálico y esto es producido por reacción electroquímica.

El principal problema de los módulos fotovoltaicos es la humedad. La penetración de la humedad en el interior de módulo incrementa la conductividad eléctrica y aparece corrientes de fuga.

Para prevenir este problema, el módulo debe emplear juntas de baja difusión que contenga una gran cantidad de desecante. En cuanto, el marco metálico se debe realizar un tratamiento anodizado, este es un tratamiento químico para obtener una capa de óxido de protección.

- **Punto caliente:** la zona del módulo fotovoltaico que se encuentra trabajando a elevada temperatura y puede ocasionar daño de la célula u otro elemento de la composición.

El origen de estos puntos es el sobrecalentamiento parcial o el *mismatch*, fenómenos relacionados con los parámetros de las células fotovoltaicas. Por ejemplo, en la condición de cortocircuito en una célula defectuosa, esta se polarizará de forma inversa, lo cual, tiene la misma tensión con el signo opuesto. Entonces, esta célula se convierte en carga para el resto de las células y, en ella, se produce la fatiga térmica y termina convirtiéndose en un punto caliente.

- **Burbuja:** similar a la delaminación, pero afecta a una pequeña área, se podría decir, es un aviso previo al proceso de delaminación.

Las burbujas son generadas por las reacciones químicas que imiten los gases que quedan atrapado en el interior del módulo y ocasionan la dificultad de disipación del calor, de tal forma, aumenta la temperatura, lo cual, reduce la vida útil del panel fotovoltaico.

- **Degradación inducida por potencial** o PID (*Potencial Induced Degradation*): se debe las conexiones en serie (más detalle en el apartado 2.4.6.1) que suma las tensiones a cada una de los

paneles fotovoltaicos y es muy fácil llegar a una tensión muy elevada.

Para proteger a las personas, el marco se encuentra conectado a la tierra, lo cual su potencial es 0V. Por este motivo, aparece una diferencia de potencial negativo entre célula fotovoltaica y el marco metálico, lo cual, se origina una corriente de fuga que transita desde el encapsulado hasta llegar al marco.

Para minimizar esta degradación, se emplea un inversor conectado con el módulo fotovoltaico y el polo negativo del inversor con la tierra. De esta manera, se puede eliminar la diferencia de potencial.

- **Degradación por descargas eléctricas:** un fenómeno natural, relámpago, que puede dañar el módulo fotovoltaico ya que sea una carga directa o mediante el acoplamiento magnético que se produce. Para evitar esto, es necesario diseñar un sistema de protección adecuado (Reguera Gil, 2015, pp. 21, 22, 23, 24).

2.4.5. Parámetros eléctricos de degradación

Una vez conocido los diferentes mecanismo y modo de degradación, es necesario establecer una correspondencia con los parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico.

- **Delaminación:** la resistencia en serie del módulo fotovoltaico R_s aumenta, lo cual disminuye I_{SC} y permanece fijo al V_{OC} .
- **Decoloración:** produce la reducción de I_{SC} , por lo que, se entrega menos potencia. La pérdida de este parámetro puede ser entre 6% y 8% en caso de decoloración amarilla y entre 10% y 13% en el caso de decoloración marrón.
- **Corrosión:** aumenta el valor de R_s , como resultado es similar a la de delaminación.
- **Burbuja:** como había mencionado anteriormente, se considera como el comienzo de la delaminación, por lo que, también conlleva el aumento de la R_s .
- **Degradación inducida por potencial:** produce la disminución de la P_{MPP} y R_p .
- **Degradación por descarga eléctrica:** produce una reducción de la potencial de salida y un aumento en R_s .

Resumiendo todo esto, en la Tabla 6, se recopila los diferentes modos de degradación, los factores ambientales que las provocan y los parámetros eléctricos del panel fotovoltaico afectado (Reguera Gil, 2015, p. 24,25).

Tabla 6 Resumen modos de degradaciones (Reguera Gil, 2015, tbl. 3)

Modo de degradación	Factor ambiental	Parámetro electrónico
Delaminación	Radiación UV	Aumento de R_S Disminución de I_{SC} V_{OC} es constante
Decoración	Calor y humedad	Disminución de I_{SC}
Corrosión	Humedad	Aumento de R_S
Puntos calientes	Sobrecalentamiento parcial, fallo de fabricación	Disminución de I_{SC} y V_{OC}
Burbuja	Calor y humedad	Aumento de R_S
PID	Calor y humedad	Disminución de P_{MPP} y R_P
Descarga eléctrica	Relámpagos	Aumento de R_S

2.4.6. Conexiones de los módulos fotovoltaicos

Existen tres posibilidades de conexión en los módulos: conexiones en serie, en paralelo y mixto.

2.4.6.1. Conexión en serie

La conexión se basa en conectar el terminal positivo con el terminal negativo de módulo siguiente, y así sucesivamente. La salida será el último terminal positivo del módulo con el terminal negativo del primer módulo.

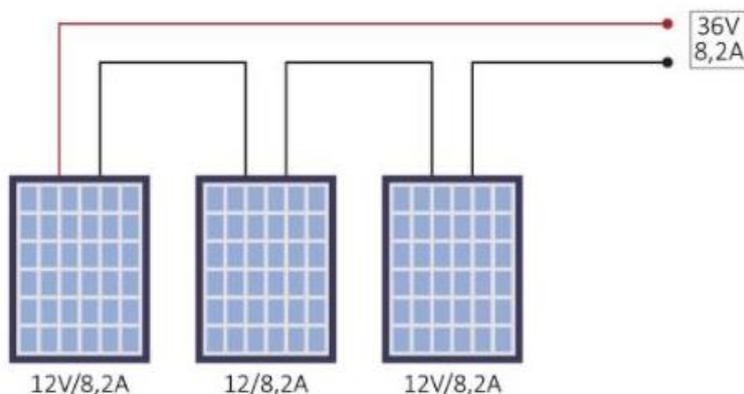


Ilustración 24 Conexión en serie de los paneles solares (Redacción, 2021)

La corriente eléctrica total en serie es la misma para cada módulo. En cambio, la tensión total es la suma de las tensiones de cada módulo.

$$I_T = I_{\text{módulo}} \quad 38$$

$$V_T = V_{\text{módulo } 1} + V_{\text{módulo } 2} + \dots + V_{\text{módulo } n} \quad 39$$

2.4.6.2. Conexión en paralelo

Los conexiones se basa en conectar entre sí los terminales positivos de todos los módulos, y por otro lado, todos los terminales negativos. La salida será entre el terminal positivo común y el terminal negativo común.

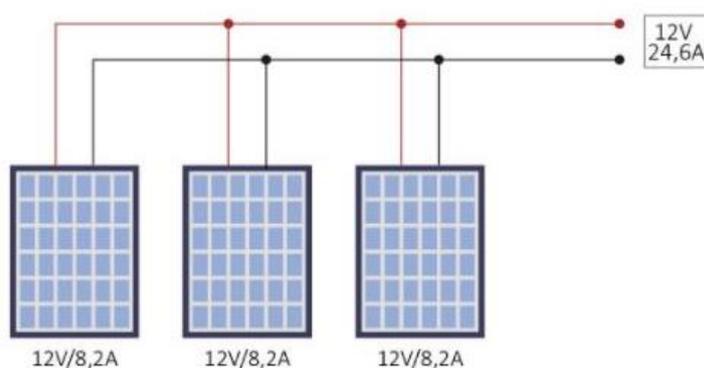


Ilustración 25 Conexión en paralelo de los paneles solares (Redacción, 2021)

La corriente eléctrica total es la suma de las intensidades de cada módulo. Mientras la tensión se mantiene el voltaje del módulo.

$$I_T = I_{\text{módulo } 1} + I_{\text{módulo } 2} + \dots + I_{\text{módulo } n} \quad 40$$

$$V_T = V_{\text{módulo}} \quad 41$$

También es importante destacar que el aumento de la intensidad produce la pérdida de energía debido al efecto Joule, el calentamiento de los conductores. Por esta razón, obligan instalar conductores de gran sección para soportar las intensidades elevadas .

2.4.6.3. Conexión mixto

Es la combinación de los conexiones en serie y en paralelo. Esto nos permite realizar una configuración de tensión e intensidad apropiada de aplicación.

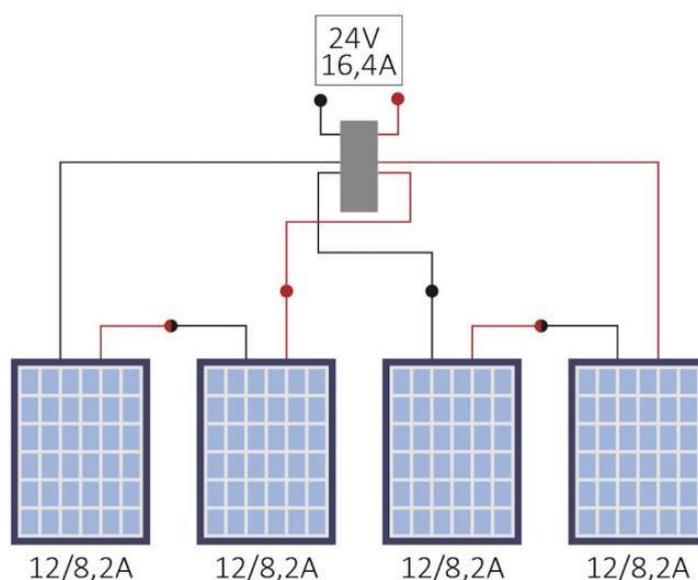


Ilustración 26 Conexión mixto de los paneles solares (Redacción, 2021)

Para determinar las cantidades de modulo que se necesitan para obtener la corriente y la tensión apropiada de trabajo, se calculan con las siguientes expresiones (EDUTEL, 2008c, Capítulo 3):

$$I_T = N.^\circ \text{ de modulos en paralelo} \cdot I_{\text{módulo}} \quad 42$$

$$V_T = N.^\circ \text{ de modulos en serie} \cdot V_{\text{módulo}} \quad 43$$

2.4.6.4. Selección de la configuración correcta

A la hora de diseñar una instalación solar fotovoltaica tenemos que cumplir los siguientes criterios:

- **Criterio de máxima eficiencia:** minimizar las pérdidas de energía por el efecto Joule que produce el calentamiento de los conductores y de los equipos de regulación.

- **Criterio de mínimo coste:** una tensión más bajo posible a costa de tener las intensidades de paso en conductores y controles más elevadas (EDUTEL, 2008c, Capítulo 3).

2.4.7. Aplicaciones de energía solar fotovoltaico

Existen dos formas de instalación básicas de sistema solar fotovoltaico:

- **Instalación aislada** de la red eléctrica: la energía está conectada a una carga de consumo.
- **Instalación conectada a la red eléctrica:** la energía generada conecta a la red eléctrica.

2.4.7.1. Sistema fotovoltaico autónoma

Los sistemas fotovoltaicos autónomos o asilados de la red eléctrica son constituidos por los siguientes subsistemas:

- Subsistema generador (módulo fotovoltaico).
- Subsistema acumulador (batería).
- Subsistema regulador.
- Carga de consumo.

El funcionamiento de esta instalación se basa en estos subsistemas, se genera la energía eléctrica mediante los paneles solares y distribuida por un regulador que almacena la energía en la batería o alimenta al punto de consumo. Y esto se puede realizar diferentes configuraciones:

- Sistema fotovoltaico simple con una carga en DC.
- Sistema fotovoltaico simple con una carga en AC mediante el inversor que convierte DC a AC.
- Sistema fotovoltaico de electrificación rural en AC, con el apoyo del regulador y la batería.
- Sistema fotovoltaico de electrificación rural en AC mediante el regulador, batería e inversor.
- Sistema fotovoltaico de electrificación rural en DC y AC.
- Sistema fotovoltaico mixto (EDUTEL, 2008c, Capítulo 2).

2.4.7.2. Sistema fotovoltaico conectados a la red eléctrica

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, como su nombre indican, son aquellos que están acopladas a la red eléctrica (EDUTEL, 2008c, Capítulo 2).

2.4.8. Modelo de una celda fotovoltaica

El modelo de la celda está compuesto por:

- Una fuente de corriente I_{PH} que es la corriente generada por efecto fotovoltaico.
- Un diodo de unión PN.
- Resistencia serie R_S .
- Resistencia shunt o paralelo $R_{SH} = R_P$.

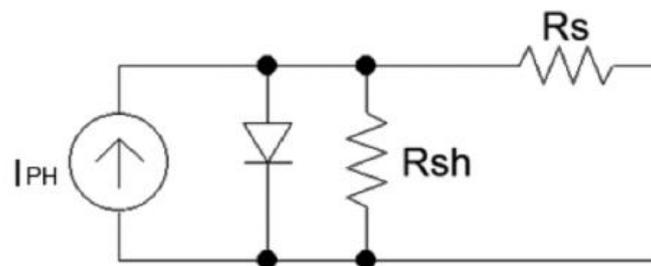


Ilustración 27 Circuito equivalente de una celda solar (Eraso et al., 2019, fig. 1)

Según Lien, la corriente generada se debe a la generación de par hueco de electrón en un volumen, por lo que, la corriente se determina en función del volumen:

$$I_{PH} = Q \cdot A \cdot G_0 \cdot (L_P + L_N) \quad 44$$

Donde:

$Q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$: la carga elemental constante.

A : el área transeccional del diodo o la celda solar.

G_0 : la tasa de generación o concentración de fotones, es decir número de fotones inyectados por segundo al material semiconductor.

L_P : la longitud de difusión para los huecos.

L_N : la longitud de difusión para los electrones.

La densidad de corriente J , en mA/cm², es la generación de corriente de celda en función de su área:

$$J = N_p \left[-J_{PH} + I_s \left(e \cdot \frac{q \cdot \left(\frac{V_A}{N_s} - J \cdot R_s \right)}{N_s} - 1 \right) + \left(\frac{V_A}{R_{SH}} - J \cdot R_s \right) \right] \quad 45$$

Los modelos matemáticos, Luque y Gow, estiman que el comportamiento eléctrico de las tecnologías monocristalina y policristalina pueden emplear el modelo de doble exponencial:

$$J = N_p \left[-J_{PH} + J_{S1} \left(e \cdot \frac{q \cdot \left(\frac{V_A}{N_s} - J \cdot R_s \right)}{K \cdot T} - 1 \right) + J_s \left(e \cdot \frac{q \cdot \left(\frac{V_A}{N_s} - J \cdot R_s \right)}{A \cdot K \cdot T} - 1 \right) + \left(\frac{V_A}{R_{SH}} - J \cdot R_s \right) \right] \quad 46$$

Tanto para expresión 45 como 46, donde:

J : la densidad de corriente entregada por el módulo solar.

J_{PH} : la densidad de corriente fotogenerada.

J_{S1} : la densidad de corriente generada debido al mecanismo de difusión.

J_{S2} : la densidad de corriente generada debido al proceso de recombinación de portadores minoritarios de carga.

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$: la carga elemental constante.

V_A : el voltaje en el módulo.

$K = 1,38 \cdot 10^{-23}$: la constante de Boltzmann.

$T = 25^\circ C$: la temperatura ambiente.

N_s : N.º de celdas fotovoltaicas del módulo conectadas en series.

N_p : M.º de celdas fotovoltaicas del módulo conectadas en paralelo.

R_s : la resistencia en serie asociada al módulo fotovoltaico.

R_{SH} : la resistencia paralelo o shunt del módulo fotovoltaico.

A : el factor ideal o calidad del diodo.

(Eraso et al., 2019, pp. 190, 191, 192)

2.5. SEGUIDOR SOLAR

Seguidor solar es un sistema que persigue la trayectoria del Sol para aprovechar la máxima hora de sol recibida por el módulo fotovoltaico, por lo que, se deben orientar perpendicularmente a la radiación solar.

Los seguidores solares se pueden clasificar en función del movimiento, del tipo de sistema fotovoltaico y de los grados de libertad (Gutiérrez & Chávez, 2012).

2.5.1.1. Clasificación por los movimientos

Esta clasificación se basa en los dispositivos que proporciona el movimiento y la podemos clasificar en:

- **Seguidor activo:** se emplea motores eléctricos, actuadores y elementos de transmisión, los cuales son controlados por un circuito electrónico. No obstante, a este seguidor le debe suministrar energía, puede ser la energía propia de lo producida por los módulos fotovoltaicos o de una fuente externa. Por lo que, se considera un seguidor autónomo.
- **Seguidor pasivo:** se emplea un gas comprimido de bajo punto de ebullición que fluye en el interior de la estructura según el calentamiento. Es decir, el incremento de la temperatura por radiación solar aumenta la presión del gas. De esta forma, produce un desbalance en la estructura que mueve el sistema (Gutiérrez & Chávez, 2012).

2.5.1.2. Clasificación por los sistemas fotovoltaicos

Se clasifica por la producción de energía del sistema fotovoltaico.

- **Seguidor de sistemas fotovoltaicos concentrados:** requiere la luz directa en un punto específico del módulo fotovoltaico, por lo que la orientación es de mucha precisión para entregar 90% de la potencia.
- **Seguidor de sistemas fotovoltaicos no concentrados:** el módulo fotovoltaico acepta tanto la luz directa como difusa, no necesita gran precisión para entrega la potencia adaptable. Aun así, es capaz de producir la mayor cantidad de energía (Gutiérrez & Chávez, 2012).

2.5.1.3. Clasificación por los grados de libertad

- **Seguidor de un eje:** la estructura presenta un grado de libertad que presenta un mínimo grado de complejidad. No obstante, posee una limitación que impide realizar la trayectoria completa del Sol, es decir, solo puede seguir en acimut solar o altura solar, pero no ambas (Osorio-R., 2010). En ella podemos dividir en:
 - **Eje horizontal** respecto al suelo está orientado Norte-Sur. A lo largo del día, el módulo gira sobre este eje siguiendo la trayectoria del sol. Este seguidor es más favorable en latitudes cercanas al ecuador.

- **Eje vertical** respecto al suelo, el módulo está orientado con un ángulo sobre este eje formando un cono cuando sigue la trayectoria del sol. Este seguidor es favorable para latitudes lejanas al ecuador.
- **Eje inclinado**, el módulo están orientado sobre la misma inclinación del eje formando un cilindro cuando sigue la trayectoria del sol, cuyo el ángulo de inclinación es la misma a la de latitud que depende de lugar que se encuentre la instalación. Es decir, una orientación de polo a polo simulando el movimiento del Tierra con el sentido de giro contrario (Gutiérrez & Chávez, 2012).
- **Seguidor a dos eje**: la estructura presenta dos grados de libertad. Por lo que, el movimiento es más preciso con la capacidad de realizar el seguimiento total del Sol, tanto en acimut solar como altura solar, y mayor rendimiento (Osorio-R., 2010). Este seguidor la podemos diversificar en:
 - **Seguidor de dos ejes de inclinación (TIP-TILT)**: el eje primario es horizontal respecto al suelo y perpendicular al segundo eje. Los ejes de rotación están alineados con el Norte magnético o paralelo Este-Oeste. Unos de los ejes permite orientar la posición del Norte-Sur, mientras el otro eje en la posición Este-Oeste.
 - **Seguidor de Acimut-Altitud**: el eje primario es vertical respecto al suelo y perpendicular al segundo eje. Los paneles solares de este seguidor giran alrededor de su eje vertical frente al sol, variando el ángulo Acimut, y regulando la inclinación de los paneles, modificando la Altitud (Gutiérrez & Chávez, 2012).

La comparación entre ambos seguidores es que, el de un eje tiene ventaja como menos coste económico y simple, y desventaja como imprecisión y menor cantidad de captación. Mientras el de dos eje, tiene mayor precisión y captación de energía, pero el coste económico es elevado (Osorio-R., 2010).

2.5.1.4. Clasificación por los algoritmos de seguimiento

Actualmente existen dos maneras de realizar el seguimiento del sol:

- **Seguidores de punto luminoso**: el funcionamiento se basa en la señal recibida por uno o varios sensores que indican cual es punto más luminoso y al que se deban apuntar. Esta señal será recibida por un controlador que actuará sobre uno o varios motores para posicionar el punto adecuado de luminosidad.

- **Seguidores con programación astronómica:** el funcionamiento se basa un programa que reconocen en qué punto debería estar el Sol a cada hora y apunta a dicha posición. No requiere la necesidad de los sensores, el seguimiento realizado depende de una serie de ecuaciones que predice la ubicación del Sol en cualquier momento.

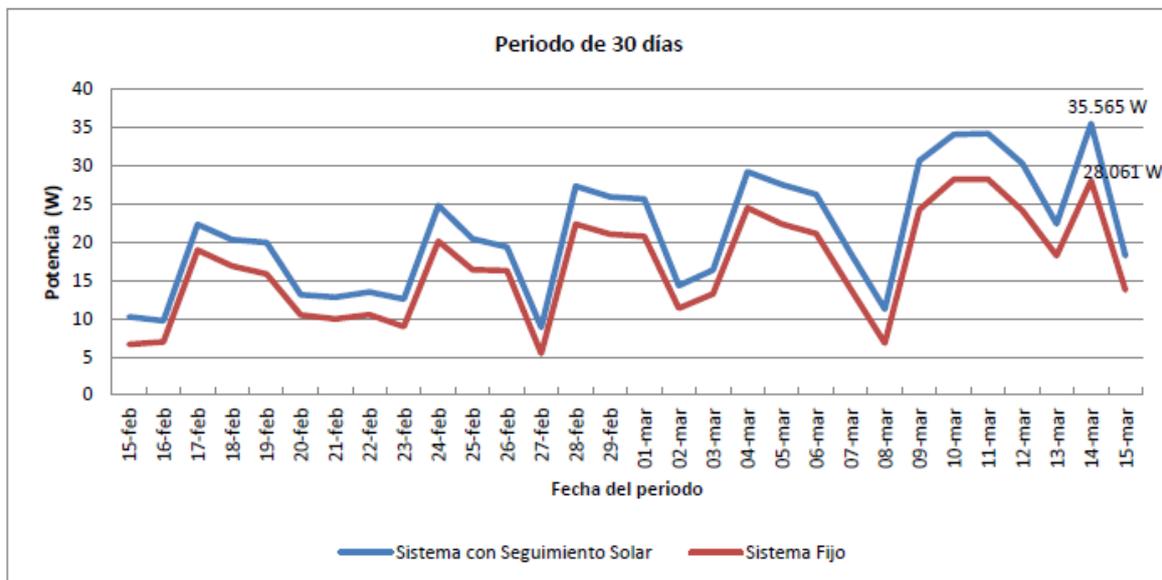
La comparación entre ambos seguidores es que el algoritmo del punto luminoso tiene la mayor facilidad para la implementación y bajo coste económico, pero presenta poca fiabilidad. Mientras, la programación astronómica tiene una mayor fiabilidad, no obstante, el algoritmo de la implementación es se basa en unas ecuaciones calculadas, por lo que, es una tecnología es cara por la dificultad de mantenimiento y control (Osorio-R., 2010).

2.5.1.5. Rendimiento de producción energética.

Se estudia la eficiencia energética producida del sistema fotovoltaico fijo y el sistema de fotovoltaico variable (seguidor solar).

En este ensayo se emplea un panel fotovoltaico de 65W y las instalaciones de estos sistemas se encuentran en la ciudad de Autlán de Navarro, México, con una ubicación geográfica de 19.7771° de latitud.

La duración de la prueba de energías generadas son 30 días, de 15 de febrero del 2017 a 15 de marzo de 2017. El resultado promedio de este periodo es que el sistema de fotovoltaico variables es 25.78% más eficiente que el sistema de fotovoltaico fijo (Pelayo López et al., 2018).



Gráfica 2 Ensayo de los sistemas fotovoltaicos durante 30 días (Pelayo López et al., 2018).

3. ESTADO DE ARTE

3.1. MÓDULO FOTOVOLTAICO

La tecnología más relevante de la célula fotovoltaica está constituido por arseniuro de galio. Este material es capaz de trabajar a elevada temperatura y menos pérdidas de energía producida (EDUTEL, 2008c, Capítulo 1). La eficiencia teórico del laboratorio en condición STC alcanza hasta $29.1 \pm 0.6\%$ (Green et al., 2022, tbl. 1).

3.2. SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA DEGRADACIÓN

En el apartado 1.5.1, según los cinco autores (Rúa-Ramírez et al., 2021), la curva IV del módulo fotovoltaico es la única forma de medir con precisión los parámetros eléctricos.

Mediante las mediciones de estos parámetros se pueden estudiar la degradación del panel fotovoltaico. En el apartado 2.4.3 y 2.4.4, adquirimos los conocimientos de los principales factores y modos de degradación de los paneles solares. Junto al apartado 2.4.5 sabemos el comportamiento de estos parámetros eléctricos según la degradación que sufre en el panel fotovoltaico.

3.3. SISTEMA DEL SEGUIDOR SOLAR

La tipología del seguidor solar debe de ser activo y de dos ejes (Acimut-Altitud) para la mayor captación de la radiación solar.

La estrategia o el algoritmo de seguimiento es aplicar la programación astronómica, es decir, conociendo la posición del sol mediante la ecuación solar. De esta manera, evitamos el problema de días nublados (Osorio-R., 2010).

El sistema de control se basa en microcontrolador Arduino, en la cual se introduce la ecuación solar en la programación y compilarlo en el Arduino. Después, en función del resultado de esta ecuación se determina la posición del sol y acciona sobre un motor para realizar la trayectoria del seguimiento solar (Balaguer-Zueco, 2016).

3.4. SISTEMA DE AUTOLIMPIEZA

Este sistema será una innovación propia, ya que hoy en día aún no existe ningún sistema de autolimpieza para los paneles solares. La



ideología del sistema se inspira en los limpiaparabrisas automáticas de los vehículos modernos, en la cual, la limpiaparabrisas barre la luna cuando los sensores de detectan la presencia del agua o suciedad.

En caso de la suciedad, durante el barrido de la limpiaparabrisas, la limpieza es acompañada por agua o producto químico de la limpieza a presión que ayuda a retirar la suciedad.

4. DESARROLLO

El desarrollo de este proyecto se fundamenta en los conocimientos recopilados de los análisis de los antecedentes y las revisiones del marco teórico. A través de estos conocimientos se determinan las tecnologías ideales, avanzadas y modernas (apartado 3) para el desarrollo del optimizador de paneles solares.

En la realidad, podemos aplicar todas estas tecnologías excepto la referente a los módulos que están compuestos por la célula fotovoltaica de arseniuro de galio. Esto es debido a que esta célula es poco común en el mercado y tiene un elevado coste. Por este motivo, el módulo fotovoltaico que se va a emplear en este proyecto es la célula de silicio monocristalino.

Se ha escogido el módulo fotovoltaico del fabricante ERA SOLAR, modelo ESPHSC 450M¹ (AutoSolar, 2023), cuya característica está reflejada en la Tabla 7.

Tabla 7 Las características eléctricas y mecánicas del módulo fotovoltaico

Característica eléctrica		Característica mecánica	
Potencia máxima de pico (W_p).	450w	Dimensión (L/W/H)	2094x1038x35mm
Tensión máxima ($V_{m\acute{a}x}$)	41.5V	Peso	24Kg
Intensidad máxima ($I_{m\acute{a}x}$)	10.85A	Protección	IP68
Tensión de circuito abierto (V_{oc}).	49.3V	Carga máx. de la nieve	5400Pa
Intensidad de corto circuito (I_{sc})	11.60A	Carga máx. del viento	2400Pa

Uno de los objetivos es la optimización de los paneles solares por sistema de seguimiento solar, con una superficie de panel de 25m².

Primero tenemos que conocer la sección individual del módulo fotovoltaico, S_{MF} :

$$S_{MF} = 2.094 \cdot 1.038 \approx 2.17m^2$$

¹ Se podría haber escogido cualquier otro módulo comercial para el desarrollo del TFG.

El número del módulo necesario, N_{MF} , es:

$$N_{MF} = \frac{25m^2}{N_{MF}} = \frac{25m^2}{2.17m^2} \approx 11.5 \rightarrow N_{MF} = 12$$

Y la masa total conjunta del módulo fotovoltaico, m_{MF} , es:

$$m_{MF} = 12 \cdot 24 = 288Kg$$

La aplicación del optimizador de paneles solares está conectada a la red eléctrica. Por lo que, se realiza conexiones en series con los 12 módulos fotovoltaicos del optimizador para obtener la tensión DC de salida adecuada para su transformación en AC.

Entonces, aplicando la ecuación 39, la tensión total, V_T , de salida:

$$V_T = 12 \cdot 41 = 498V$$

Y la intensidad de corriente total, I_T , se mantiene a 10.85A. Por lo tanto, la potencia total producida, P_T :

$$P_T = V_T \cdot I_T = 498 \cdot 10.85 = 5403.3W \approx 5,4KW$$

Por otro lado, el ámbito de la instalación se encuentra en un campo solar, de esta forma, se puede beneficiar de una única instalación común, como por ejemplo una estación meteorológica, las cajas de Strings, el sistema de inversores y un depósito de agua común. A continuación, se detalla estos componentes y sus funciones:

- La estación meteorológica es un conjunto de instrumentos que determinan los parámetros atmosféricos. Estos parámetros son: temperatura del aire y del suelo, humedad, presión barométrica, velocidad y dirección del viento, precipitaciones, nivel de UV, grosor de nieve, radiación solar, horas de luz, etc. (Abio Morales, 2019).
- Caja de String se emplea para agrupar las conexiones de los optimizadores de paneles fotovoltaico. Luego, se conecta en paralelo para enlazar al inversor.
- Inversor es un dispositivo que transforma los 498V DC en 498 AC
- El depósito de agua que suministra al sistema de autolimpieza a través de una bomba de agua. Por lo que, está equipado con un sensor de nivel de agua que rellenara automáticamente el depósito cuando este esté vacío.

No obstante, no profundizaremos estos componentes ya que la estación meteorológica es común para todos los optimizadores del campo solar. Por otro lado, la selección de la caja de String, el inversor y el depósito de agua pueden variar según las cantidades requeridas de los optimizadores y son más fácil de encontrar en el mercado.

El desarrollo de nuestro proyecto, se enfoca exclusivamente el diseño del sistema mecánico, eléctrico y control del optimizador de

paneles fotovoltaico por sistema de seguimiento solar y sistema de autolimpieza.

4.1. DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

El principal objetivo del sistema mecánico es establecer la estabilidad de la estructura y mantener el correcto funcionamiento del sistema.

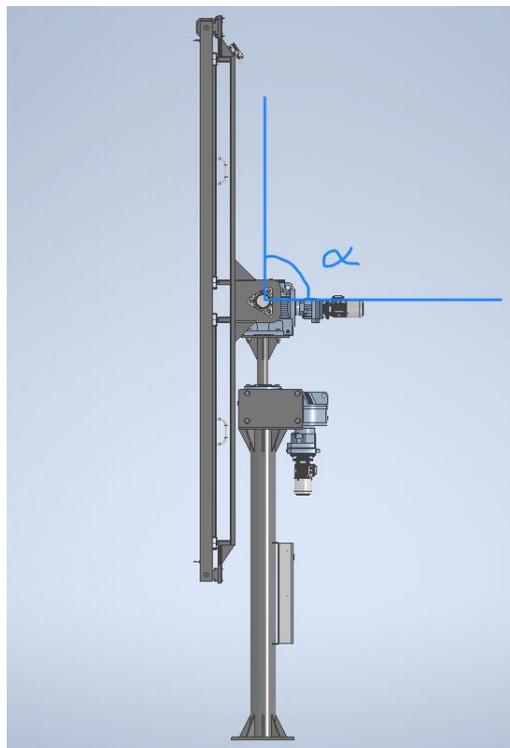
A pesar del propio peso de las estructuras de seguidor solar, el viento también es uno de los factores perjudicial para la estabilidad del sistema mecánico. Por lo que, se estudia la fuerza que ejerce el viento sobre los módulos fotovoltaicos.

Se emplea la ecuación 22 para el cálculo de la fuerza ejercida por el viento:

$$f_1 = P \cdot S \cdot \sin^2 \alpha$$

Considerando que la escala del viento es un viento duro, es decir, escala 8, a una velocidad de 68.4km/h (19m/s) de la Tabla 3. Con este dato llevamos a la Tabla 2, la presión, P , que ejerce es 221N/m².

Mientras la sección conjunto, S , de los paneles fotovoltaicos:



$$S = S_{MF} \cdot N_{MF} = 2.174 \cdot 12 = 26.08m^2$$

No obstante, esta fuerza varía según el ángulo de inclinación α a la que se encuentra los paneles solares.

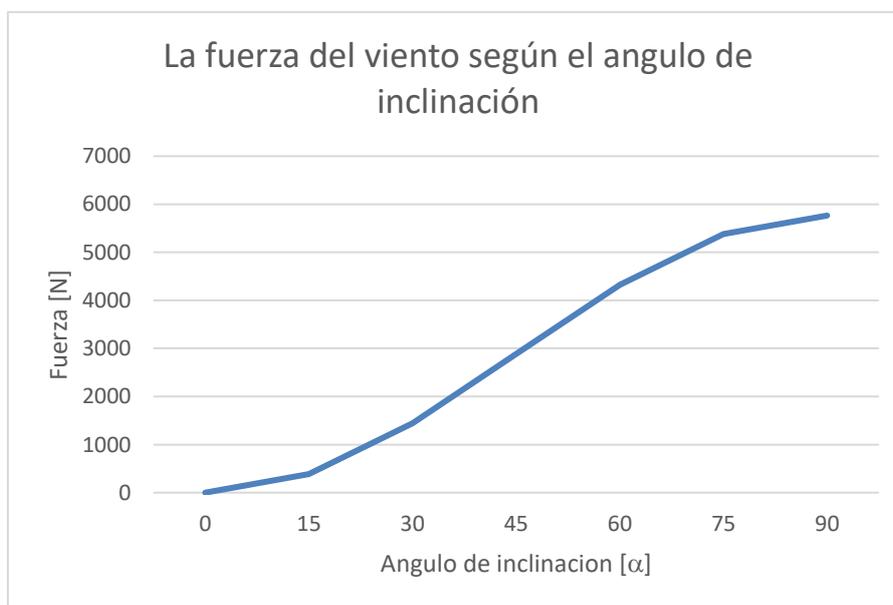
Ilustración 28 La variación de posición del módulo fotovoltaico según el ángulo de inclinación.

Por los cuales, se estudia la fuerza más desfavorable y en qué posición, o bien, a qué ángulo de inclinación se encuentra los módulos fotovoltaicos.

Tabla 8 Las fuerzas del viento según el ángulo de inclinación.

Ángulos de inclinación α	f_1 [N]
0	0
15	386,14
30	1441,08
45	2882,16
60	4323,23
75	5378,18
90	5764,31

Representando gráficamente los resultados de las fuerzas del viento de la Tabla 8:



Gráfica 3 Fuerza del viento

En la Gráfica 3, se puede observar que la fuerza del viento aumenta en función a la elevación del ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos. La fuerza del viento máxima que se debe soportar la estructura es 5764.31N cuando los paneles fotovoltaicos se encuentran a 90°. Y esta fuerza es nula cuando se encuentra a 0°. Con esto podemos concluir un sistema de seguridad o estabilidad para la estructura, es decir, cuando la velocidad del viento superan a los 68.4km/h, el controlador cambiara la posición de los paneles solares a 0°.

4.1.1. Estructura del seguidor solar

La construcción del prototipo del seguidor solar se ha realizado mediante el software Inventor Autodesk, Ilustración 29.



Ilustración 29 Prototipo optimizador de paneles solares

La estructura final del seguidor solar la podemos dividir en 4 partes fundamentales:

Tabla 9 Partes del seguidor solar

N.º de subconjuntos	Denominación
1	Bastidor
2	Soporte panel solar
3	Sistema de autolimpieza
4	Pedestal

4.1.1.1. Bastidor

El bastidor es el componente donde se ancla los paneles fotovoltaicos mediante las tornillerías. No obstante, en el plano no se puede identificar las perforaciones para las tornillerías porque se requiere una comunicación directa con los proveedores para determinar los puntos de unión precisos de los paneles fotovoltaicos.

El acoplamiento de los componentes del conjunto bastidor está unido mediante soldadura.

La colocación de este conjunto se realiza a través del deslizamiento del bastidor a lo largo del soporte módulo fotovoltaico.

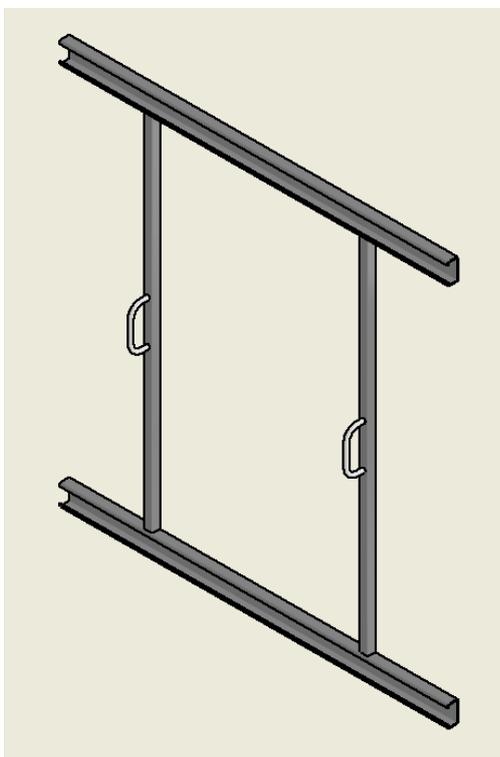


Ilustración 30 Subconjunto Bastidor - Prototipo

Los componentes que construyen el bastidor se muestra en la Tabla 10. Y en la carpeta de "Planos" se especificara con más detalle y las unidades necesarias.

Tabla 10 Los componentes del bastidor

DENOMINACIÓN					N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
Bastidor solar	-	Perfil	C		HierrosMoral	Acero S275JR
Bastidor solar	-	Tubo cuadrado	40x2,		HierrosMoral	Acero S275JR
			L=1800			

DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
Bastidor solar - Asas	ASAS en U-GN426 ELESA-GANTER	Acero S275JR

4.1.1.2. Soporte panel solar

El soporte panel solar, Ilustración 31, es la estructura mecánica más pesada del conjunto final del sistema de optimización.

En este subensamblaje se coloca el subconjunto bastidor con los módulos fotovoltaicos. Luego, el soporte solar está ligado con eje Altura Solar (eje paralelo respecto al suelo) que regula el ángulo de inclinación.

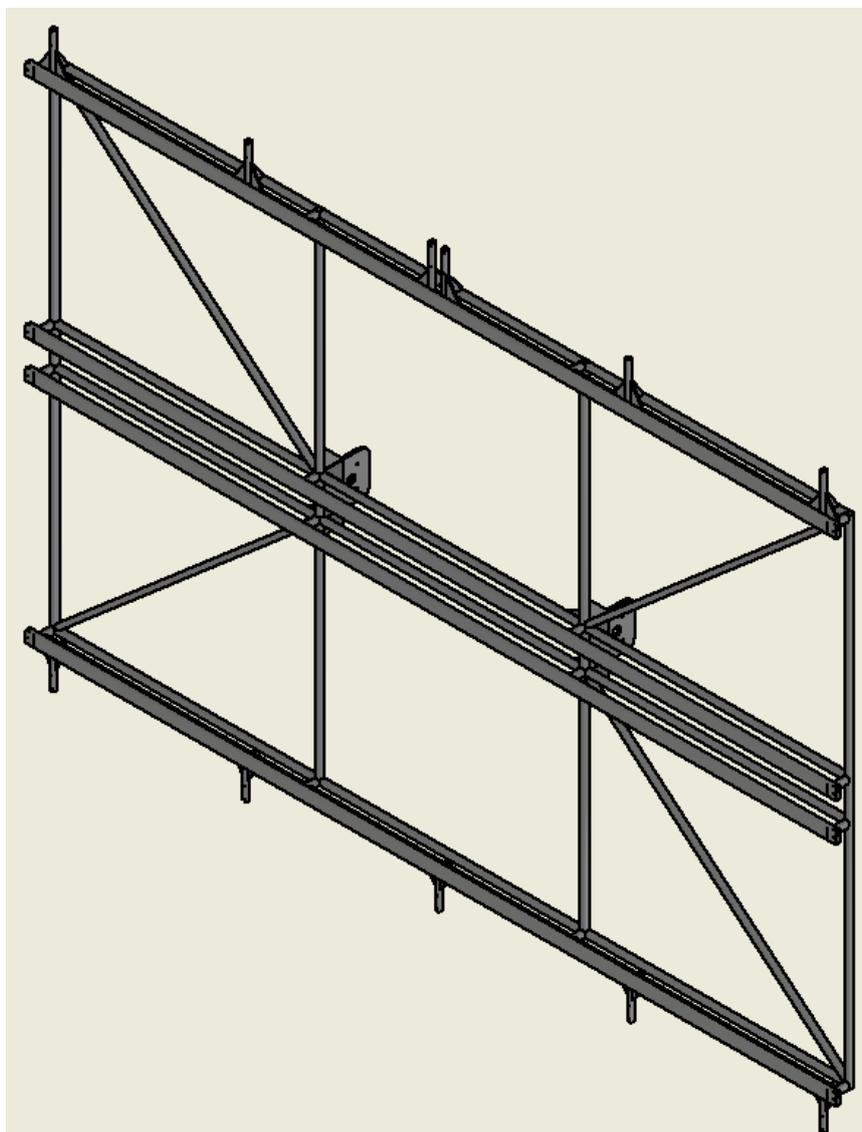


Ilustración 31 Subconjunto soporte panel solar - Prototipo

Las piezas de este subconjunto están unidas por la soldadura y se muestran en la Tabla 11. En dicha tabla, los elementos que se requieren fabricar son aquellos que no tienen proveedores y tiene su propia asignación, por ejemplo, el N.º de pieza/plano 424.23.01.03.00.07 y 424.23.01.03.01.01. En la carpeta de "Planos" se identifica correctamente el número de cada elemento y las cantidades necesaria.

Tabla 11 Los componentes del Soporte

DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
Refuerzo soporte motor limpiaparabrisas	424.23.01.03.00.02	Acero S275JR
Soporte motor limpia para brisa - Tubo cuadrado 40x2, L=330	424.23.01.03.00.01 HierrosMoral	Acero S275JR
Soporte Refuerzo - Tubo cuadrado 30x2, L=54	HierrosMoral	Acero S275JR
Soporte Refuerzo - Tubo cuadrado 40x2, L=2035	HierrosMoral	Acero S275JR
Soporte Refuerzo - Tubo cuadrado 40x2, L=2040	HierrosMoral	Acero S275JR
Soporte Refuerzo - Tubo cuadrado 40x2, L=3930	HierrosMoral	Acero S275JR
Soporte Refuerzo - Tubo cuadrado 40x2, L=2686.6	HierrosMoral	Acero S275JR
Soporte Guía - Tubo rectangular 90x40x3, L=6350	HierrosMoral	Acero S275JR
Soporte Guía - Tubo cuadrado 40x2, L=110	HierrosMoral	Acero S275JR
Soporte Eje - Base	424.23.01.03.02.01	Acero S275JR
Soporte Eje - Escuadra refuerzo	424.23.01.03.02.02	Acero S275JR
Soporte Rodamiento limpiaparabrisas - Tubo cuadrado 30x2, L=300	424.23.01.03.03.01 HierrosMoral	Acero S275JR

4.1.1.3. Sistema de autolimpieza

Se trata una limpieza autónoma de los módulos fotovoltaicos basadas en la ideología de las limpiaparabrisas automáticas de las carrocerías junto a un detector de suciedad.

Es decir, el funcionamiento del sistema de limpieza de este proyecto se realiza los barridos de las limpiaparabrisas sobre los paneles fotovoltaicos cuando detecta la presencia del agua (mediante un sensor de lluvia) o la suciedad (mediante el sistema de medición de la curva IV).

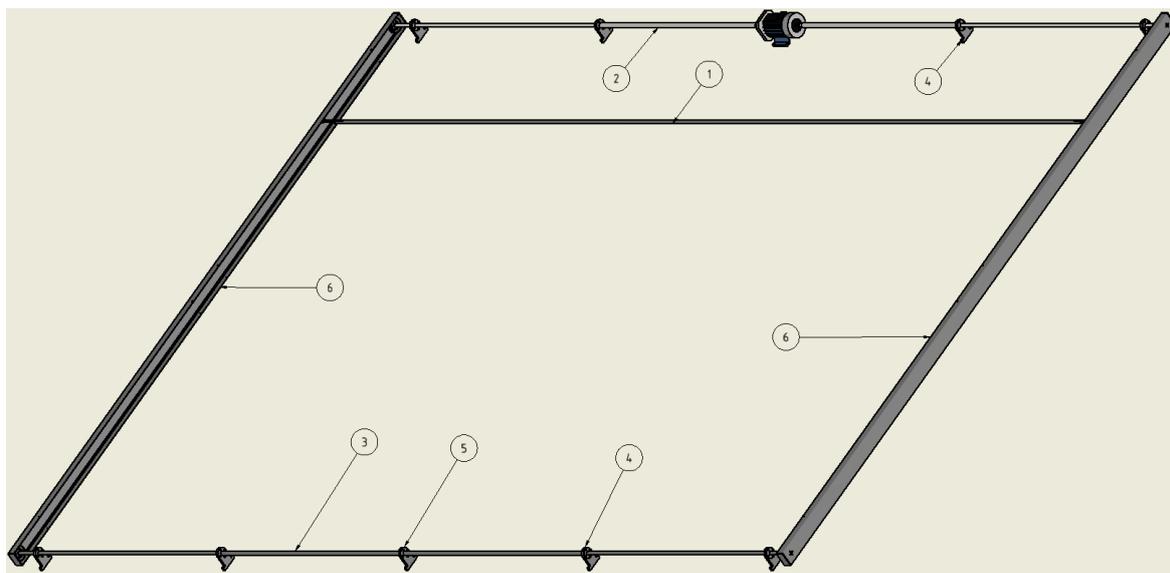


Ilustración 32 Prototipo del sistema de autolimpieza

La estructura de autolimpieza, Ilustración 32, se va dividir en varias partes, debido a que el conjunto final de todo de sistema de autolimpieza no se puede montar directamente a la estructuras anteriores (0 y 4.1.1.2), sino que se montara por partes, por las cuales, las dividiremos en varias partes como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12 Los componentes del sistema de autolimpieza

N.º DE ELEMENTOS	SUBCONJUNTO	N.º PLANO
1	Limpiaparabrisas	424.23.01.04.00.00
2	Sistema Autolimpieza - Superior	424.23.01.05.00.00
3	Sistema Autolimpieza - Inferior	424.23.01.06.00.00
4	Sistema Autolimpieza - Soporte eje	424.23.01.07.00.00
5	Sistema Autolimpieza - Soporte eje central	424.23.01.08.00.00
6	Sistema Autolimpieza - Protector	424.23.01.09.00.00
	Otras piezas	

4.1.1.3.1. Subconjunto limpiaparabrisas

Frente a las limpiaparabrisas de los vehículos, nuestro sistema es totalmente diferente. El conjunto de limpieza cubre los 6 metros de ancho del conjunto panel fotovoltaico y, en los extremos, están unidos a una pinza de correa para realizar el desplazamiento vertical.

En la Ilustración 33 se muestra el prototipo del sistema de limpieza. La parte más interesante de este sistema se encuentra en los laterales, mientras que el resto de la estructura está compuesto por los mismos elementos que sostiene la escobilla y mantiene su estabilidad durante el

barrido. Por lo que, se realizaremos un zoom a unos de los laterales con las enumeraciones de los elementos de composición del subconjunto de limpiaparabrisas y se muestra en la Tabla 13.

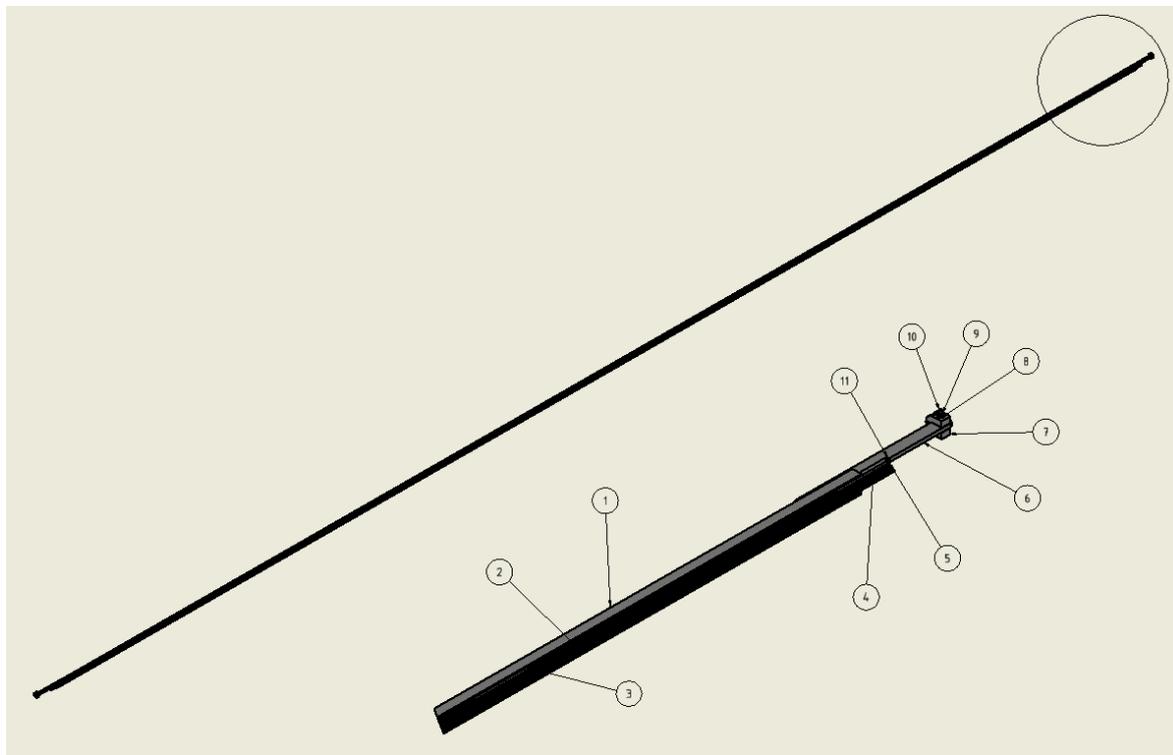


Ilustración 33 Subconjunto limpiaparabrisas

Además, este diseño protege la escobilla de goma frente a la radiación directa, lo cual, aumenta su vida útil.

También quiero añadir, aunque no aparece en el plano, este subconjunto contiene tubo PFA para la canalización del agua, la dimensión del tubo es una 1" (Rubber Fab, 2023), cumpliendo las característica de la bomba de agua (Corefluid, 2023).

Los elementos que requieren fabricación se muestran con el número de plano y se puede ver detalladamente en el Carpeta de "Planos".

Tabla 13 Los componentes del limpiaparabrisas

N.º DE ELEMENTOS	DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
1	Brazo escobilla - Perfil U 20x12x1.5	HierrosMoral L=6168	Acero S275JR
2	Escobilla limpiaparabrisas	Limpia-parabrisas.es	Caucho
3	Garra escobilla limpiaparabrisas	424.23.01.04.00.01	Acero S275JR
4	Garra lateral escobilla limpiaparabrisas	424.23.01.04.00.02	Acero S275JR

N.º DE ELEMENTOS	DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
5	Tapa garra limpiaparabrisas	424.23.01.04.00.03	Acero S275JR
6	Antebrazo Escobilla - Pletina PLE 12x4	424.23.01.04.00.04	Acero S275JR
7	Vinculador Antebrazo- Pinza correa	424.23.01.04.00.05	Acero S275JR

4.1.1.3.2. Sistema Autolimpieza – Superior

Este subconjunto, Ilustración 34, se instala en la parte superior de del conjunto y los elementos que constituye se muestra en la Tabla 14. El elemento de unión empleado son las tornillerías.



Ilustración 34 Prototipo sistema limpieza – superior

Los elementos que necesitan fabricar se muestran el número de plano y se puede consultar en la carpeta de "Planos". En este subconjunto debo mencionar que se emplea un motor de doble eje, diferente a los motores convencionales, de modo puede ejecutar la rotación de ambos eje al mismo tiempo, semejante velocidad y el par motor equivalente. También la polea tensora, en el propio mecanismo conlleva unos muelles que regular la tensión de la correa.

Tabla 14 Los componentes del subconjunto sistema autolimpieza superior

DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
Motor ABB IM1002-90S	Motor ABB	
Eje - Sistema Autolimpieza (Superior)	424.23.01.05.00.01	Acero S275JR
Polea Tensora	RSRA15-90-I0 Schaeffler	
Tapa Polea	424.23.01.05.00.02	Acero S275JR
Arandela plana	DIN 125-A5.3	Acero zincado
Tornillo de cabeza hexagonal	DIN 933 - M5x14	Acero zincado
Anillo elástico	DIN 471 - 15x1	Acero zincado
Chaveta rectangular	DIN 6885 - B5x5x12	Acero zincado

4.1.1.3.3. Sistema Autolimpieza – Inferior

En la Ilustración 35 se muestra el subconjunto inferior del sistema de autolimpieza, un eje conectado a las poleas que comportan como ruedas locas que transmiten el giro efectuado por el motor mediante las correas. El elemento de unión para este subconjunto también se emplea tornillerías.

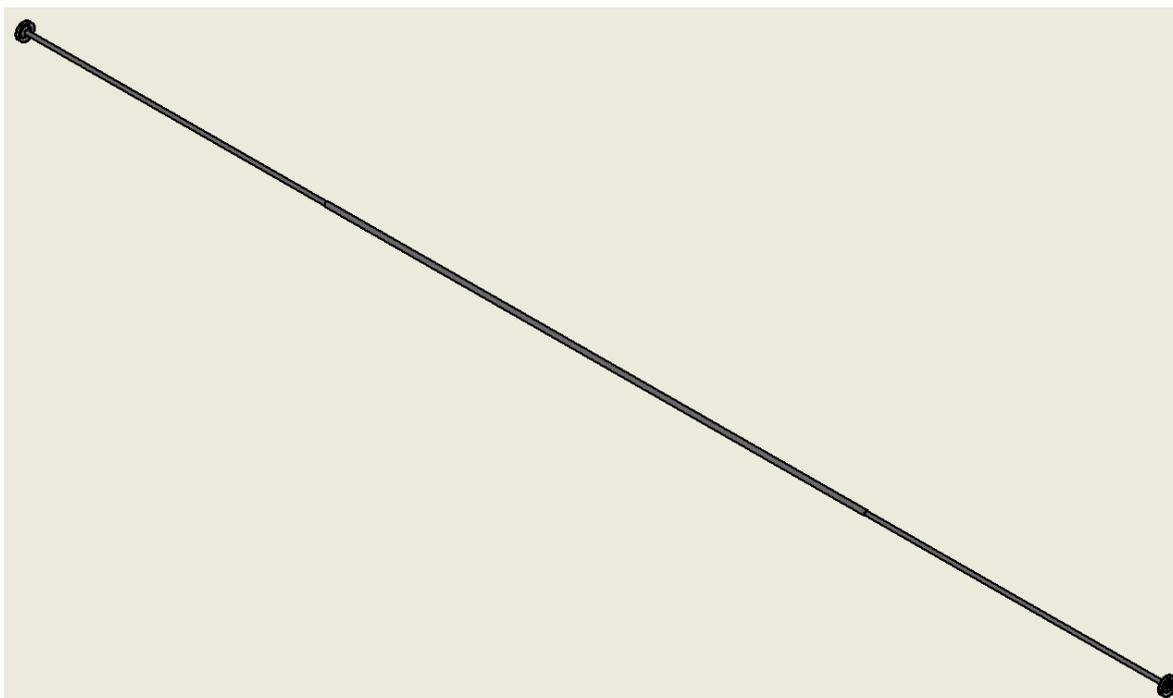


Ilustración 35 Prototipo sistema limpieza – inferior

Los elementos que componen este subconjunto, la Tabla 15, son similares al subconjunto superior. Puesto que el desplazamiento de la limpiaparabrisas sobre los módulos fotovoltaico es un superficie plano y no inclinado, lo cual, estas poleas ejercerán la velocidad que conlleva la polea superior.

Tabla 15 Los componentes del subconjunto sistema autolimpieza inferior

DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
Eje - Sistema Autolimpieza (Inferior)	424.23.01.06.00.01	Acero S275JR
Polea Tensora	RSRA15-90-I0 Schaeffler	
Tapa Polea	424.23.01.05.00.02	Acero S275JR
Arandela plana	DIN 125-A5.3	Acero zincado
Tornillo de cabeza hexagonal	DIN 933 – M5x14	Acero zincado
Anillo elástico	DIN 471 – 15x1	Acero zincado
Chaveta rectangular	DIN 6885 – B5x5x12	Acero zincado

4.1.1.3.4. Sistema Autolimpieza – Soporte eje y soporte eje central

Estos subconjuntos se instalan en el soporte (4.1.1.2), cuya misión es evitar la flexión que se produce en los ejes, tanto el en parte superior como en el inferior. Esto es debido a que estos ejes son longitudinalmente largos.

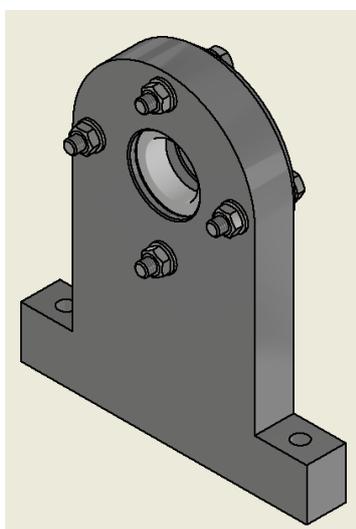


Ilustración 36 Prototipo sistema limpieza – Soporte eje y soporte eje central

La diferencia entre soporte eje central y soporte eje es la dimensión del agujero pasante, el primero es mayor que segundo. El soporte eje central se instala únicamente en el punto céntrico del parte inferior a causa de que la zona céntrica del eje inferior posee mayor diámetro que los extremos. Está diseñado de esta manera para poder acoplar directamente y sencillamente al rodamiento que conllevan estos subconjuntos, lo que permite reducir la carga y el correcto funcionamiento de las poleas.

Tabla 16 Los componentes del subconjunto sistema autolimpieza – soportes ejes

SUBC.	DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
Soporte eje	Soporte rodamiento eje	424.23.01.07.00.01	Acero S275JR
	Rodamiento rígido de bola	SKF - 16004	
Soporte eje central	Soporte rodamiento eje	424.23.01.08.00.01	Acero S275JR
	Rodamiento rígido de bola	SKF - 16004	
Ambos subconjuntos	Tapa rodamiento	424.23.01.07.00.02	Acero S275JR
Tornillerías	Arandela plana	DIN 125-A5.3	Acero zincado
	Tornillo de cabeza hexagonal	DIN 933 – M5x28	Acero zincado
	Tuerca	DIN 934 – M5	Acero zincado

4.1.1.3.5. Sistema Autolimpieza – Protector

La misión de este subconjunto es proteger las radiaciones solares sobre las correas de transmisión. Puesto que la correa está compuesto de polímeros y este material se degrada rápidamente por el calor y la radiación UV.

De esta forma, el protector evita o reduce estos problemas y aumenta la vida útil de la correa.

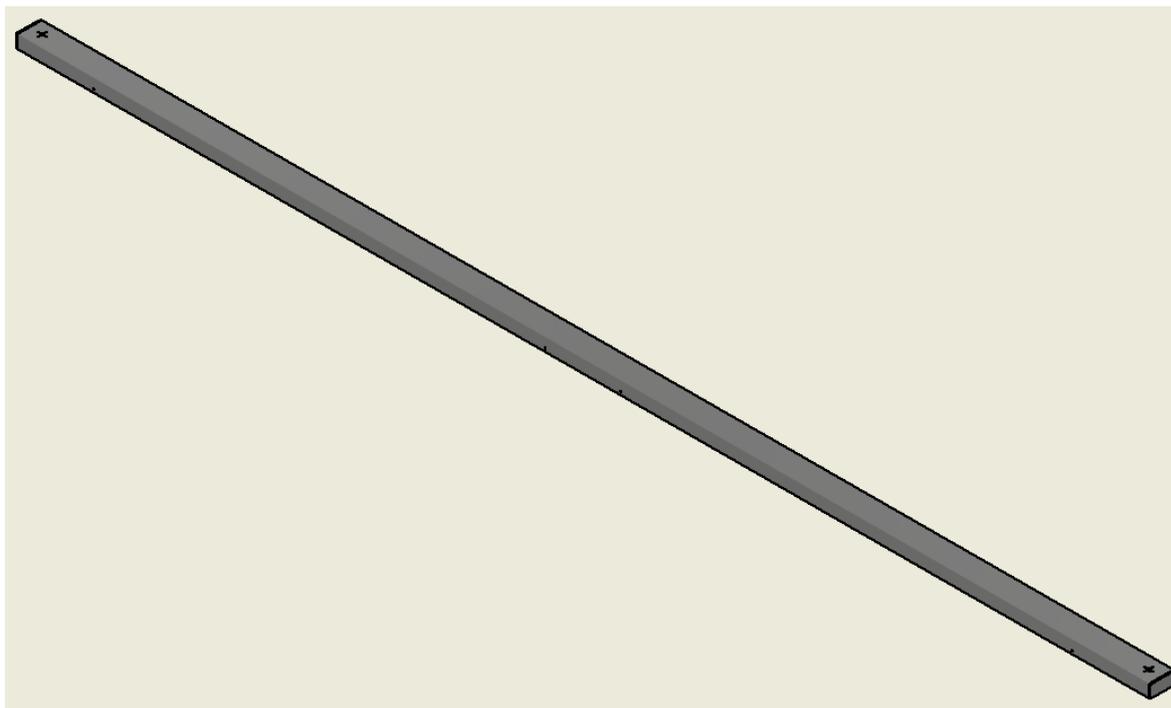


Ilustración 37 Prototipo sistema limpieza - Protector

El compuesto de este subconjunto es sencilla, en la Tabla 17 se muestra elementos de subensamblaje

Tabla 17 Los componentes del subconjunto Protector

DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
Protector sistema autolimpieza - Perfil U 100x50x1.5, L=4398	424.23.01.09.00.01 HierrosMoral	Acero S275JR
Tapa protector autolimpieza	424.23.01.09.00.02	Acero S275JR

4.1.1.3.6. Otras piezas

En la Ilustración 38 se muestra otras piezas del sistema de autolimpieza. Se trata de dos componentes, la correa que une el subconjunto superior e inferior del sistema de autolimpieza a través de las poleas tensoras. Mientras, la pinza está agarrada en la correa y ligada con el subconjunto limpiaparabrisas.

Entonces, la acción del motor de doble del subconjunto superior de sistema de autolimpieza tramitará movimiento a la correa a través de la p Polea tensora y arrastra la pinza de agarre, lo cual, trasportara el subconjunto limpiaparabrisas.

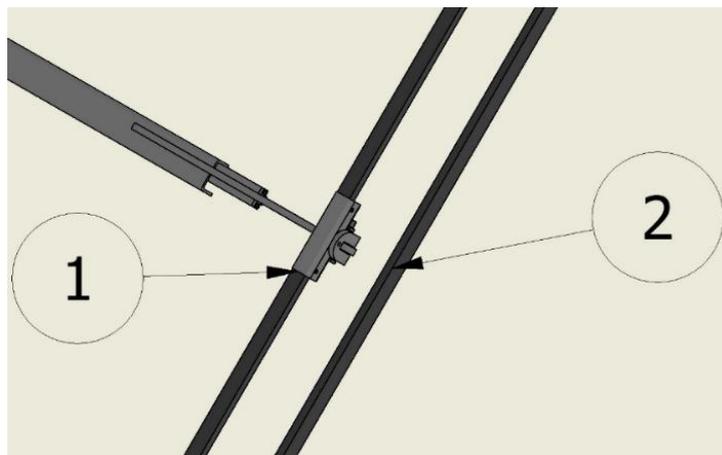


Ilustración 38 Otras piezas del sistema de autolimpieza

En la Tabla 18 aparece las otras piezas del subconjunto del sistema autolimpieza.

Tabla 18 Otras piezas del sistema de autolimpieza

N.º DE ELEMENTOS	DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
1	Correa trapezoidal, L=9.05m	Optibelt - Perfil SPZ	Caucho
2	Pinza Correa Trapezoidal	424.23.01.09.00.02	Acero S275JR

4.1.1.4. Pedestal

La finalidad del pedestal es resistir todo el peso de los subconjuntos anteriores (apartado 4.1.1.1, 4.1.1.2 y 4.1.1.3) del seguidor solar y mantener la estabilidad.

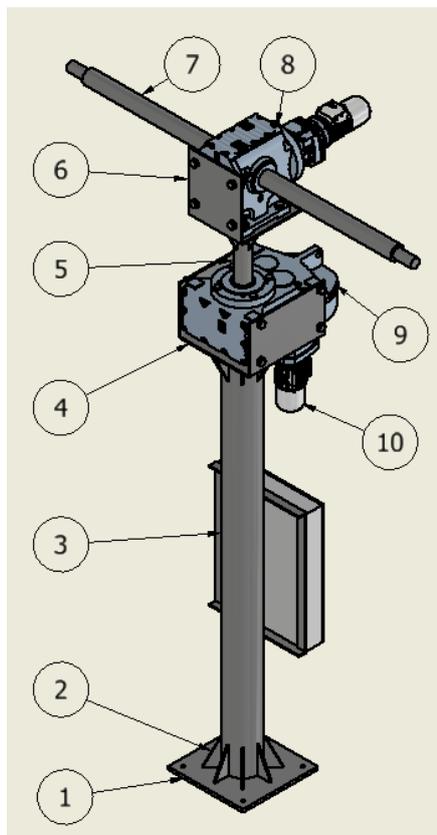


Ilustración 39 Subconjunto pedestal

Los componentes de este subconjunto de muestra en la Tabla 19y los detalles de estas piezas en la carpeta de "Planos".

Tabla 19 Los componentes del subconjunto Pedestal

N.º DE ELEMENTOS	DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
1	Base inferior	424.23.01.10.00.01	Acero S275JR
2	Escuadra refuerzo Pedestal	424.23.01.10.00.02	Acero S275JR
3	Cuerpo - Tubo redondo 200x3	HierrosMoral L=2500	Acero S275JR
4	Base superior	424.23.01.10.00.03	Acero S275JR
5	Eje - Acimut Solar	424.23.01.10.00.04	Acero S275JR
6	Soporte Motor- Reductor Inclinación	424.23.01.10.00.05	Acero S275JR
7	Eje - Altura Solar	424.23.01.10.00.06	Acero S275JR
8	Reductor de tornillo sin fin	SEW-EURODRIVE S97pR57AMS71g	

N.º DE ELEMENTOS	DENOMINACIÓN	N.º DE PIEZA/ PLANO - PROV.	MAT.
9	Reductor paralelo	SEW-EURODRIVE FA107BR77AMS71	
10	Motor Asíncrono - IM3001 71B5	Motor ABB	
11	Soporte CE - Pletina PLE 50x6	424.23.01.10.00.07	Acero S275JR
12	Soporte CE - Pletina PLE 50x6	HierrosMoral, L=800	Acero S275JR
13	Cuadro eléctrico		
14	Chaveta paralela	DIN 6885 - A25x14x200	Acero zincado
15	Tuerca hexagonal	DIN 934 - M8	Acero zincado
16	Arandela	DIN 125 - A 8,4	Acero zincado
17	Perno de cabeza- hexagonal	DIN 933 - M8x40	Acero zincado
18	Arandela	DIN 125 - A25	Acero zincado
19	Tuerca hexagonal	DIN 934 - M24	Acero zincado
20	Perno de cabeza- hexagonal	DIN 933 - M24x55	Acero zincado
21	Perno de cabeza- hexagonal	DIN 933 - M24x95	Acero zincado

La estructura del pedestal está formado por los 4 primeros componentes de la Tabla 19. No obstante, en dicha la tabla y la Ilustración 39, también tenemos otros elementos como motores, reductores, ejes, etc. Hemos hechos de esta forma para facilitar los procedimientos posteriores, por ejemplo, en el montaje.

En la Ilustración 39 podemos observar que hay dos ejes: Acimut Solar (Piezas 5 de la Tabla 19) y Altura Solar (Piezas 7 de la Tabla 19).

El eje Acimut Solar (eje perpendicular respecto al suelo) se emplea para regular el giro del seguidor solar. Este eje se coloca en el reductor de eje paralelo y es capaz de soportar todo el peso del seguidor solar. Además, este está ligado a un soporte que se fija el reductor de doble eje. Mientras, el eje Altura Solar (eje paralelo respecto al suelo) sirve para variar la inclinación del seguidor solar. Se coloca en el reductor de doble eje y en él se acopla el soporte solar.

4.1.2. Cálculo y selección del motor y reductor

El par motor, momento de fuerza o torque, τ , es la principal propiedad mecánica para la selección del motor, es la fuerza o sistema de fuerza para cambiar el estado de la rotación del cuerpo alrededor de un eje. (Tipler & Mosca, 2010, pp. 259, 260).

$$\tau = F \cdot r = I \cdot \omega \quad 47$$

Y la potencia del motor sería, P :

$$P = \tau \cdot \omega = \tau \cdot \frac{v}{r} = F \cdot v \quad 48$$

Donde:

F : fuerza [N].

r : radio del elemento de transmisión [m].

I : Momento de inercia [kg·m²].

ω : Velocidad angular [Rad/s].

v : velocidad lineal [m/s].

Otro parámetro importante es la velocidad. No obstante, los catálogos comerciales generalmente emplean la unidad técnica, revolución por minuto (rpm) y nos interesa conocer la velocidad lineal de unidad de sistema internacional. Por lo que, de la ecuación 48, se puede deducir que la velocidad lineal es:

$$\omega = \frac{v}{r} \rightarrow v = \omega \cdot r$$

Por otro lado, el factor de conversión de rpm a velocidad angular:

$$n \cdot \text{rpm} = \frac{n \cdot \text{vuelta}}{\text{min}} \cdot \frac{2\pi}{\text{vuelta}} \cdot \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = n \cdot \frac{\pi}{30} \text{rad/s}$$

Donde n es el número de rpm.

Entonces la velocidad lineal quedara definido como:

$$v = \omega \cdot r = n \cdot \frac{\pi}{30} \cdot r = [m/s] \quad 49$$

En general, estos parámetros vienen dado con unos valores predeterminado por los fabricantes. Para obtener los valores de los parámetros requeridos o aproximados se emplean la relación de transmisión, i :

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{Z_e}{Z_s} = \frac{D_e}{D_s} = \frac{M_e}{M_s}$$

50

Donde:

ω_e : velocidad angular de la rueda entrada.

ω_s : velocidad angular de la rueda salida.

Z_e : n.º de dientes de la rueda entrada.

Z_s : n.º de dientes de la rueda salida.

D_e : diámetro de la rueda entrada.

D_s : diámetro angular de la rueda salida.

M_e : momento de la rueda entrada.

M_s : momento de la rueda salida.

La dificultad de esta expresión es encontrar los mecanismos que tienen la relación de transmisión adecuadas para optar el parámetro de salida óptima. (Ingenierizando, 2022).

4.1.2.1. Sistema de autolimpieza

En nuestro proyecto, el conjunto del sistema de autolimpieza se desliza sobre los módulos fotovoltaicos que varían su ángulo de inclinación según la posición del ángulo altura solar, mejor dicho, el comportamiento de un cuerpo sobre un plano inclinado cuyo el ángulo de inclinación es variable. Por esta razón, se estudia la situación más desfavorable del conjunto del sistema de autolimpieza. La dificultad es cuando se realiza desplazamiento hacia la parte superior del plano inclinado porque entra en juego de la gravedad, y por lo tanto, esta es la fuerza mínima, F , que ejerce el motor, como se muestra en la Ilustración 40.

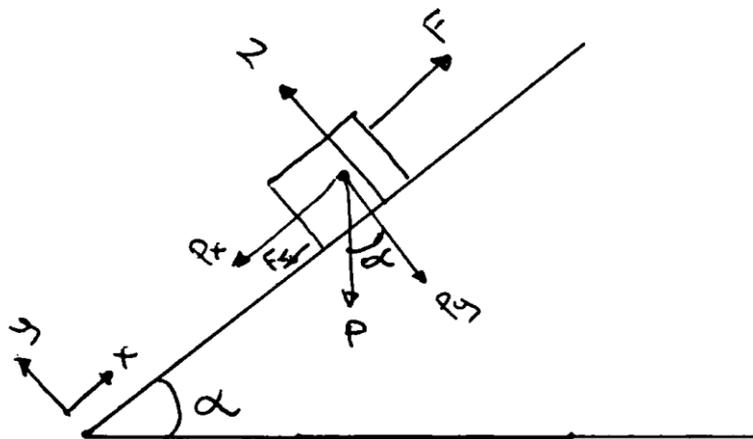


Ilustración 40 Diagrama de las fuerzas de un cuerpo en un plano inclinado

Los elementos de la Ilustración 40 son:

F : fuerza mínima requerida del motor.

P : peso del conjunto de autolimpieza.

F_r : fuerza de rozamiento.

N : fuerza normal.

α : ángulo de inclinación.

Por otro lado, considero que la velocidad de limpieza o barrido es constante. Entonces, la aceleración es nula, lo cual, toda la fuerza que desplaza el sistema de autolimpieza será ejercida por el motor. Y por lo tanto, cumple la Primera Ley de Newton "Principio de inercia" (Tipler & Mosca, 2010):

$$\sum F = 0$$

El equilibrio de las fuerzas en eje abscisa y ordena:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F = F_r + P_x = F_r + P \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow N = P_y = P \cdot g \cdot \cos \alpha$$

La definición de la fuerza de rozamiento es:

$$F_r = N \cdot \mu$$

Donde μ es el coeficiente de fricción que depende entre los materiales que se deslizan. El coeficiente de fricción estático entre caucho y vidrio es 0.9, mientras el dinámico es 0.75 (力学 Nerd 王小胖, 2020).

Entonces la fuerza mínima que requiere el motor es:

$$F_m = P_x + F_r = P \cdot g \cdot \sin \alpha + N \cdot \mu = P \cdot g \cdot \sin \alpha + N \cdot \mu$$

$$N = P_y = P \cdot g \cdot \cos \alpha \quad 51$$

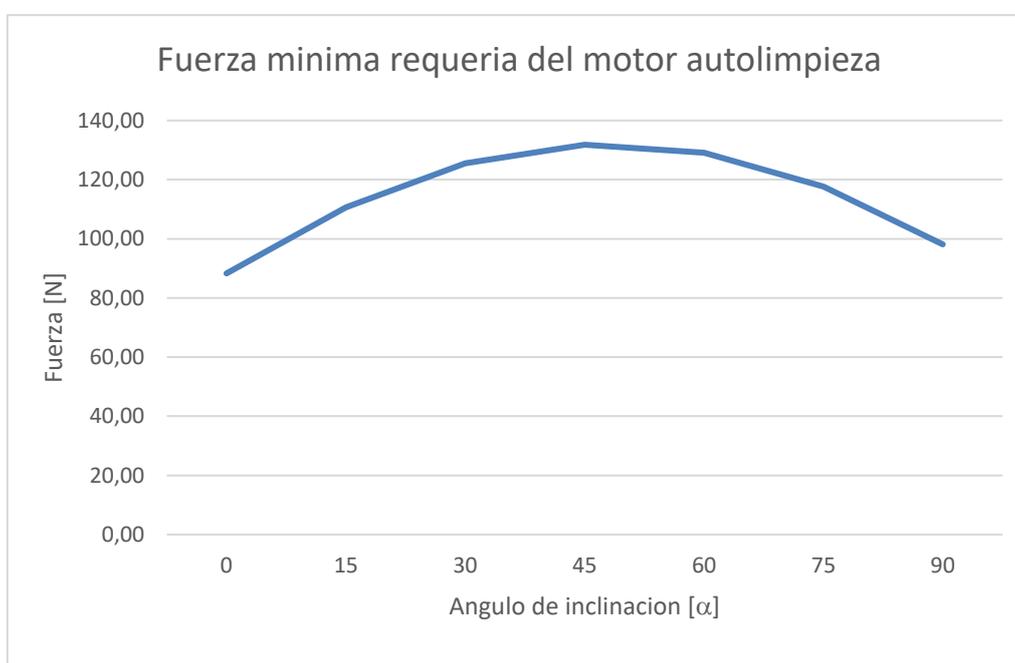
$$F_m = P \cdot g \cdot \sin \alpha + P \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \mu$$

Ahora con la expresión 51, procedemos el cálculo de la fuerza necesaria para la selección del motor con los principales datos de nuestro sistema de autolimpieza:

- Masa total del sistema de autolimpieza: $m = 10Kg$
- Gravedad: $g = 9.81 m/s^2$
- Coeficiente de fricción: $\mu = 0.9$
- Radio de la pulea transmitido por el motor: $r = 45mm$
- Velocidad constante: $v = 1 m/s$

Tabla 20 Fuerza mínima requerida según el ángulo de inclinación.

α	P_x [N]	F_r [N]	F_m [N]
0	0.00	88.29	88.29
15	25.39	85.28	110.67
30	49.05	76.46	125.51
45	69.37	62.43	131.80
60	84.96	44.15	129.10
75	94.76	22.85	117.61
90	98.10	0.00	98.10



Gráfica 4 Representación gráfico de la Tabla 20

En la Gráfica 4 se puede observar, el pico máx. de la función (ecuación 51) se encuentra en una inclinación de 45°, cuyo el valor de la fuerza, Tabla 20, es de 131.80N. Esta fuerza representa el requisito mínimo de funcionamiento adecuado del sistema de autolimpieza. Con esta fuerza se determina el par motor y la potencia requerida, expresión 47 y 48:

$$\tau = F \cdot r = 131.8 \cdot 0.045 = 5.93Nm$$

$$P = F \cdot v = 131.8 \cdot 1 = 131.8W$$

El motor más apropiado para este sistema, ya mencionado en el apartado 4.1.1.3.1, es emplear el motor asíncrono de doble. El proveedor de este componentes es Motor ABB (Grupo ABB, 2023) cuya característica esta refleja en la Tabla 21.

Tabla 21 Características del motor del sistema de autolimpieza

Motor de doble eje		Modelo: IM 1002 90S	
Característica eléctrica		Característica mecánica	
Tensión	400V/50H	N.º de polos	4
Potencia [KW]	1.1	Par [Nm]	7.5
Factor de potencia (φ)	0.76	Rpm [n]	1500
Intensidad [A]	2.6	Peso [Kg]	13

Las propiedades del motor se muestran en la Tabla 21 y cumple todos los requisitos mínimos. No obstante, la velocidad nominal de motor no logra la velocidad lineal requerida:

$$v = 1500 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 0.045 \approx 7.07m/s$$

Para poder obtener la velocidad adecuada, configuraremos el motor para que trabaje a 215 rpm a través de la regulación del variador de frecuencia de tensiones:

$$v = 215 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 0.045 \approx 1.01m/s$$

La ventaja de los motores asíncronos es que al reducir su velocidad de funcionamiento nominal a través del variador de frecuencia de tensiones, el par motor y la potencia se mantiene constante.

4.1.2.2. Ángulo Acimut Solar – Giro

La misión de este motor es ajustar el ángulo Acimut Solar, es decir, el movimiento giratorio que persigue la trayectoria del Sol (de amanecer a anochecer).

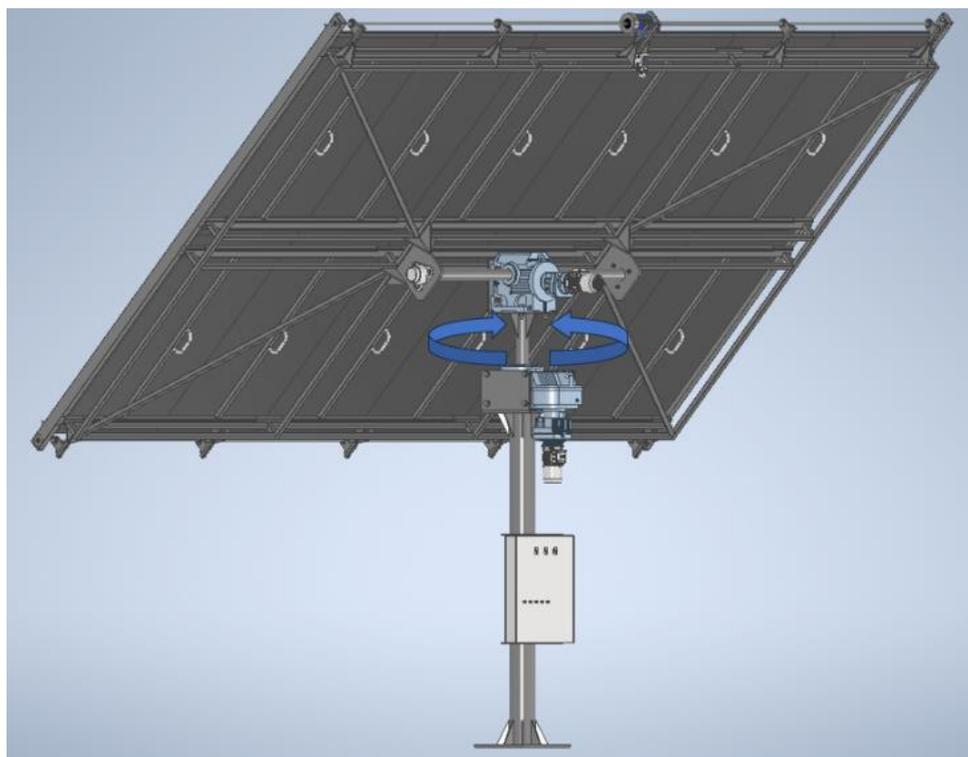


Ilustración 41 Movimiento giratorio de los paneles fotovoltaicos

En nuestro sistema, superpongo que el ángulo máximo de giro que se va a proceder es 180° y tarda 5 min. en realizar este movimiento. Por lo que, la velocidad angular máxima de este movimiento es:

$$rpm_{(180^\circ)} = \frac{1}{2} \text{ vueltas} \cdot \frac{1}{5 \text{ min}} = 0.1 \rightarrow n = 0.1 \text{ rpm}$$

En este diseño, el eje de giro está conectado indirectamente al motor mediante reductor de eje paralelo que favorece la velocidad de giro apropiada.

Este eje se coloca en el punto céntrico del conjunto estructural del panel fotovoltaico, por lo tanto, no influye la fuerza del viento. Esto es debido a que la fuerza del viento se aplica de forma proporcional en toda la superficie de la estructura, es decir, las presiones ejercidas en un punto respecto a su punto simétrico son las mismas. Entonces, según la I ley de Newton, el sumatorio de las fuerzas es nula ($\sum F = 0$), dicho de otra manera, el par aplicado por el viento es nulo. Además, siendo un movimiento de giro lento, esta fuerza no tiene gran influencia para el cálculo de fuerza del motor.

Para calcular el torque requerido del motor se basa en determinar el momento de inercia, I , de la ecuación 47. La forma de la estructura es similar a un "paralelepípedo sólido rectangular respecto a un eje que pasa por el centro perpendicular a la cara" (Ilustración 42), entonces la expresión para calcular el momento de inercia es (Tipler & Mosca, 2010, p. 254):

$$I = \frac{1}{12} \cdot M(a^2 + b^2) = [kg \cdot m^2] \quad 52$$

Donde:

M : masa de la estructura [Kg] ($M=1225.367\text{kg}$).

a : altura de la estructura [m] (4.188m).

b : anchura de la estructura[m] (6.288m).

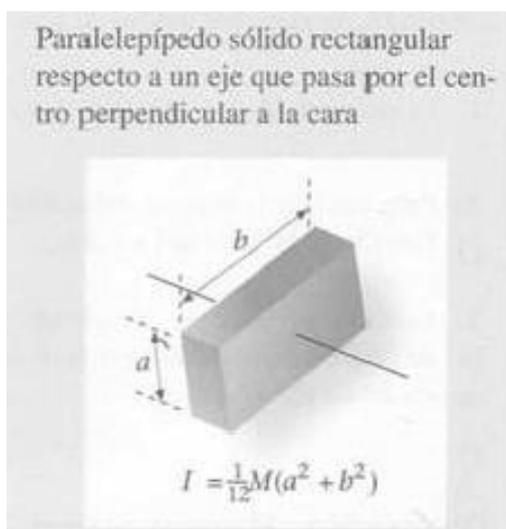


Ilustración 42 Momento de inercia de un paralelepípedo (Tipler & Mosca, 2010, p. 254)

Entonces, el procedimiento de cálculo del torque y la potencia del motor sería:

$$I = \frac{1}{12} \cdot 1225,367(4.188^2 + 6.288^2) \approx 5751.804 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\tau = I \cdot \omega = I \cdot n \cdot \frac{\pi}{30} = 5751.804 \cdot 0.1 \cdot \frac{\pi}{30} \approx 60.23 \text{ Nm}$$

$$P = \tau \cdot \omega = \tau \cdot d \cdot n \cdot \frac{\pi}{30} = 60.23 \cdot 0.1 \cdot \frac{\pi}{30} \approx 0.63 \text{ W}$$

El motor seleccionado es un motor asíncrono trifásico del fabricante Motor ABB (Grupo ABB, 2023), Ilustración 43, cuya característica está reflejada en la Tabla 22.

Tabla 22 Características del Motor ABB

Motor	Modelo: M3AA 71- IM3001/IMB5		
Característica eléctrica	Característica mecánica		
Tensión	400V/50H	N.º de polos	8
Potencia [KW]	0.09	Par [Nm]	1.3
Factor de potencia (φ)	0.57	Rpm [n]	750
Intensidad [A]	0.5	Peso [Kg]	5.5

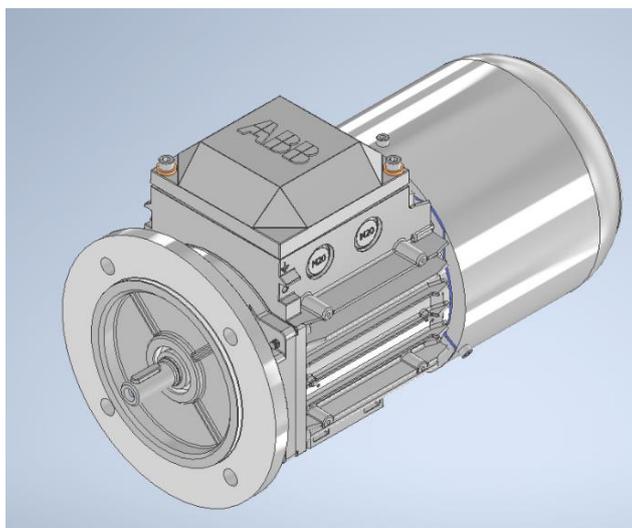


Ilustración 43 Motor ABB IM3001/IMB5 - M3AA71

Por otro lado, para que el seguidor solar pueda optar la velocidad angular requerida se necesita un reductor. Para nuestro diseño, he seleccionado el reductor de eje paralelo del fabricante SEW EURODRIVE, cuyas características se refleja en la Ilustración 44.

Información del producto



Descripción de catálogo

FA107BR77AMS71

Reductores de ejes paralelos F + Reductores de engranajes cilíndricos R

Datos de producto

Velocidad	[1/min] : 1400 / 0,77
Índice de reducción total	: 1813,00
Par de salida Mamax	[Nm] : 7840
Posición de montaje	: M2
Pintura imprimación/CapaFinal	: 7031 Gris azulado (51370310)
Eje hueco	[mm] : 90
Tipo de diseño	: Reductor con patas, con eje hueco
Agujero del lado de entrada(D1 x L1)	[mm] : 14 x 30
Adaptador del diámetro de brida (G5)	[mm] : 160
Cantidad de lubricante 1er reductor	[Litro] : 32
Cantidad de lubricante 2º reductor	[Litro] : 2,9
Momentos de inercia de masa (en [10 ⁻⁴ kgm ²]: referencia al lado de entrada)	: 1,95
Peso	[kg] : 295,00



Características adicionales

Estandar

Rodamientos reforzados: Sin

Material Retén de aceite Adaptador NORMAL (Estandar)

Ilustración 44 Reductor de eje paralelo

Para garantizar los requisitos mínimos del funcionamiento, el motor trabajará a una velocidad de 180rpm. A pesar de reducir la velocidad de funcionamiento nominal, el par motor y la potencia se mantiene constante mediante la regulación de un variador de frecuencia de tensiones. Entonces, aplicando expresión 50:

El velocidad de salida es:

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_e} \rightarrow \omega_s = \omega_e \cdot i = 180 \cdot \frac{1}{1813} = 0.9928\text{rpm} \approx \mathbf{0.1\text{rpm}}$$

Mientras el par de salida es:

$$i = \frac{M_e}{M_s} \rightarrow M_s = \frac{M_e}{i} = \frac{1.3}{\frac{1}{1813}} = \mathbf{2356.9Nm}$$

Como resultado, logramos tener la velocidad ideal de salida. Por contrario, el par de salida es mucho mayor al par mínimo necesario (casi 40 veces más). Al tener una diferencia de par tan elevado, eje puede producir falla. Por lo tanto, en el apartado 4.1.3.2, se realiza el análisis de falla del eje.

4.1.2.3. Ángulo Altura Solar – Inclinación

El propósito de este motor es ajustar el ángulo altura solar, dicho de otra manera, el ángulo de inclinación óptimo respecto al suelo, Ilustración 28.

La variación máxima del ángulo de inclinación es de 90° y tarda 30s en proceder este movimiento, por lo que, la velocidad angular máxima de desplazamiento es:

$$rpm_{(90^\circ)} = \frac{1}{4} \text{ vueltas} \cdot 30\text{seg} \cdot \frac{1\text{min.}}{60\text{seg}} = 0.125 \rightarrow n = 0.125\text{rpm}$$

En este diseño, el motor está acoplado a un reductor de tornillo sin fin de doble eje. De este modo, el reductor será el punto céntrico que se conecta al eje de giro (ángulo acimut Solar), lo cual mantiene el equilibrio del conjunto de paneles fotovoltaicos y la estructura soporte, y por lo tanto, evita la fuerza del viento. Por otro lado, las salidas del reductor se enlaza a un eje que unen al dicho conjunto.

La fuerza que debemos tener en cuenta para esta variación es el peso del conjunto módulos fotovoltaicos y la estructura soporte que tiene que resistir el eje, $F=932.286\text{kg}=9145.7257\text{N}$. Luego, la distancia, d , desde el centro de gravedad en la situación más desfavorable cuando los paneles se encuentran perpendicular respecto al suelo, es decir, en posición vertical a 90° respecto al suelo. Y esta distancia es

aproximadamente de 415mm, entonces el torque y la potencia requerida son:

$$\tau = F \cdot d = 9145.7257 \cdot \frac{415}{1000} \approx 3795.48Nm$$

$$P = \tau \cdot \omega = \tau \cdot d \cdot n \cdot \frac{\pi}{30} = 3795.48 \cdot \frac{415}{1000} \cdot 0.125 \cdot \frac{\pi}{30} \approx 20.62W$$

El motor seleccionado es el mismo del apartado anterior, 4.1.2.2, del fabricante Motor ABB con las características de la Tabla 22.

También se emplea un reductor apropiado para adaptar a la velocidad angular. Se trata de un reductor de tornillos sin fin de doble eje del fabricante SEW EURODRIVE, cuyas características se refleja en la Ilustración 45.

Información del producto



Descripción de catálogo

S97pR57AMS71

Reductores de tornillo sin fin S + Reductores de engranajes cilíndricos R

Datos de producto

Velocidad	[1/min] : 1400 / 0,45
Índice de reducción total	: 3108,00
Par de salida Mamax	[Nm] : 4300
Posición de montaje	: M1AB
Pintura imprimación/CapaFinal	: 7031 Gris azulado (51370310)
Eje de salida	[mm] : 70x140
Tipo de diseño	: Diseño con patas
Agujero del lado de entrada(D1 x L1)	[mm] : 14 x 30
Adaptador del diámetro de brida (G5)	[mm] : 160
Cantidad de lubricante 1er reductor	[Litro] : 6,8
Cantidad de lubricante 2º reductor	[Litro] : 0,8
Momentos de inercia de masa (en [10 ⁻⁴ kgm ²] referencia al lado de entrada)	: 0,79
Peso	[kg] : 173,00



Características adicionales

Eje de salida: 70x140 mm

Rodamientos reforzados: Sin

Ejecución por patas con 2 ejes de salida

Lubricante: GearOil by SEW-EURODRIVE: CLP PG 460 (-20 / +80 °C): 6,8 Litro

Lubricante: GearOil by SEW-EURODRIVE: CLP PG 460 (-20 / +60 °C): 0,8 Litro

Material Retén de aceite Adaptador NORMAL (Estandar)

Ilustración 45 Reducto de engranajes cilíndricos

Entonces, el motor trabajara a una velocidad angular de 390rpm mediante la regulación del variador de frecuencia. Por lo tanto, el par y la potencia de salida se mantiene constante y verificando con la expresión 50:

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_e} \rightarrow \omega_s = \omega_e \cdot i = 390 \cdot \frac{1}{3108} \approx 0.125483\text{rpm} \approx \mathbf{0.125\text{rpm}}$$

Y el par de salida es:

$$i = \frac{M_e}{M_s} \rightarrow M_s = \frac{M_e}{i} = \frac{1.13}{\frac{1}{3108}} = \mathbf{4040.40Nm}$$

4.1.3. Análisis de los esfuerzos

Se trata de estudiar el comportamiento físico del material cuando se somete a una carga. Mejor dicho, los límites de cargas que se pueden resistir la estructura o el componente mecánico para evitar o prevenir las fallas.

Este comportamiento se puede determinar de varias maneras. En nuestro proyecto se estudia a través de las teorías físicas y/o análisis de elementos finitos (FEA) con la ayuda del software Inventor de Autodesk.

En el caso de los ejes, también tenemos que estudiar si este elemento es capaz el par de salida del motor, es decir, determinar el par torsor o momento de torsión (Ortiz, 2020):

$$\tau = \frac{T \cdot r}{L \cdot J} \quad 53$$

Donde:

τ : resistencia del torsión del material de eje [Pa].

T : Par torsor [Nm].

r : radio del eje [m].

L : Longitud efectiva del eje [m].

J : momento de la inercia de la sección.

Para una sección circular, la J sería:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad 54$$

Donde:

d : diámetro del eje[m]

Sustituyendo la expresión 54 en la ecuación 53:

$$\tau = \frac{2T \cdot L}{\pi \cdot r^3} = \frac{16T \cdot L}{\pi \cdot d^3}$$

Por lo tanto el momento de torsión sería:

$$T = \frac{\tau \cdot \pi \cdot r^3}{2L} = \frac{\tau \cdot \pi \cdot d^3}{16L}$$

55

4.1.3.1. Análisis del eje inclinación – Ángulo Altura Solar

Las características del eje son:

$\tau = 250\text{MPa}$ (material del eje es acero S275JR).

$d = 60\text{mm} = 0.06\text{m}$ (redondo macizo).

$L = 1\text{m}$.

$P = 932.286\text{kg} = 9145.72\text{N}$ (Peso total).

Se simplifica la estructura para facilitar y agilizar el procedimiento del cálculo matemático de FEA en el Inventor.

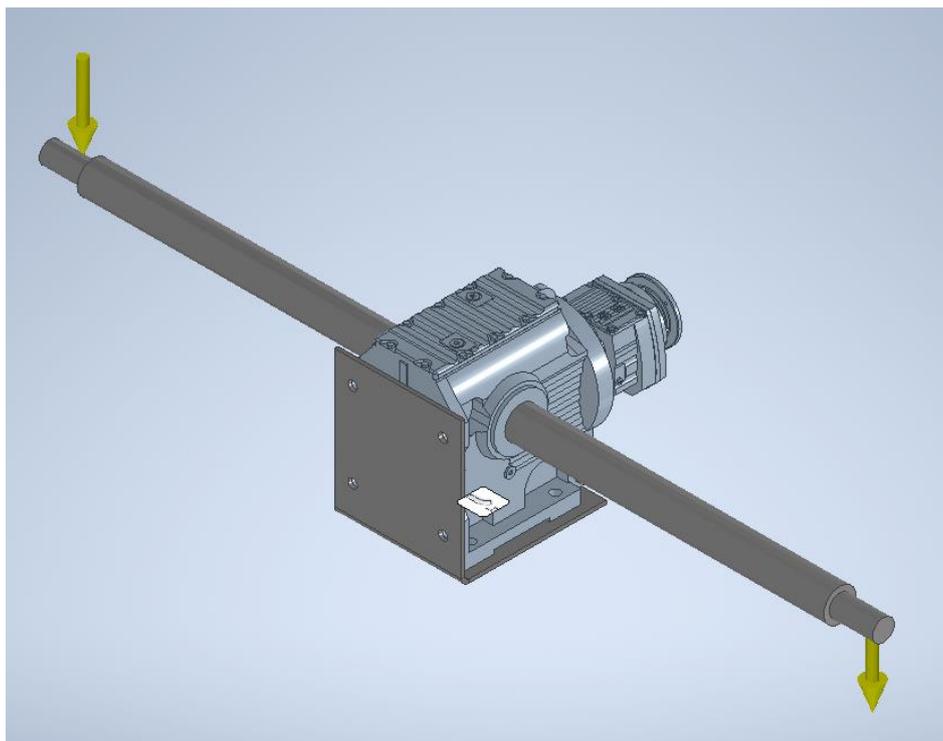


Ilustración 46 Estructura simplificada para FEA del eje Altura Solar

En la Ilustración 46, se muestra la estructura simplificada, las flechas amarillas son las cargas que se aplican en cada punto del eje. Estas cargas es el peso del conjunto estructura soporte, y al tener un reductor de eje doble colocado en la posición céntrica, esta carga se reparte entre los dos ejes. Por lo tanto, la carga aplicada en cada punto del eje es:

$$\sigma = \frac{P}{2} = \frac{9145.72}{2} = 4572.86\text{N} \rightarrow \sigma = \mathbf{4600\text{N}}$$

Luego, se observa el trazado de convergencia del Inventor, este es un indicador de precisión o tolerancia del FEA. Esta tasa es válida cuando es inferior al 10%. Por contrario, habrá que aumentar el número de refinado o modificaciones en diseño hasta lograr dicha tasa de convergencia.

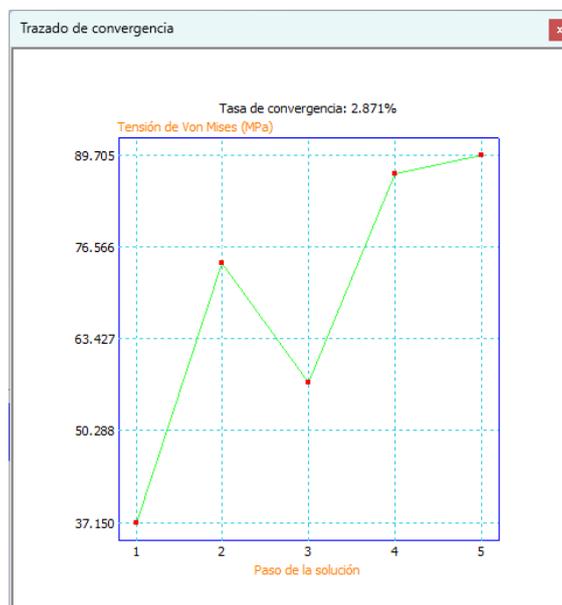
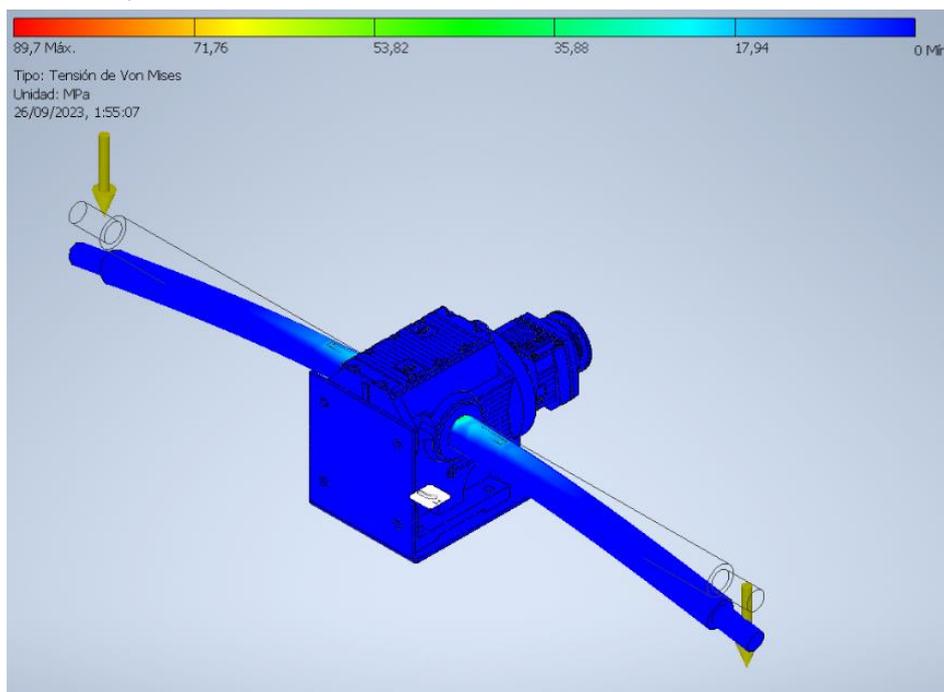


Ilustración 47 Trazado de convergencia del eje Altura Solar

En nuestro caso, Ilustración 47, la tasa de convergencia es 2.871% (<10%). Esta tasa es válida y nos garantiza los resultados de, las más interesante son, la tensión de Von Mises (VM), Ilustración 48, y el desplazamiento, Ilustración 50.



Ilustración 48 La tensión de VM del eje Altura Solar

En la Ilustración 48, tenemos una barra de colores que refleja las **tensiones de VM** y la estructura es prácticamente de color azul, excepto unos ciertos puntos. Aplicamos un zoom en dicho punto, Ilustración 49, encontramos una zona verde, lo cual la tensión efectiva o tensión equivalente de VM es de 89.7MPa.

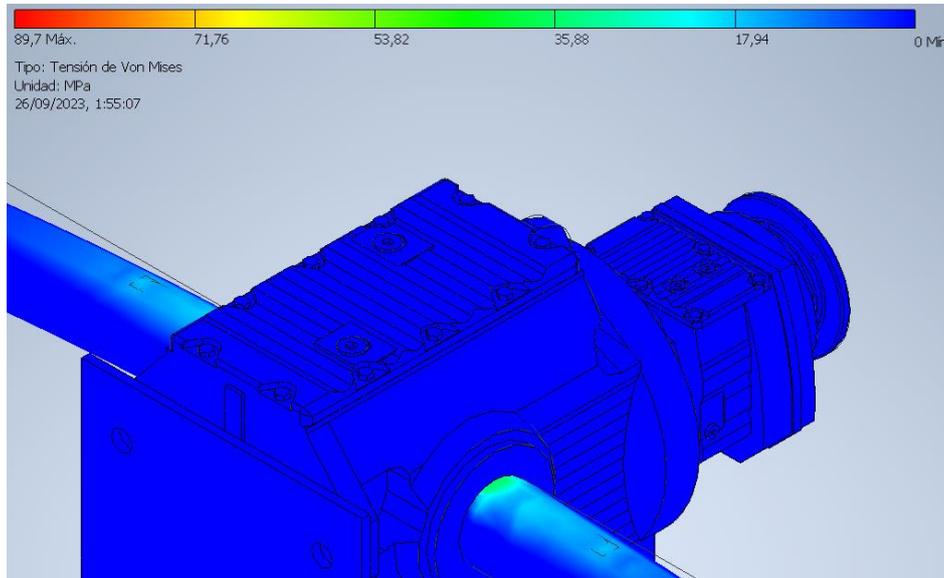


Ilustración 49 Zona ampliada de las tensiones de VM del eje Altura Solar

Ahora se estudia si carga de VM puede o no causar la falla del eje. (Ortiz, 2020):

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{VM}}{N} < \sigma_{elástico} = 275MPa \rightarrow \sigma_{adm} < 275MPa \quad 56$$

Donde:

σ_{adm} : carga admisible o carga equivalente de VM.

$\sigma_{elástico} = 275MPa$: Limite elástico del material (S275JR).

Verificamos tensión de VM con la expresión 56:

$$\sigma_{VM} = 53.82MPa < 275MPa$$

Como resultado, el componente no falla. La carga equivalente de VM es muy inferior al límite elástico. Esto se traduce que el eje no falla, siempre y cuando, la carga aplicada no supera de los 275MPa.

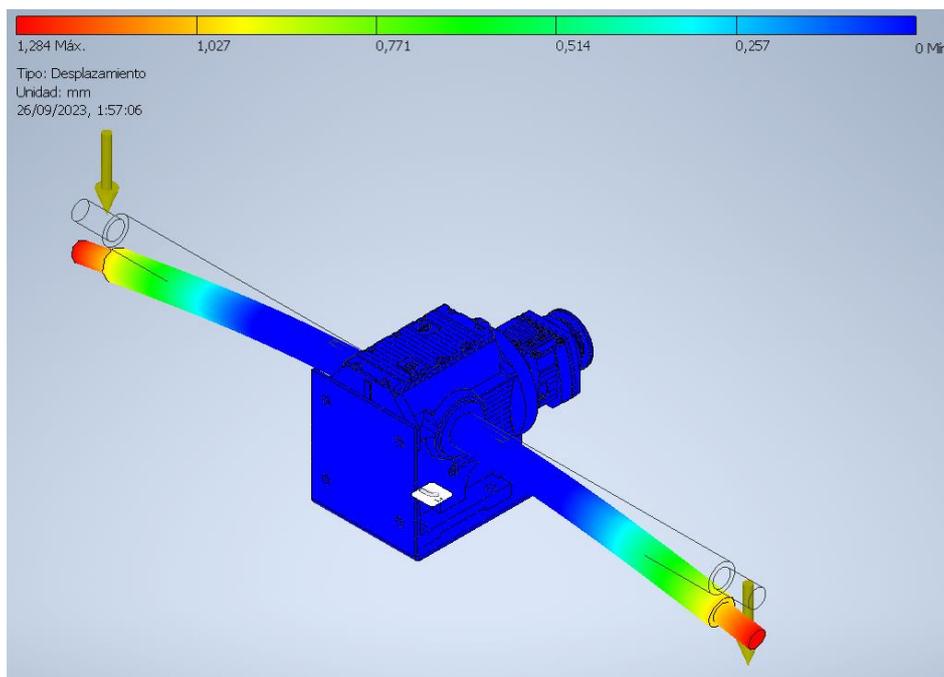


Ilustración 50 El desplazamiento del eje Altura Solar

Por otro lado, el **desplazamiento** o flecha. En la Ilustración 50, también tenemos una barra de colores que se refleja en la estructura simplificada. Se puede observar que en la zona más crítica es del color rojo en el extremo de los eje con un valor de 1.284mm. A mayor desplazamiento se produce una mayor amplitud de vibración, lo cual influirá a la fatiga.

En realidad, este valor no tiene gran importancia porque al ser un valor tan pequeño se puede despreciar y el efecto de fatiga será un prolongación muy alargada.

Y por último, **análisis del par torsor**, aplicando la expresión 55 para comprobar si el eje es capaz de resistir el momento de torsión:

$$T = \frac{\tau \cdot \pi \cdot d^3}{16L} = \frac{250 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 0.06^3}{16 \cdot 1} \approx 10602.875Nm$$

Como resultado, $M_s = 4040.40Nm < T = 10602.875Nm$, el eje es apto para el ajuste del ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos.

4.1.3.2. Análisis del eje giro – Ángulo Acimut Solar

Las característica del eje de giro es:

$$\tau = 250MPa \text{ (material del eje es acero S275JR)}$$

$$d = 90mm = 0.09m$$

$$L = 700mm = 0.7m$$

$$P = 1225.367kg = 12020.85Nm$$

La estructura simplificada para FEA del eje de giro se muestra en la Ilustración 51. La flecha amarilla es la carga que tiene que resistir el eje.

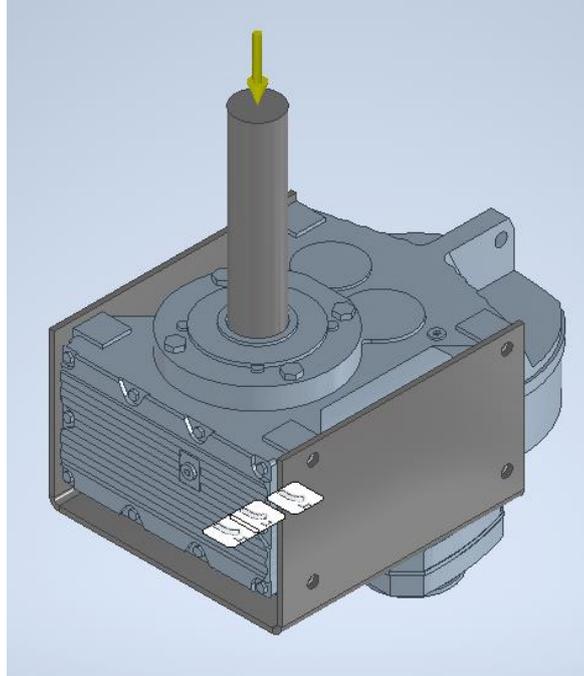


Ilustración 51 Estructura simplificada para FEA del eje Acimut Solar

La carga aplicada es el peso del conjunto soporte y eje de inclinación:

$$\sigma = P = 12020.85 \rightarrow \sigma = 12100N$$

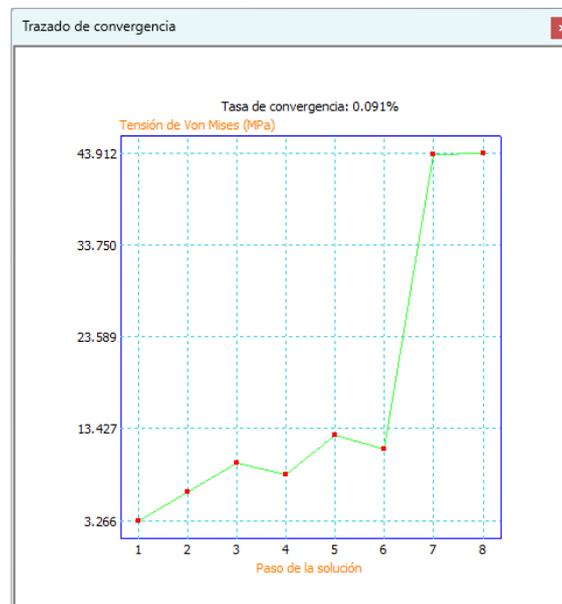


Ilustración 52 Trazado de convergencia del Eje Acimut Solar

La tasa de convergencia de la Ilustración 52 es válida (0.091% < 10%) y nos garantiza los valores de la tensión de VM y el desplazamiento.

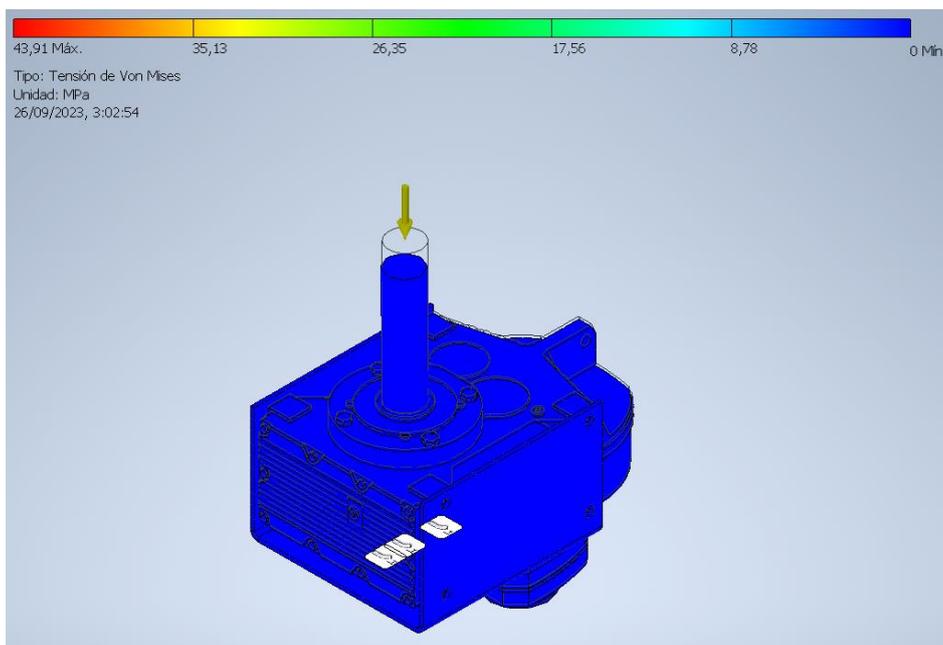


Ilustración 53 La tensión de VM del eje Acimut Solar

En la Ilustración 53, se muestra una barra de colores que marcan la **tensión de VM**. En esta estructura simplificada, generalmente es de color azul. No obstante, al examinar con profundidad, Ilustración 53, encontramos una zona verde.

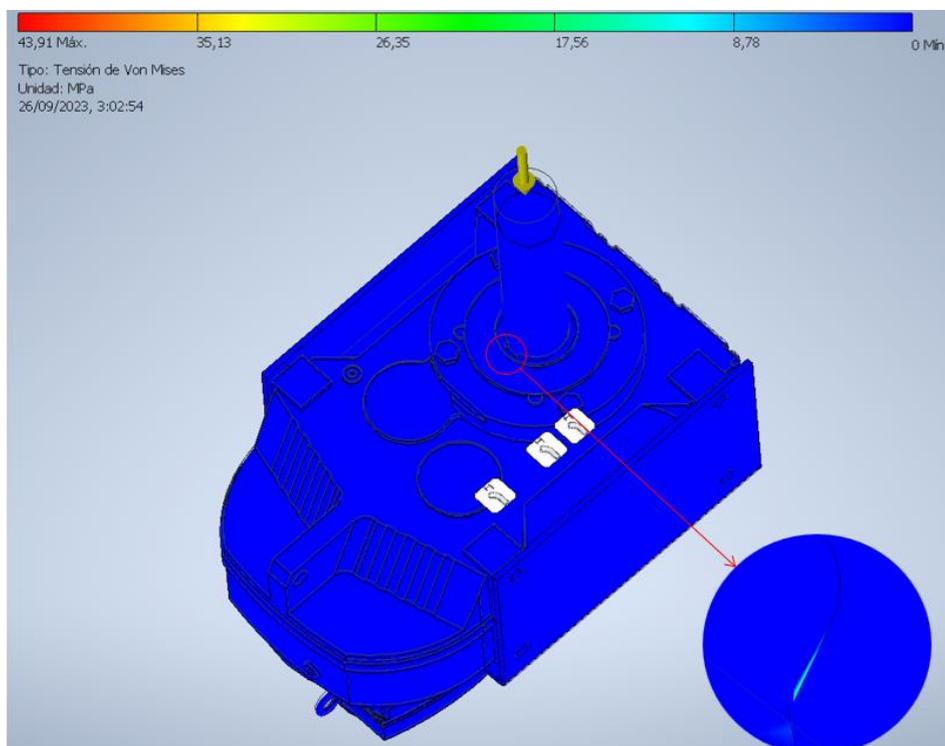


Ilustración 54 Análisis con detalle de la Ilustración 53

Ahora se estudia si esta tensión puede provocar o no la falla del componente con la expresión 56:

$$\sigma_{VM} = 23.51MPa < 275MPa$$

El resultado es muy comprensible, el eje no falla, mientras la carga aplicada no supere el límite de elasticidad.

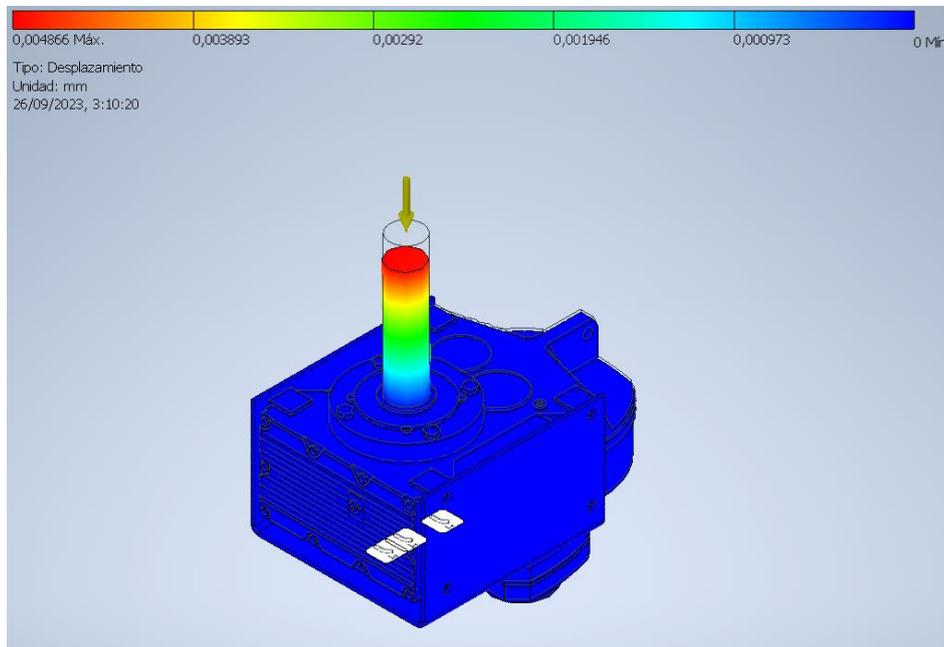


Ilustración 55 El desplazamiento del eje Acimut Solar

Por otro lado, en la Ilustración 55, el **desplazamiento** máximo que puede producir es 0.004866mm, podríamos decir que, el desplazamiento es nula.

Para finalizar, **análisis del par torsor**, empleando la expresión 55

$$T = \frac{\tau \cdot \pi \cdot d^3}{16L} = \frac{250 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 0.09^3}{16 \cdot 0.7} = 51121Nm$$

Por efecto, $M_s = 2356.9Nm \ll T = 51121Nm$, el eje es perfectamente apto para el funcionamiento del giro de los paneles fotovoltaicos.

4.1.3.3. Cálculo y ensayo del Pedestal

CÁLCULO DE PANDEO

La pieza principal del pedestal que resiste todo el peso es un tubo redondo junto a los elementos de refuerzo. Las características del tubo redondo son:

- Diámetro nominal, $DN=200mm$
- Espesor del tubo, $e=3mm$
- Longitud del tubo, $L=2.5m$

El cálculo previo para elección del tubo se necesita conocer sus propiedades físicas, según el Acero al carbono S275JR, son (Metinvest, 2021):

- Módulo elástico: $M=210\text{GPa}=2.1 \cdot 10^{11}\text{Pa}$
- Limite o esfuerzo de fluencia: $F_f=275\text{MPa}=2.75 \cdot 10^8\text{Pa}$

Ahora procedemos los cálculos de la carga crítica. Para empezar, la área transversal de tubo sería:

$$A = \pi R^2 - \pi \cdot (R - e)^2 = \pi \cdot [R^2 - (R - e)^2]$$

$$A = \pi \cdot [200^2 - (200 - 3)^2] \approx 1856.68\text{mm}^2 = 0.0018568\text{m}^2$$

$$A \approx 1.86 \cdot 10^{-3}\text{m}^2$$

Luego, el momento de inercia para tubo circular hueco:

$$I_z = \frac{\pi}{4} R^4 - \frac{\pi}{4} \cdot (R - e)^4 = \frac{\pi}{4} \cdot [R^4 - (R - e)^4]$$

$$I_z = \frac{\pi}{4} \cdot [200^4 - (200 - 3)^4] \approx 9009081635.04\text{mm}^4$$

$$I_z \approx 9 \cdot 10^{-6}\text{m}^4$$

Con estos términos y las propiedades físicas del acero S275JR aplicamos las expresiones 13, 12, 11 para evaluar si el tubo se trata de una columna corta o larga.

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^{-6} \text{m}^4}{1.86 \cdot 10^{-3} \text{m}^2}} \approx 0.07\text{m}$$

$$SR = \frac{K \cdot L}{r_{\min}} = \frac{2 \cdot 2.5}{0.07} \approx 71.78$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot E}{F_f}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^{11}}{2.75 \cdot 10^8}} \approx 122.77$$

Como $SR < C_c$, el tubo redondo hueco es columna corta y se emplea la expresión 10 para calcular la carga crítica:

$$P_{cr} = A \cdot F_f \left[1 - \frac{F_f \cdot \left(\frac{L_e}{r_{\min}}\right)^2}{4\pi^2 \cdot E} \right]$$

$$P_{cr} = 1.86 \cdot 10^{-3} \cdot 2.75 \cdot 10^8 \left[1 - \frac{2.75 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{2 \cdot 2.5}{0.07}\right)^2}{4\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^{11}} \right] \approx 423326.27\text{N}$$

$$P_{cr} \approx 423326.27\text{N} = 43152.53\text{Kg}$$

Por último, designando una coeficiente de seguridad, $N=3$. Por lo que, el peso admisible de la estructura es:

$$P_a = \frac{P_{cr}}{3} \rightarrow \frac{423326.27N}{3} \approx 141108.76N$$

$$\frac{43152.53Kg}{3} \approx 14384.18Kg$$

El resultado del cálculo, $P = 1564Kg < P_a = 14384.18Kg$, el tubo redondo 200x3mm no producirá pandeo.

FEA DEL PEDESTAL

La estructura simplificada del pedestal se muestra en la Ilustración 56. Este ensayo tiene dos tipos de esfuerzo, el peso total de la estructura que tiene que soportar y la fuerza ejercida por el viento.

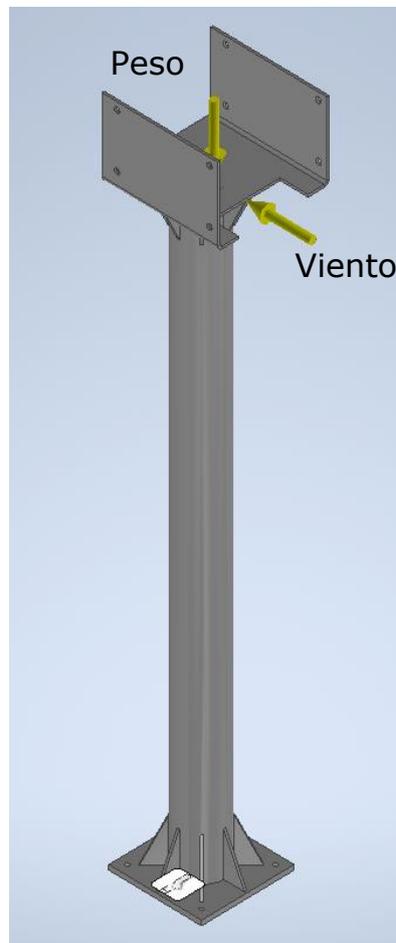


Ilustración 56 Estructura simplificada para FEA del Pedestal

Habrán dos FEA, la primera es despreciar la fuerza del viento, es decir, la situación en la que no hay viento. Mientras, el segundo, es análisis de ambas fuerzas, en la caso de la existencia del viento.

FEA con la ausencia del viento (solo con el peso)

El peso total de la estructura soportada, $P=1564\text{kg}=15342\text{N}$. En el FEA, la carga aplica, $\sigma_p = P = 15400\text{N}$.

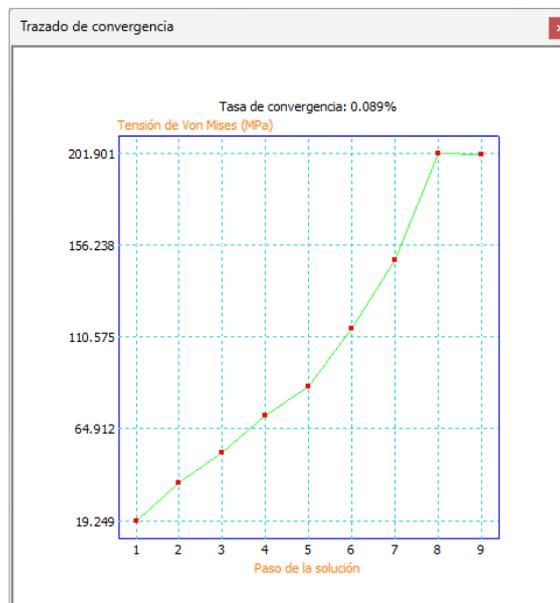


Ilustración 57 Trazado convergencia del Pedestal con la ausencia del viento

La tasa de convergencia de la Ilustración 57 es válida ($0.089\% < 10\%$).

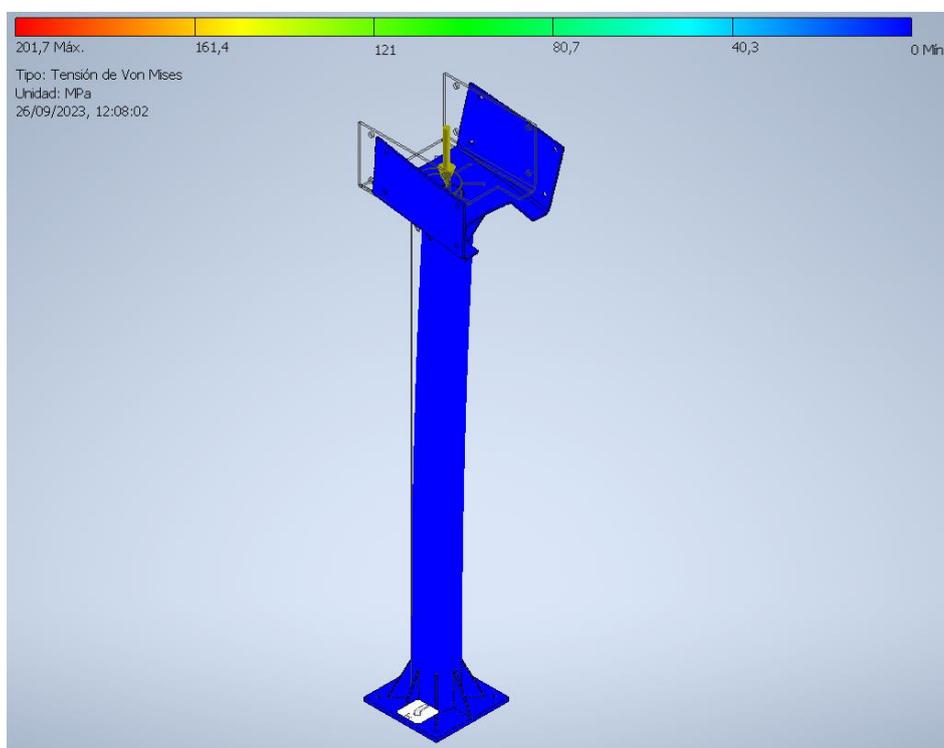


Ilustración 58 La tensión de VM del Pedestal con la ausencia del viento

Entonces, según la barra de color de la **tensión de VM**, la estructura generalmente de la Ilustración 58 es de color azul. Examinando con detalle, en la Ilustración 59, tenemos una zona roja.

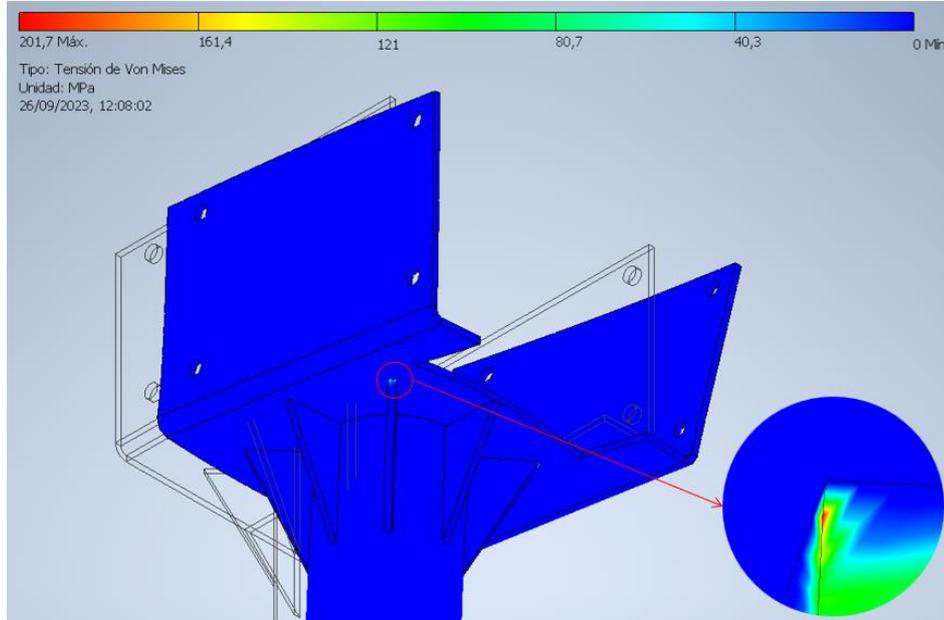


Ilustración 59 Análisis con detalle en las zonas graves de la Tensión de VM

Estudiamos la falla con la ecuación 56:

$$\sigma_{VM} = 201,7 \text{ MPa} < \sigma_{elástico} = 275 \text{ MPa}$$

Estamos en la zona del límite de la elasticidad, lo cual, no falla .

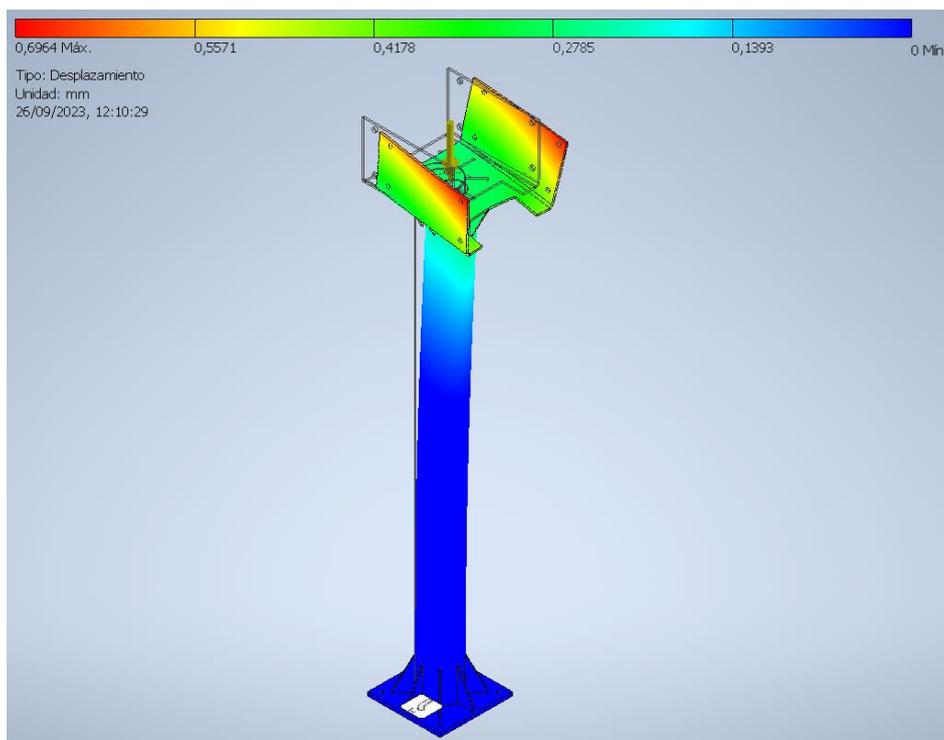


Ilustración 60 El desplazamiento del Pedestal con la ausencia del viento.

Luego, el **desplazamiento** máximo que se puede producir, según la Ilustración 60, es 0.6964mm. Explicado de otra manera, al ser un desplazamiento tan pequeña, se puede despreciar.

FEA con la presencia del viento (acción de ambas fuerzas)

En FEA, la carga aplica del viento es $\sigma_V = F_{Viento} = 5800N$.

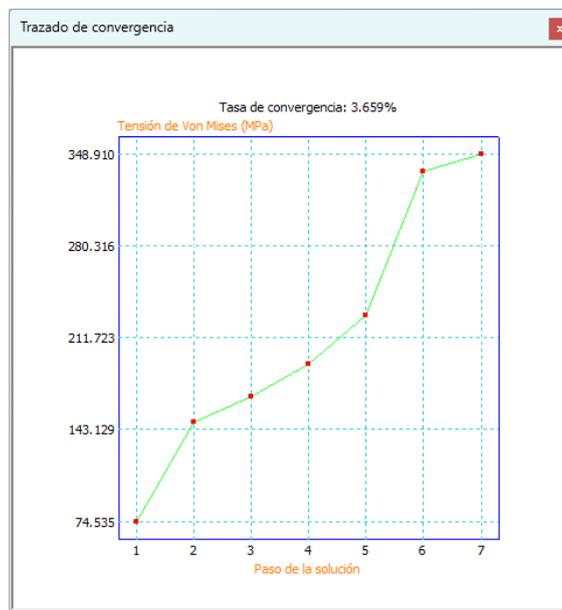


Ilustración 61 Trazado de convergencia del Pedestal con la presencia del viento

La tasa de convergencia de la Ilustración 61 es admitida, $3.659\% < 10\%$.

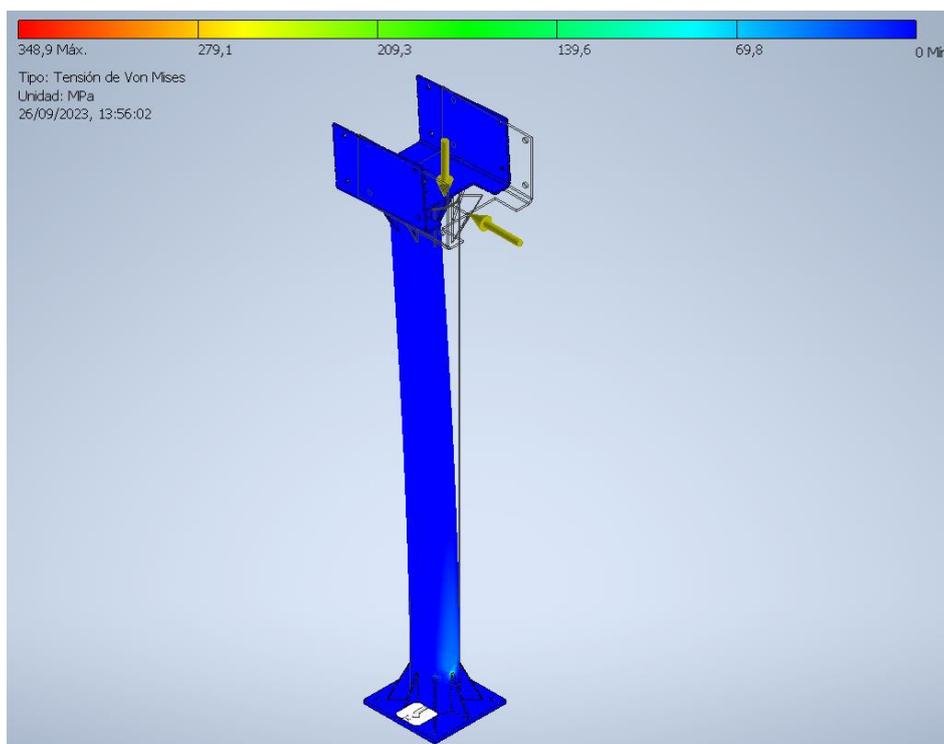


Ilustración 62 La tensión de VM del Pedestal con la presencia del viento

El resultado es muy similar a los FEA anterior, determinamos específicamente los puntos más críticos de la **tensión de VM** en la Ilustración 63.

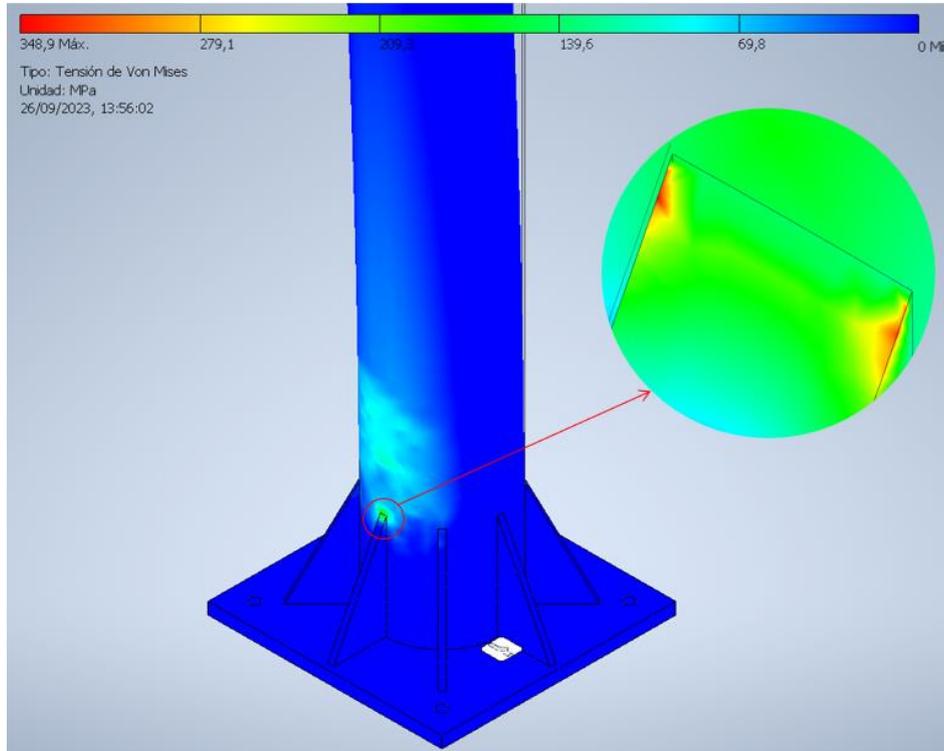


Ilustración 63 Análisis con detalle de la Ilustración 62

La estructura falla porque la tensión de VM supera el límite elástico, lo cual, se produce una deformación. Hay dos posibilidades de solucionar este problema.

La primera es reducir carga soportada o bien determinar con la expresión 56 la carga máxima que puede soportar:

$$\frac{348.9 \text{ MPa}}{N} < \sigma_{\text{elástico}} = 275 \text{ MPa} \rightarrow N > \frac{348.9}{275} = 1.27$$

Y la nueva carga máxima que se puede aplicar es:

$$\sigma_{V'} < \frac{\sigma_V}{N} = \frac{5800}{1.27} = 4566.93 \text{ N}$$

Mientras, el segundo método es modificar el diseño del pedestal. Si observamos la Ilustración 63, las zonas más afectadas son elementos de refuerzo. Entonces, voy a probar a aumentar el espesor de estas piezas, de 10mm a 15mm, y repetimos el procedimiento del FEA con los mismos valores de carga.

FEA con la presencia del viento modificado

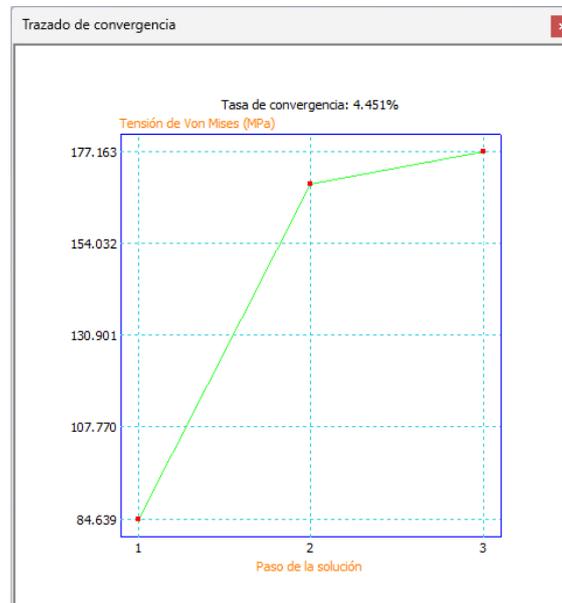


Ilustración 64 Trazado de convergencia del Pedestal modificado con la presencia del viento

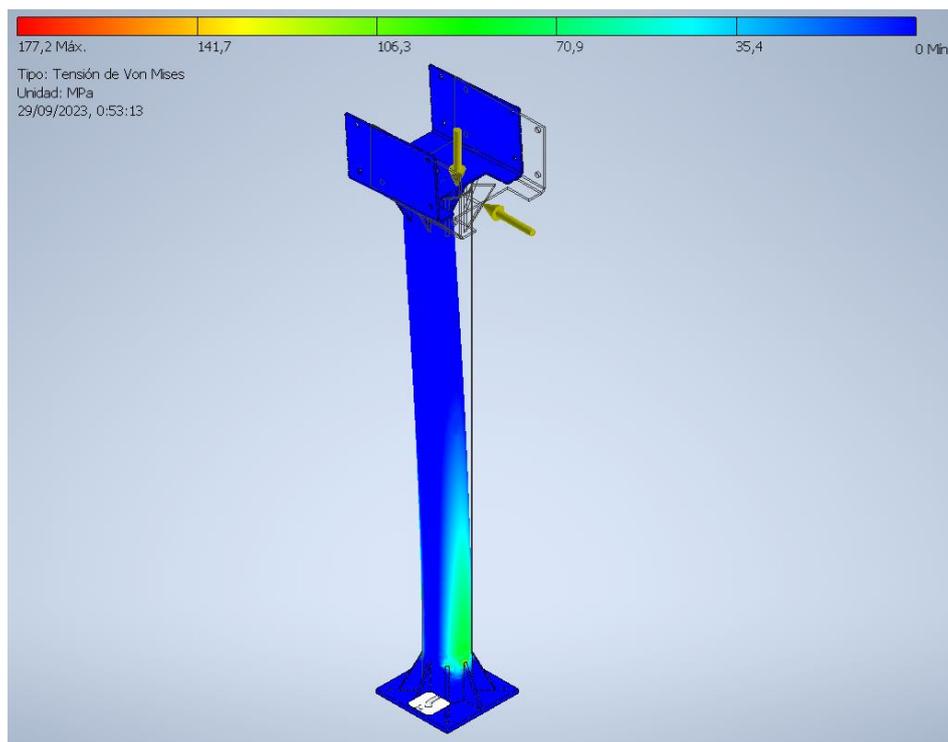


Ilustración 65 La tensión de VM del Pedestal modificado con la presencia del viento

Resumidamente, la tasa de convergencia es admitida y supervisamos la tensión de VM en Ilustración 66.

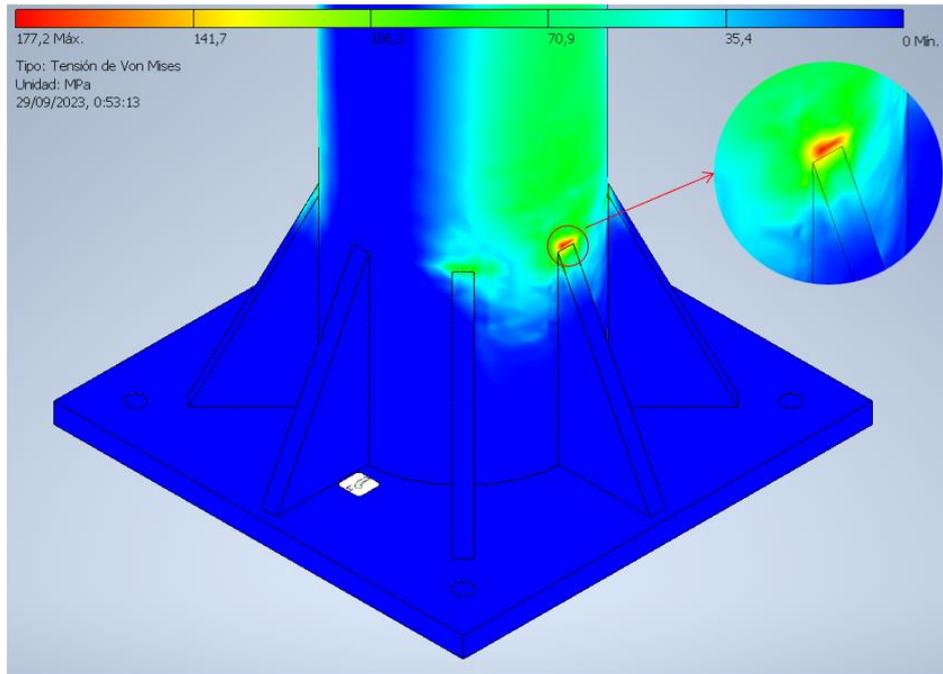


Ilustración 66 Análisis con de la Ilustración 65

El resultado tras la modificación en el diseño, la estructura no falla:

$$\sigma_{VM} = 177.2 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

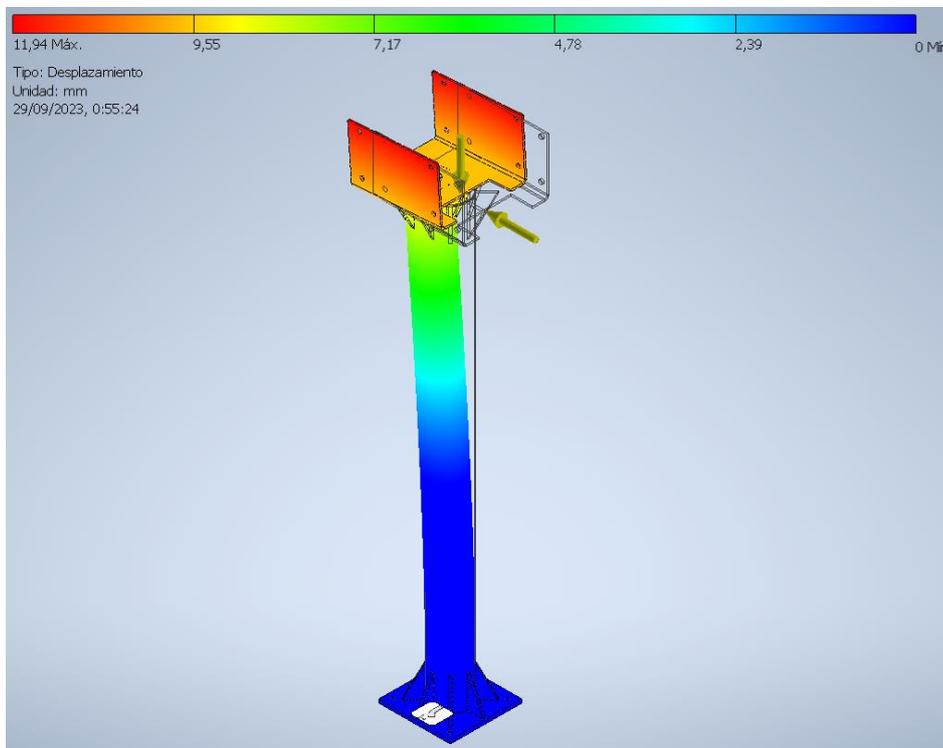


Ilustración 67 El desplazamiento del Pedestal modificado con la presencia del viento.

Por otro lado, el desplazamiento máximo que tenemos es 11.94mm. También se puede despreciar este valor porque el desplazamiento sigue siendo pequeño en comparado con las dimensiones de nuestro proyecto.

FEA con la ausencia del viento modificado

Tras la modificación en el diseño, también habrá que verificar tensión de VM en ausencia del viento. La carga aplicada es la misma, entonces:

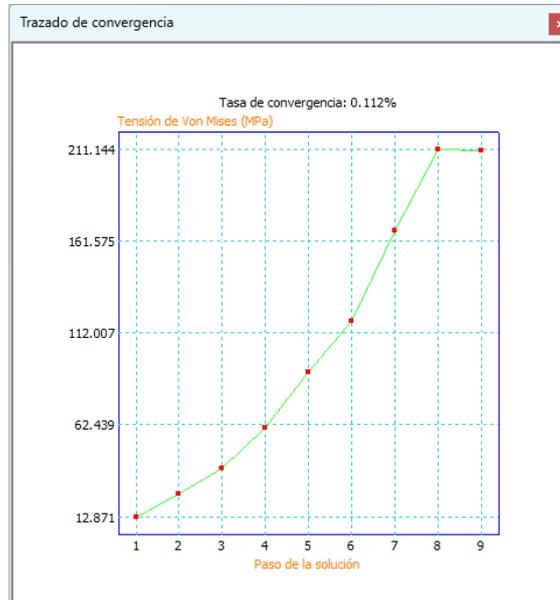


Ilustración 68 Trazado de convergencia del Pedestal modificado con la ausencia del viento

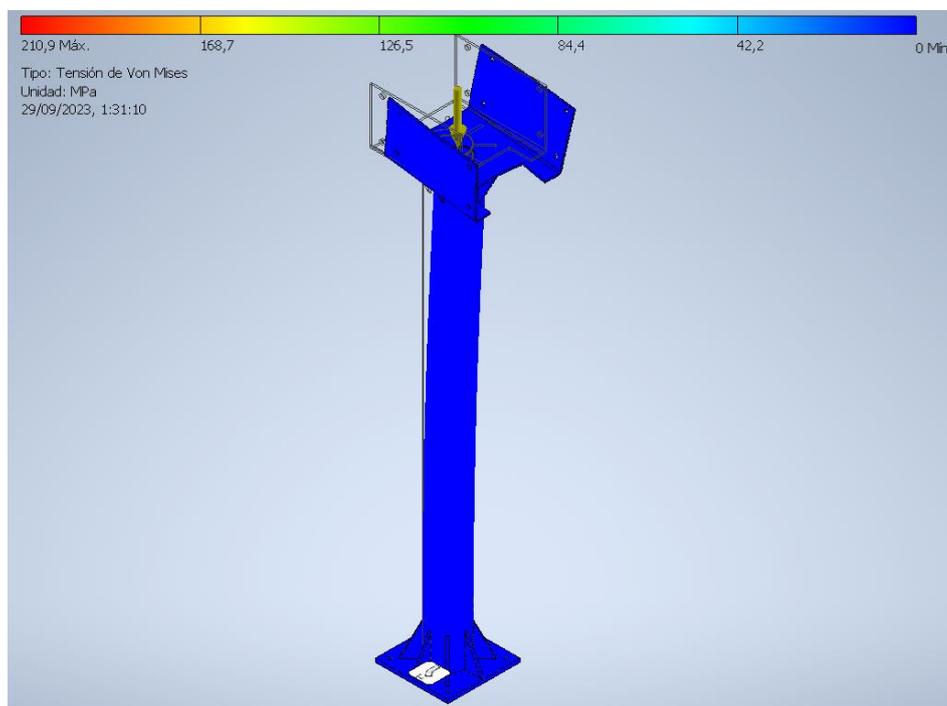


Ilustración 69 La tensión de VM del Pedestal modificado con la ausencia del viento

En pocas palabras, la tasa de convergencia es admitida y supervisamos la tensión de VM en Ilustración 70.

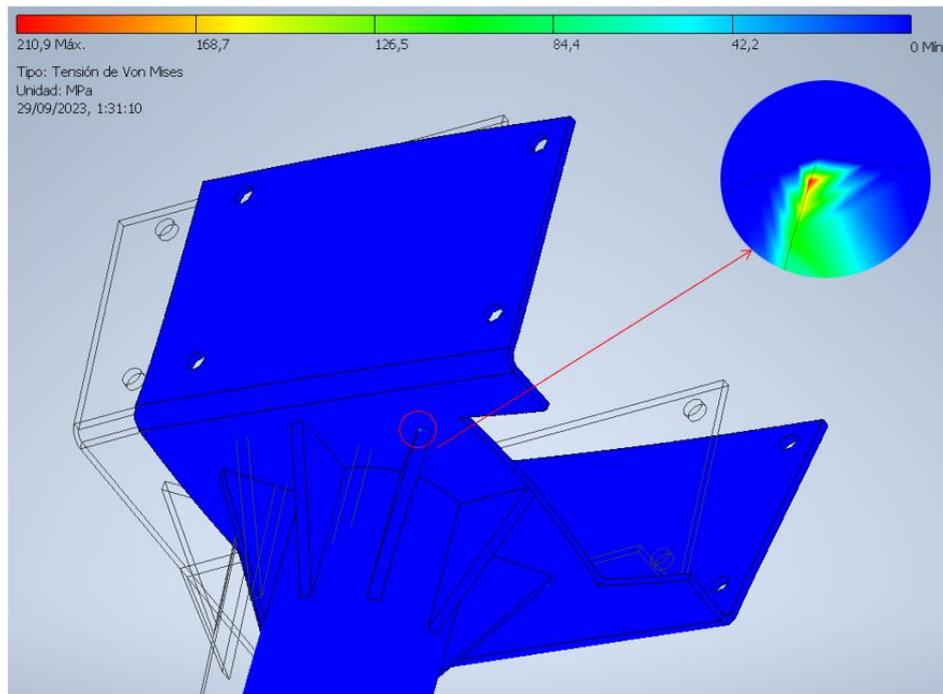


Ilustración 70 Análisis con de la Ilustración 69

Como resultado, la estructura no falla:

$$\sigma_{VM} = 210.9MPa < 275MPa$$

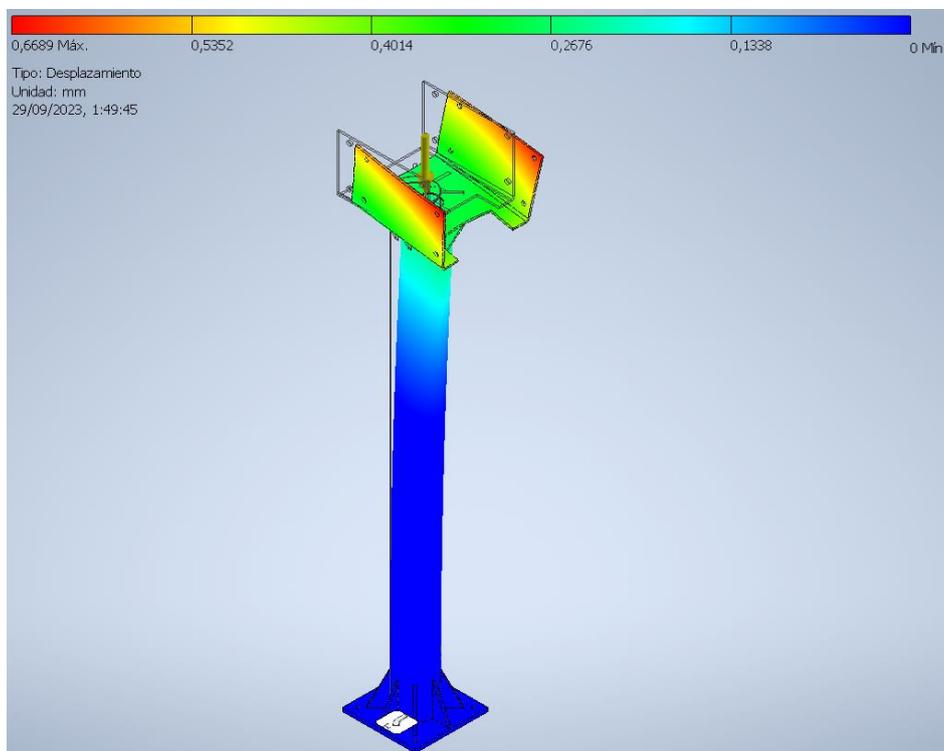


Ilustración 71 El desplazamiento del Pedestal modificado con la ausencia del viento.

Por otro lado, el desplazamiento máximo es 0.6689. Lo cual, este valor es despreciable.

4.2. SISTEMA DE CONTROL

4.2.1. Funcionamiento

El optimizador de panel solar consiste en dos partes: sistema de seguidor solar y sistema de autolimpieza.

La misión del **sistema seguimiento solar** es imitar la trayectoria del sol. Este sistema está compuesto por dos motores, el primer motor regula el sentido giro de los módulo fotovoltaico, o bien, ángulo Acimut Solar. Mientras el segundo motor regula la inclinación de los paneles fotovoltaicos, o bien, el ángulo Altura Solar.

La estrategia de seguimiento se realiza mediante las ecuaciones matemáticas de la expresión 32, en las cuales, los variables principales son el día del año y la latitud de la ubicación. Entonces, se describe estas ecuaciones en el código de programación del microcontrolador que se encargara de calcular la posición del Sol y accionara los motores para seguir la trayectoria del Sol.

En cuanto al **sistema de autolimpieza**, limpia de forma autónoma cuando detecta la presencia del agua (mediante un sensor de lluvia) o un temporizador que con un periodo de tiempo programado realice la limpieza. La técnica de barrido de las limpiaparabrisas es de arriba hacia abajo porque barrido de las limpiaparabrisas va acompañado con el agua a presión. De esta forma, aprovechando de la gravedad, el agua arrastra la suciedad que se ha quedado retenido en el superficie del módulo fotovoltaico. Por esta razón, nuestro sistema contiene una bomba de agua conectado con el depósito de agua.

Estos sistemas son gobernados por el microcontrolador ESP32-S3, que está conectado con todos los elementos eléctricos del sistema del optimizador de paneles fotovoltaicos. Además está comunicado mediante el WIFI con los dispositivos externos del sistema como la estación meteorológica y sensor de nivel de agua. Alguno ejemplos de control:

- Un día ventoso que supera a la velocidad de viento establecida. La estación meteorológica enviara esta información al ESP32-S3 y este actuara sobre los motores para posicionar la inclinación de los paneles solares a 0° respecto al suelo, es decir, paralelo al suelo. Esto sirve como una medida de seguridad para proteger a los módulos fotovoltaicos.
- Un día nublado, la estación meteorológico enviara esta señal al microcontrolador. Como respuesta, pausara el funcionamiento del sistema. No tiene sentido seguir la trayectoria del sol si no se puede captar las radiaciones solares. Esto sirve como ahorro energético.

- Cuando el sensor de lluvia detecta la presencia del agua, el ESP32-S3 activará el motor de sistema de autolimpieza y limpiará los módulos fotovoltaicos. En caso de la suciedad, también activa la bomba de agua que acompañará el barrido de los paneles fotovoltaicos durante la limpieza. Mientras haya disponibilidad de agua y esta información será aportada por el sensor de nivel de agua.
- Cuando los sensores inductivos en la parte inferior detectan el subconjunto limpiaparabrisas, el microcontrolador modificará el sentido de giro del motor de doble eje. Lo cual, provocará que el subconjunto limpiaparabrisas desplazara hacia arriba y se detendrá al ser detectado por los sensores inductivos en la parte superior.

Estos controles se pueden realizar de forma manual o ser gestionados a distancia gracias a la conexión WIFI.

Con el conocimiento del funcionamiento del sistema podemos implementar los diagramas de alto y bajo nivel. Estos diagramas son herramientas, o bien, una filosofía de funcionamiento que se puede describir para cualquier código de programación del microcontrolador que no sea ESP32-S3.

4.2.2. HLD – Diagrama de alto nivel

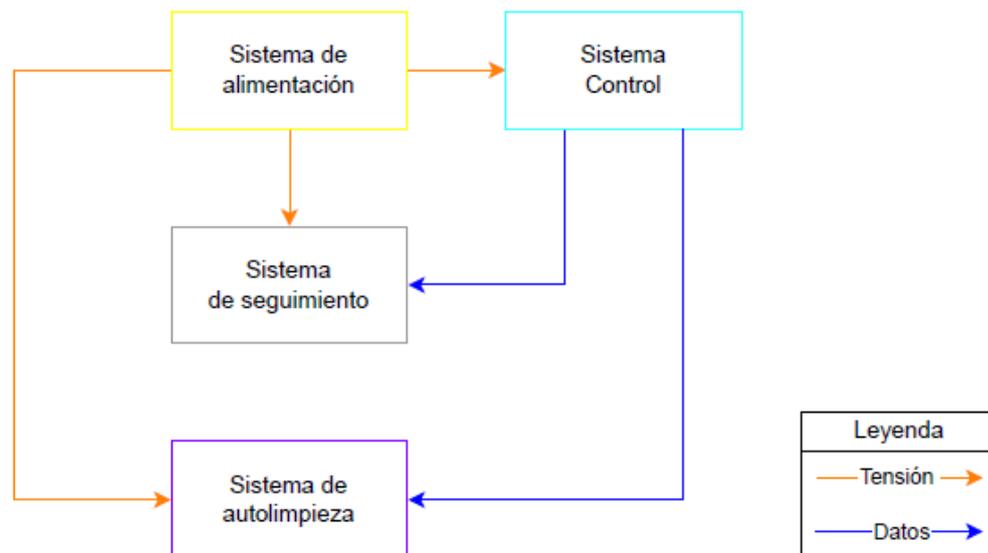


Ilustración 72 HLD del Optimizador de paneles solares

El HLD representa la simplificación y generalidad de los sistemas de un proyecto. En la Ilustración 72, el HLD del optimizador de paneles solares está formado por 4 sistemas fundamentales: Alimentación, Seguimiento, Autolimpieza y Control. En las cuales, el sistema de

alimentación suministra energía a otros sistemas y el sistema de control motoriza el sistema de seguimiento y de autolimpieza.

4.2.3. LLD – Diagrama de bajo nivel

LLD muestra más específicamente el procedimiento del sistema, Ilustración 73. Es decir, los detalles de funcionamiento en aspecto técnico de cada sistema del optimizador de paneles solares.

Nuestro proyecto se centra principalmente en el optimizador de los paneles fotovoltaicos (los elementos que se encuentran interior del recuadro negro de Ilustración 73), no obstante, en LLD también contiene componentes externos del sistema (los elementos que están fuera del recuadro negro de Ilustración 73) como la caja de String, el inversor, la red eléctrica, el depósito de agua y el sensor de nivel de agua. Se incluyen estos elementos en el diagrama de bajo nivel para entendernos mejor el funcionamiento del sistema.

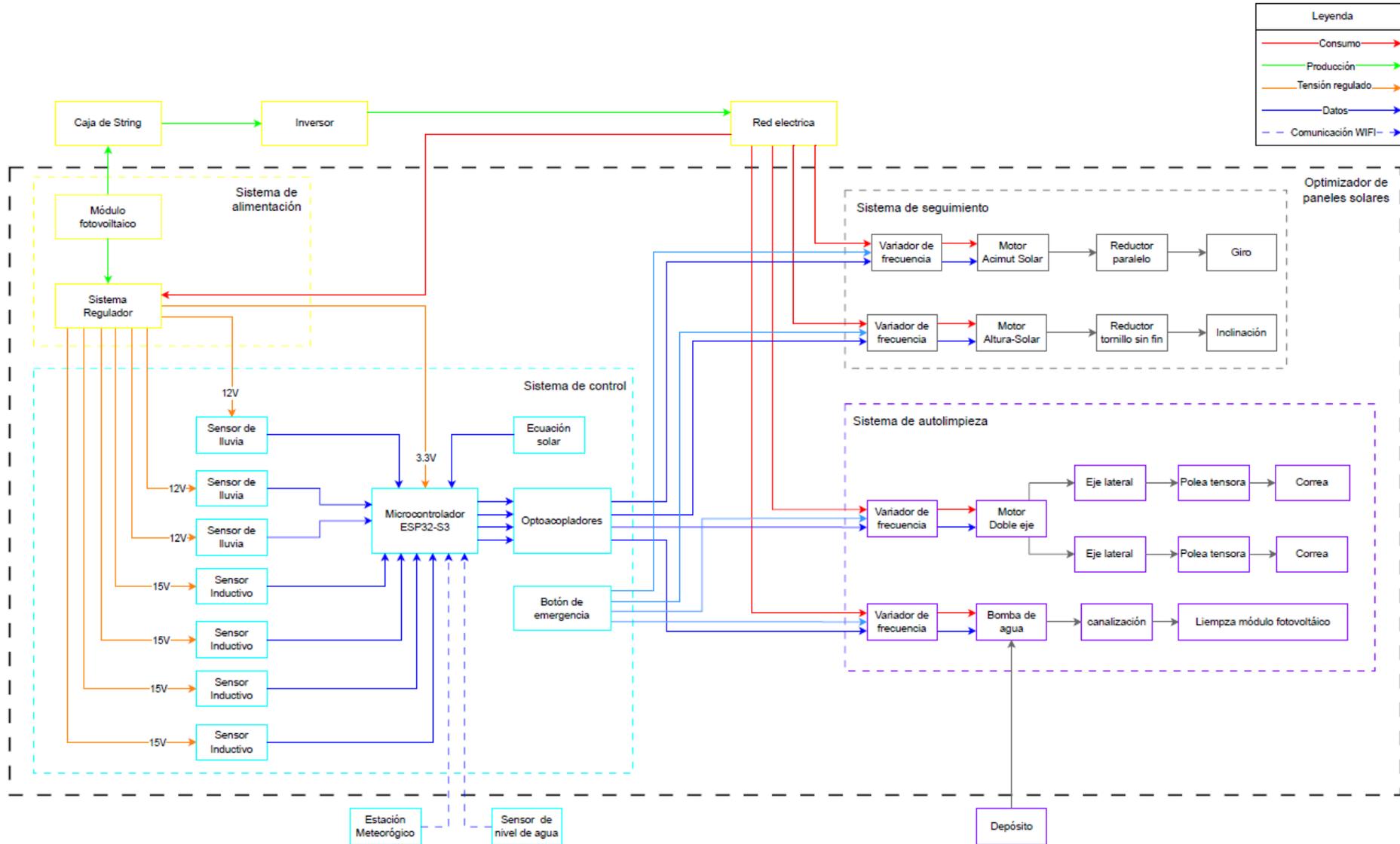


Ilustración 73 LLD del optimizador solar

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Los dispositivos que componen el sistema de alimentación, Ilustración 74, son de color amarillo.

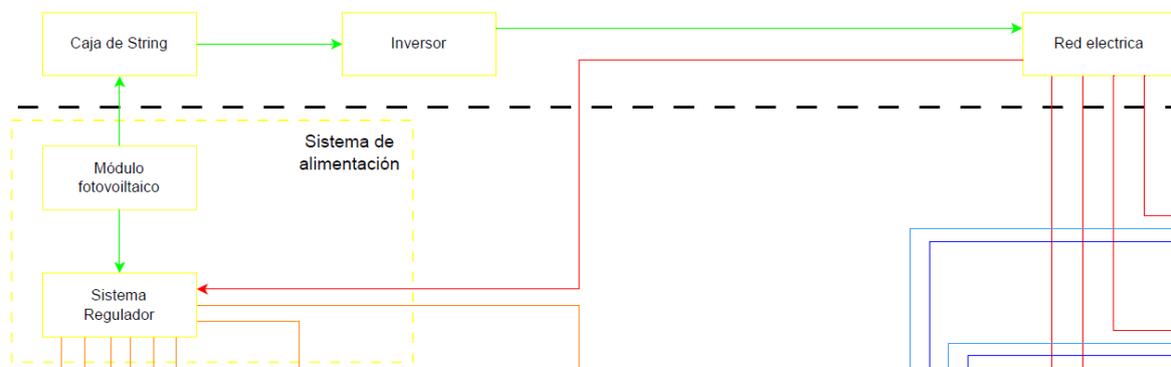


Ilustración 74 LLD - Sistema de alimentación

Dado que el principal objetivo del nuestro sistema es aumentar el rendimiento de la producción de la energía eléctrica. Entonces, los módulos fotovoltaicos de optimizador entrega esta energía al caja de String y al regulador.

En caja de String se conecta en paralelo para cada uno de los optimizadores de los paneles solares al inversor que se transforma la tensión DC en tensión AC.

Por otro lado, el regulador se consume la energía generada por los paneles fotovoltaicos. También está acoplada la red eléctrica en el caso de que la condición atmosférica impide la producción y puede mantener el funcionamiento del sistema. La principal función del regulador es ajustar una tensión apropiada para suministro de los motores, sensores u otros elementos eléctricos del sistema.

SISTEMA DE CONTROL

Los elementos que constituyen el sistema de control, Ilustración 75, son de color azul. En este sistema también tenemos elementos externos del sistema de control: la estación meteorológica y el sensor de nivel de agua. Estos dispositivos se comunica a través del WI-FI con el controlador.

El microcontrolador ESP32-S3 es el gobernador de funcionamiento del sistema. El ESP32-S3 recibe los señales de los sensores inductivos, los sensores de lluvia, el sensor de nivel de agua o/y la estación meteorológica y reacciona los motores o/y la bomba de agua.

Además, este sistema cuenta con una botón de emergencia que parará los motores y la bomba de agua en caso de avería o mantenimiento.

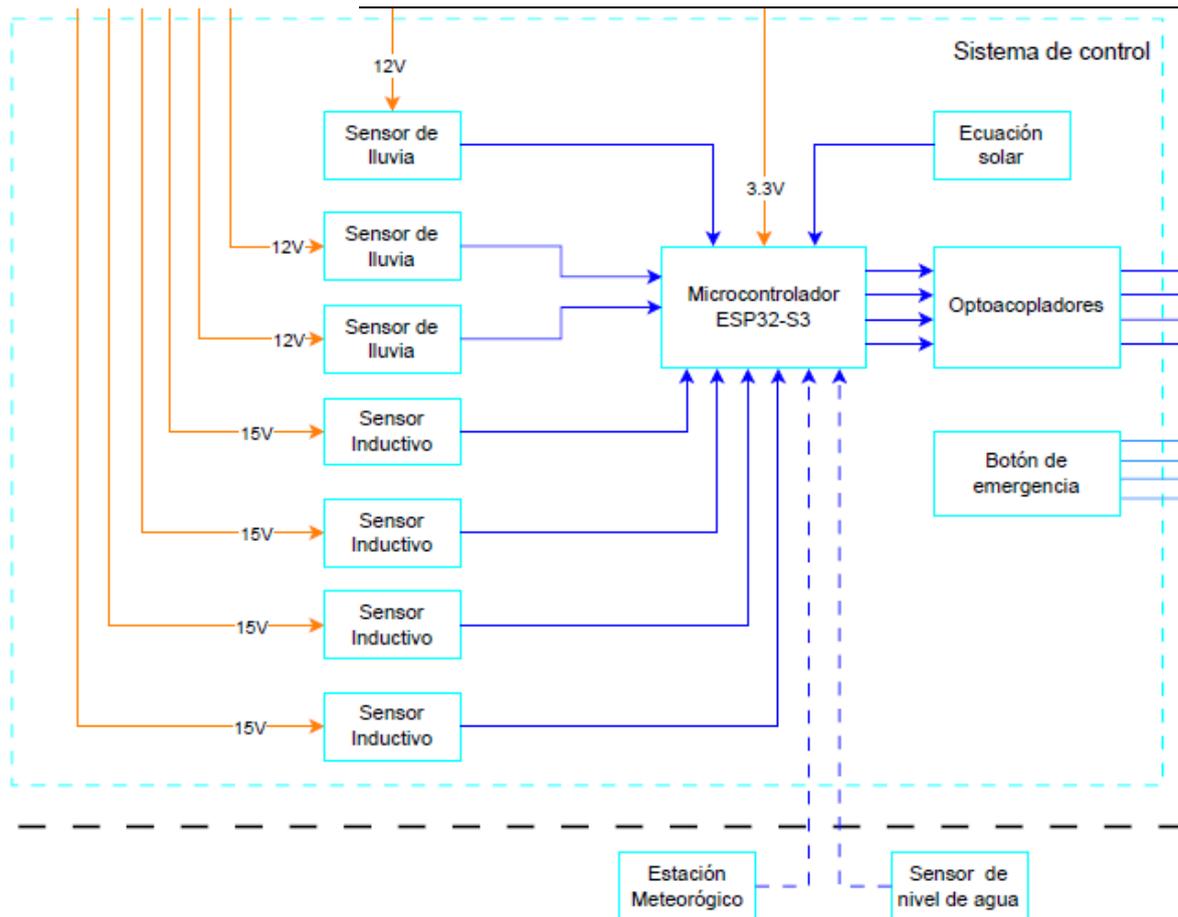


Ilustración 75 LLD - Sistema de control

SISTEMA DE SEGUIMIENTO

Los componentes que establecen el sistema de seguimiento, Ilustración 76, son de color gris. En este sistema tenemos dos motores, uno regula el movimiento giratorio y, el otro, varia el ángulo de inclinación. Ambos motores están unidos con su propio variador de frecuencia. Este dispositivo es controlado por el ESP32-S3 con la capacidad de regular la velocidad necesaria para ajustar el ángulo Acimut y Altura Solar.

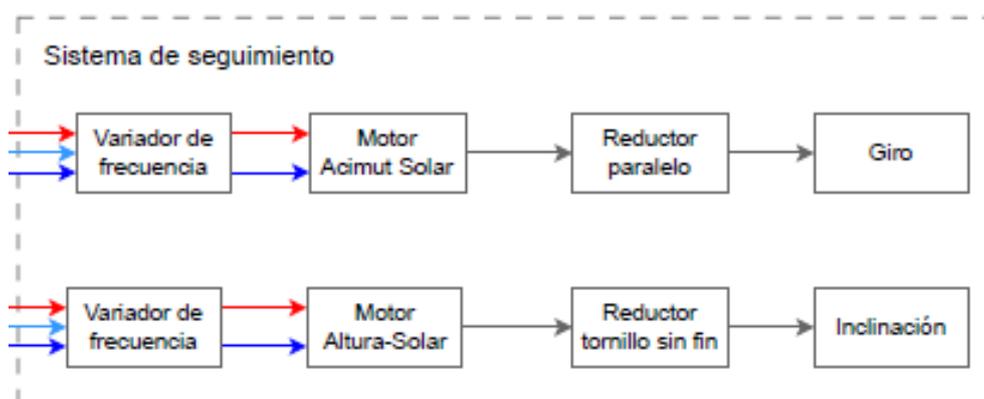


Ilustración 76 LLD - Sistema de seguimiento

SISTEMA DE AUTOLIMPIEZA

Las componentes que conforma el sistema de autolimpieza, Ilustración 73, son de color morado. En este sistema existe un elemento externo, el depósito de agua, que suministra a la bomba de agua que impulsa agua a presión para favorecer la limpieza.

A pesar de que se denomina bomba de agua, pero es un simple motor que comprime agua. Este motor no se requiere la regulación de su velocidad nominal, aun así, le colocamos un variador de frecuencia. Esto es debido a que el propio variador de frecuencia contiene elemento de protección frente a sobretensiones o sobrecorrientes. Y al nivel económico, los componentes de las protecciones tienen el mismo coste, lo cual, es mejor variador de frecuencia con planes futuras.

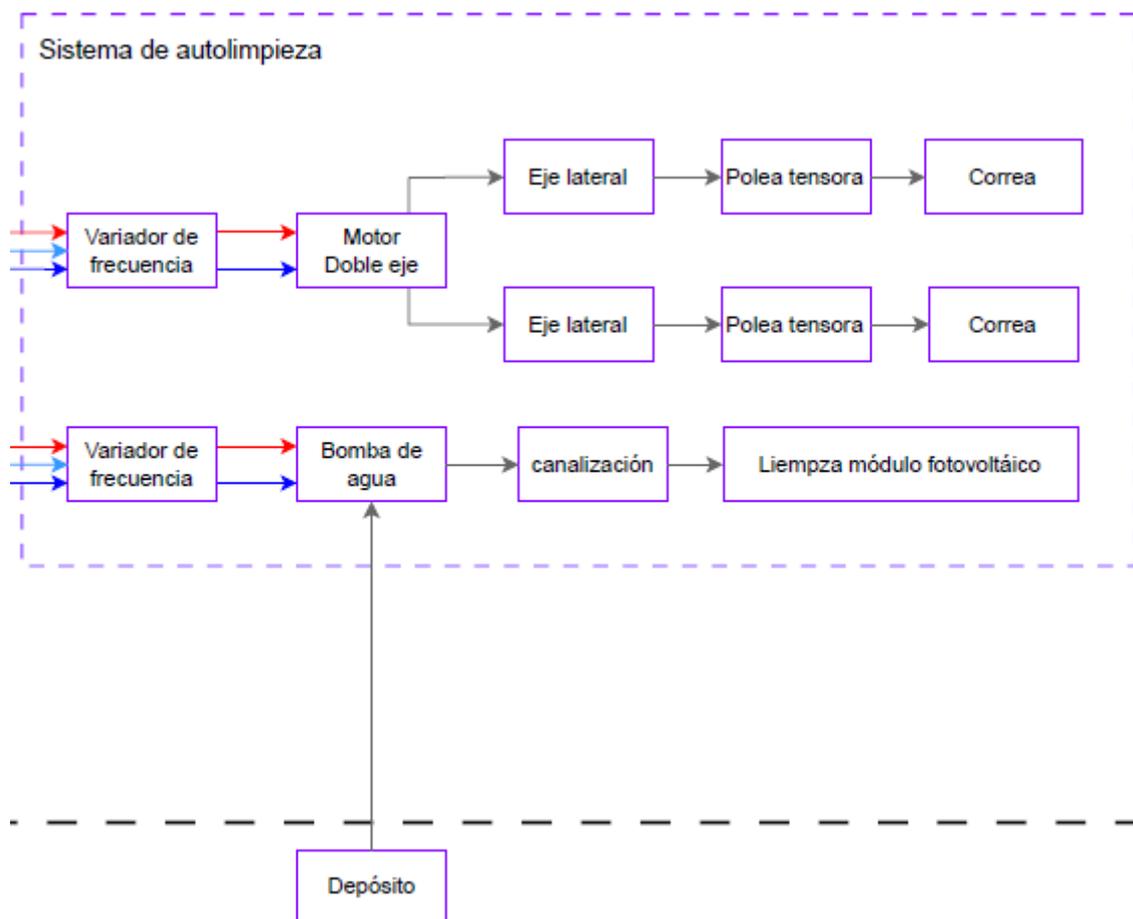


Ilustración 77 LLD - Sistema de autolimpieza

4.3. DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

4.3.1. Componentes

En este apartado se muestra todos los elementos electrónicos/eléctricos que se necesitan para este proyecto.

- **Módulo fotovoltaico:** el componente esencial para la generación de la energía eléctrica.
- **Regulador:** tiene la misión de transformar la tensión de entrada a una tensión salida requerida. Este componente no es comercial y se requiere el diseño eléctrico.
- **Motores y bomba de agua,** o bien motor hidráulico (Ilustración 78), son actuadores del sistema y controlados por el microcontrolador para conseguir los acciones requeridos para lograr el correcto funcionamiento del sistema. Las características eléctricas de los motores del seguidor solar se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 23 Características eléctricas de los motores

Característica eléctrica					
Denominación	Modelo	P [KW]	V [V]	I [A]	ϕ
Motor Asíncrono de doble eje	IM 1002 - 90S	1.1	400	2.6	0.76
Motor Asíncrono	IM3001 - IMB5	0.09	400	0.5	0.57
Bomba de agua	CMA 0.50T	0.37	400	1.4	--



Ilustración 78 Bomba de agua (Corefluid, 2023)

- **Variador de frecuencia:** regula la velocidad del motor, además comporta como elemento de protección para los motores. La selección del variador de frecuencia (Yaskawa, 2023) siempre tiene que tener la potencia superior al motor ha de regular. Entonces el variador adecuado para cada motor se muestra la Tabla 24.

Tabla 24 Selección del variador

Motor		Variador de frecuencia	
Modelo	P [KW]	Modelo	P _{máx.} [KW]
IM 1002 - 90S	1.1	CIMR-VC4A0004BAA	1.5
IM3001 - IMB5	0.09	CIMR-VC4A0001BAA	0.4
CMA 0.50T	0.37	CIMR-VC4A0001BAA	0.4



Ilustración 79 Variador de frecuencia V1000 (Yaskawa, 2023)

- **Microcontrolador** ESP32-S3-DevKitC-1 V1.1 es el dispositivo que ejecuta y controla el funcionamiento del optimizador de los paneles solares. Además, contiene el módulo WI-FI que permite controlar por vía telemática.



Ilustración 80 ESP32-S3-DevKitC-1 v1.1 (ESPRESSIF, 2023)

- **Sensor inductivo:** se emplea para determinar las posiciones de la escobilla del subconjunto limpiaparabrisas.

Este componente se coloca en el parte superior e inferior del subconjunto sistema autolimpieza. La parte superior hará parar el desplazamiento del limpiaparabrisas, mientras, en el inferior, cambiará el sentido de desplazamiento.



Ilustración 81 Sensor capacitivo CFAM 12N1600(Baumer, 2023)

- **Sensor de lluvia:** detecta la presencia del agua y activa el sistema de autolimpieza para el barrido de los paneles fotovoltaicos.

Este dispositivo se coloca en la parte inferior de los paneles fotovoltaicos por dos razones: debido a la gravedad, el agua aloja sobre este sensor y es el último superficie de barrido. Por lo que, de esta manera conocemos la presencia del agua en los paneles.



Ilustración 82 Sensor de lluvia - Regensensor RS12 (H-TRONIC GmbH, 20)

Ahora se puede proceder el diseño eléctrico con los conocimiento de los componentes. En la carpeta de "Planos" se muestra los circuitos eléctricos del sistema.

5. RESULTADOS

Se ha logrado implementar el optimizador de paneles solares por medio del sistema de seguimiento solar y el sistema de autolimpieza.

- El **sistema de seguimiento** es un mecanismo que sigue la trayectoria del sol con la ayuda de dos motores. El primero (motor Acimut) varía el ángulo Acimut, movimiento giratorio. Mientras, el segundo (motor Altura) regula el ángulo Altura, la inclinación. Por otro lado, la estrategia de seguimiento se realiza mediante la ecuación astronómica y controlado por el microcontrolador ESP32-S3. La eficiencia de producción energética de este sistema es 25.78%, por cada panel solar, más respecto al sistema fijo.
- El **sistema de autolimpieza** realiza la limpieza automáticamente cuando los sensores de agua detectan la presencia del agua. También está programado a través del ESP32-S3 como un temporizador que ejecuta la limpieza cada 12h² desde la última limpieza. La importancia de este sistema es debido a que la suciedad representa un factor de degradación que no solo disminuye la eficiencia de producción, sino que también puede reducir la vida útil de los paneles fotovoltaico.

En cuanto al diseño mecánico, las características y las condiciones de funcionamiento de estos sistemas se resumen en la Tabla 25. Los parámetros mínimos requeridos y las condiciones establecidas de funcionamiento del motor Tabla 25.

Tabla 25 Los parámetros mínimos requeridos y las condiciones establecidas de funcionamiento del motor

Motores	Parámetros		Condiciones		
	τ [Nm]	P [W]	Δx	t	Velocidad
Acimut (Giro)	60.23	0.63	180°	5min	0.1rpm
Altura (Inclinación)	3795.48	20.62	90°	30s	0.125rpm
Autolimpieza	5.93	131.8	4.2m	--	1m/s

Luego, para poder cumplir los parámetros mínimos y las condiciones establecidas de funcionamiento, estos motores están acoplados con su variador de frecuencia y con su reductor. En la Tabla 26, se muestra las características de los reductores, las velocidades reguladas de trabajo del

² Se podría seleccionar cualquier otro tiempo de temporización, esto está a favor de cliente y las condiciones ambientales a la que se encuentra.

motor mediante su variador de frecuencia y los parámetros de funcionamiento del motor.

Tabla 26 Las características de los reductores y los parámetros de funcionamiento del motor

Motores	Acimut (Giro)	Altura (Inclinación)	mOTOR Autolimpieza
Reductor acoplado	De ejes paralelos	De tornillo son fin de doble eje	--
Relación de transmisión (i)	1:1813	1:3108	--
Velocidad de trabajo del motor [rpm]	180	390	215
Par motor [Nm]	2356.9	40040.4	7.5
Potencia motor [W]	90	90	1100

Por otro lado, en la Tabla 27, los análisis de esfuerzos mediante las teorías físicas y análisis de elementos finitos, demuestran que los ejes del motor y tubo hueco del pedestal son capaces de resistir las cargas aplicadas sin causar las fallas. De las mismas maneras, el par motor aplicado sobre los ejes no provocan fallas.

Tabla 27 Análisis de esfuerzo del sistema

Análisis de refuerzos	Motor Acimut	Motor Altura	Pedestal
∅ eje/tubo hueco [mm]	90	60	200x3
Longitud [m]	0.7	1	2.5
Carga aplicado [Kg]	1225.37	932.3	1564
Tensión de VM [MPa]	23.51	53.82	210.9
$\sigma_{\text{elástico}}$ [MPa]	275	275	275
Par motor ejercido [Nm]	2356.9	40040.4	--
Par máx. soportado [Nm]	51121	10602.9	--
Carga crítica de pandeo [Kg]	--	--	14384.2

Frente al diseño de control, se ha implementado diagrama de alto y bajo nivel para comprender el funcionamiento del sistema y, con estos conocimiento, se puede programar en cualquier microcontrolador.

En cuanto al diseño eléctrico, por limitación de tiempo, solo se ha podido indicar los componentes eléctricos del optimizador de paneles solares e implementar el esquema eléctrico de potencia.

Por último, las propiedades del optimizador de paneles solares se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28 Propiedades del optimizador de paneles solares

Optimizador de paneles fotovoltaicos	
Célula fotovoltaica	Silicio monocristalino
N.º de paneles	12,00
Superficie de captación	26,08m ²
Tensión mín.	288V
Tensión máx.	498V
Intensidad de corriente	11.85A
Potencia de producción	5,40KW
Largura	6,40m
Anchura máx.	4,548m
Altura máx.	5,28m
Peso	1710Kg
Material de la estructura	Acero al carbono S275JR
Tipología de seguimiento	Seguidor de dos eje Acimut-Altitud
Estrategia de seguimiento	Programación astronómica
Resistencia del viento máx.	19m/s o 68,4Km/h
Carga máx. del viento	2400 Pa
Carga máx. de la nieve	5400 Pa
Ubicación	Universal

6. CONCLUSIONES

Este proyecto está enfocado en aumentar el rendimiento de producción de la energía eléctrica a través de los paneles fotovoltaicos.

Se propuso alcanzar 4 objetivos fundamentales: 25m² de superficie de paneles solares, el diseño del sistema de seguimiento solar, el sistema de autolimpieza y el sistema de suciedad y degradación.

He logrado los 3 primeros objetivos. El sistema de seguimiento solar para mejorar la eficiencia de captación de la radiación solar, 25.78% más que los sistema fijos. Y el sistema de autolimpieza, para evitar o reducir las suciedades que disminuyen el rendimiento de producción de los paneles fotovoltaicos e incluso reducen su vida útil. Estos sistemas efectúa sobre una superficie de 26.08m² de paneles solares.

No obstante, por la limitación del tiempo, los recursos y la innovación sobre el sistema de autolimpieza que hoy en día no existe, no he podido lograr implementar el último objetivo, sistema detección de suciedad y degradación. Este último sistema es fundamental para evitar o reducir la degradación y mantenimiento de los paneles solares.

La mayor dificultad que he enfrentado durante este proyecto es encontrar los componentes comerciales apropiados para la implementación del diseño mecánico. Esto es debido a que la dimensión de nuestro optimizador de paneles solar es inmensa y es poco común frente a los otros seguidores solares que hay en el mercado. También, la masa de todos los componentes que constituye el optimizador para el cálculo y selección del motor y la estabilidad del sistema. Aun así, la mayor parte de los componentes son elementos comerciales y representado en los planos mecánicos.

En cuanto al diseño del sistema de control, se basa en los diagramas de altos y bajo nivel. Estos diagrama representa la filosofía de planificación o funcionamiento del sistema que se puede describir para cualquier código de programación del microcontrolador. Además, con estos diagramas podemos determinar definitivamente los componentes que necesitamos para rectificar los diseños mecánicos y eléctricos.

Respecto al diseño eléctrico, implantaríamos el sistema de detección de suciedad y degradación, el circuito de control y el regulador que suministra energía eléctrica a los componentes eléctricos. Durante el proyecto he mencionado este sistema en algunos momentos con la idea de desarrollarla, pero no ha sido posible por la limitación del tiempo. A pesar de esto, he decido implementar un circuito general de potencia del sistema.

Por último, las mejoras para la evolución en el futuro sería desarrollar sistema detección de suciedad y degradación mediante la

medición de curva IV para estudiar la degradación de los paneles solares. Implementar los planos eléctricos con los componentes del sistema de optimizador de paneles fotovoltaicos y sus secciones de líneas y protecciones. Describir los códigos de programación del microcontrolador para el sistema de control.

7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado están alineados con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y metas, de la Agenda 2030:

- Objetivo 4 - Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos



- Meta 4.4 De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de jóvenes y adultos que tienen las competencias necesarias, en particular técnicas y profesionales, para acceder al empleo, el trabajo decente y el emprendimiento

- Objetivo 8 - Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos



- Meta 8.2 Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra

- Objetivo 7 – Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna



- Meta 7.2 – De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuente de energía.

- Objetivo 12 – Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus defectos.



- Meta 13.3 – Mejorar la educación, la sensibilidad y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus defectos y la alerta temprana.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abio Morales, G. de. (2019, febrero 26). *¿QUÉ ES UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA?* METEOCULTURA - ESTACIONES METEOROLÓGICAS & METEOROLOGÍA.
<https://estaciondemeteorologia.com/que-es-una-estacion-meteorologica/>
- Alfaro, L. (2022, septiembre 9). *¿Qué es una bomba de lavado de parabrisas y cómo funciona?*
<https://digitaldeleon.com/curiosidades/bomba-de-lavado-que-es-funciones/>
- Arrieta Morelo, D. J., & Puello Bravo, S. Y. (2018). *Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo.*
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/693>
- AutoSolar. (2023, abril 27). *Panel Solar 450W 24V Monocristalino PERC ERA* | AutoSolar. <https://autosolar.es/panel-solar-24-voltios/panel-solar-450w-24v-monocristalino-era>
- Balaguer-Zueco, S. (2016). *Seguidor solar de dos ejes*. 179.
- Baumer. (2023). *Sensor Capacitivo—CFAM 12N1600.*
<https://www.baumer.com/us/en/p/25810>

Cambio energético. (2021, diciembre 16). *Células Solares: Qué son, como funcionan y qué tipos existen*. Tu blog de Autoconsumo fotovoltaico y energía renovable.
<https://www.cambioenergetico.com/blog/celulas-solares-fotovoltaicas/>

Coordenada solar. (2023). Pinterest.
<https://co.pinterest.com/pin/310748443013783306/>

Corefluid. (2023). *Bomba centrífuga Ebara modelo CMD/I 1,50 T 1,1 KW. 230/400 V.* - Corefluid. <https://www.corefluid.es/product/bomba-centrifuga-ebara-modelo-cmd-i-150-t-11-kw-230-400-v/>

DesQbre. (2021, noviembre 28). Origen y evolución. *Descubre La Energía*. <https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/sobre-la-energia/origen-y-evolucion/>

DS New Energy. (2019, febrero 25). *Tecnología de células solares CIGS - Conocimiento—DS New Energy*. SD Nuevo Energía.
<http://www.dsisolar.com/info/cigs-solar-cell-technology-32862127.html>

EDUTEL. (2008a). *TÉCNICO INSTALADOR EN ENERGÍA SOLAR - MÓDULO 1*. EDUTEL.

EDUTEL. (2008b). *TÉCNICO INSTALADOR EN ENERGÍA SOLAR - MÓDULO 2*. EDUTEL.

EDUTEL. (2008c). *TÉCNICO INSTALADOR EN ENERGÍA SOLAR - MÓDULO*

3. EDUTEL.

Enerdata. (2019, septiembre 30). *Estadísticas de consumo energético mundial* | Enerdata. <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>

Eraso, F. J., Erazo, O. F., Escobar, E., Eraso, F. J., Erazo, O. F., & Escobar, E. (2019). Modelo para la estimación de potencia eléctrica en módulos fotovoltaicos de tecnología basada en silicio. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(2), 188-196. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000200188>

ESPRESSIF. (2023). *ESP32-S3-DevKitC-1 v1.1—ESP32-S3—ESP-IDF Programming Guide latest documentation*. <https://docs.espressif.com/projects/espressif-idf/en/latest/esp32s3/hw-reference/esp32s3/user-guide-devkitc-1.html#user-guide-s3-devkitc-1-v1-1-board-front>

Gamez, M. J. (2023). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Gomez-Azpeitia, L. G. (2015). *Posición relativa del plano del ecuador y de la eclíptica*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/figure/Figura-13-Posicion-relativa->

del-plano-del-ecuador-y-de-la-ecliptica-que-define-
la_fig3_312576876

Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N.,
Bothe, K., Hinken, D., Rauer, M., & Hao, X. (2022). Solar cell
efficiency tables (Version 60). *Progress in Photovoltaics: Research
and Applications*, 30(7), 687-701.
<https://doi.org/10.1002/pip.3595>

Grupo ABB. (2023). *Motores y generadores ABB*. Motors and Generators.
<https://new.abb.com/motors-generators/es>

Gutiérrez, D. H. G., & Chávez, V. E. R. (2012). *Implementación de
seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES*. 138.

H-TRONIC GmbH. (20). *Sensor de lluvia—Regensensor RS 12*. H-
TRONIC. <https://www.h-tronic.de/en/Rain-Sensor-RS-12/1115275>

Ingenierizando. (2022, noviembre 18). ▷ Relación de transmisión.
Ingenierizando. [https://www.ingenierizando.com/maquinas-y-
mecanismos/relacion-de-transmision/](https://www.ingenierizando.com/maquinas-y-mecanismos/relacion-de-transmision/)

INVESTIGANDO LA ENERGÍA. (2021, marzo 21). *Un paseo por la historia
de la energía*.
[https://descargas.intef.es/cedec/proyectoedia/fisica_quimica/cont
enidos/investigando_energia/un_paseo_por_la_historia_de_la_en
erga.html](https://descargas.intef.es/cedec/proyectoedia/fisica_quimica/contenidos/investigando_energia/un_paseo_por_la_historia_de_la_energia.html)

Metinvest. (2021, mayo 21). *Acero S275JR: Características, propiedades, análogos* -. <https://metinvestholding.com/es/products/steel-grades/s275jr>

Oborudow. (2019, septiembre 30). *¿De qué está hecha la bomba del lavaparabrisas? Limpiaparabrisas, lavaparabrisas, «limpiaparabrisas»: Dispositivo, características, esquema de trabajo. Bomba lavaparabrisas—Averías y sus causas.* <https://oborudow.ru/es/exterior/iz-chego-sostoit-nasos-obmyva-lobovogo-stekla-stekloochistitel-omyvatel-dvorniki---ustroistvo/>

Ortiz, I. U. (2020). *TEMA 1. DISEÑO POR RESISTENCIA ESTÁTICA.*

Osorio-R., J. C. (2010). Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico [Review of *Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico*, por A. Escobar-Mejía & M. Holguín-Londoño]. *Scientia et Technica*, 1(44), 245-250. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4566789>

Ospina-Agudelo, B. (2018). *Estimación de la degradación de parámetros electricos asociados al desempeño de modulos fotovoltaicos mediante el analisis de las curvas corriente-voltaje de un arreglo en serie.*

Pelayo López, J. A., Luna Soto, A., Bernabe Ramos, F., & Guzmán Flores, B. (2018). Comparativa entre la eficiencia de un sistema

fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 6(12), 115-140.
<https://doi.org/10.23913/ciba.v6i12.71>

Redacción. (2021, febrero 22). *¿Qué tipos de conexiones para los paneles solares existen?* [CollectionText]. Noticias de la Ciencia y la Tecnología (Amazings® / NCYT®); Noticias de la Ciencia. <https://noticiasdela ciencia.com//art/41104/que-tipos-de-conexiones-para-los-paneles-solares-existen>

Reguera Gil, F. J. (2015). *Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos* [masterThesis, Universidad Internacional de Andalucía]. <https://dspace.unia.es/handle/10334/3524>

Rodriguez, E. (2017, 05). *Efecto Foelectrico*. <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-foelectrico.html>

Rúa-Ramírez, E., Mendoza-Jiménez, I., Torres-Suarez, E., Flórez-Serrano, E., & Serrano-Rico, J. (2021). Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), Article 2. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021001>

Rubber Fab. (2023). Tubos de PFA - Tubos de Resistencia Química—

Rubber Fab. *RubberFab.*

<https://rubberfab.com/es/products/tubing/pfa-tubing/>

Salas-Moyano, R. (2021, abril 12). LIMPIAPARABRISAS AUTOMÁTICO (SENSOR DE LLUVIA). *MECANICA PARA TODOS.*

<https://mecanicaparatodosblog.wordpress.com/2021/04/12/limpiaparabrisas-automatico-sensor-de-lluvia/>

Sanz, M. (2021, julio 20). Todo lo que debes saber sobre el telururo de cadmio. *NextCity Labs.* <https://nextcitylabs.com/global/es/todo-lo-que-debes-saber-sobre-el-telururo-de-cadmio/>

Tipler, A. T., & Mosca, G. (2010). *Física para la ciencia y la tecnología, Vol. 1* (6ª, Vol. 1). Editorial Reverté.

Vitos, Á. C. F., & Idiarte, E. V. (2007). *Automatización del Proceso de Ensamblaje del Soporte del Sensor de Lluvia en Parabrisas de Automóviles.*

Yaskawa. (2023). *Serie V1000.* https://www.yaskawa.es/productos/ac-drives/legacy-drives/seriesdetail/serie/serie-v1000_515

力学 Nerd 王小胖. (2020). *胶在玻璃上摩擦力* [Universidad de Nanjing]. <https://www.toutiao.com/answer/6769943602098340100/?wid=1685384558649>



Relación de documentos

Memoria	126	páginas
Anexos I Elementos comerciales	802	páginas
Planos	42	páginas

La Almunia, a 18 de noviembre de 2023

**CHEN
ZHONG
X605431
3T**

Firmado digitalmente por
CHEN ZHONG - X6054313T
DN: C=ES, SERIALNUMBER
=IDCES-X6054313T, G=
ZHONG, SN=CHEN, CN=
CHEN ZHONG - X6054313T
Razón: Soy el autor de este
documento
Ubicación:
Fecha: 2023.11.18
02:01:53
+01'00'
Foxit PDF Reader Versión:
2023.2.0

Firmado: Zhong Chen