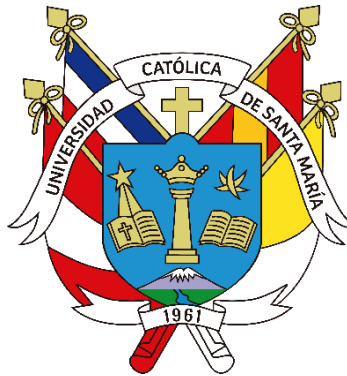


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y
Mecatrónica



**Diseño de un sistema móvil de captación y redireccionamiento de
radiación solar para condiciones climatológicas de la ciudad de Arequipa**
Perú

Tesis presentada por el Bachiller:

Enciso Ureta, Mauricio Jesús

ORCID: 0009-0002-6508-3954

para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Asesor (a):

Dr. Fernández Barriga, Camilo Grimaldo

ORCID: 0000-0001-5273-5509

Arequipa - Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 10 de Diciembre del 2024

Dictamen: 009238-C-EPIMMEM-2024

Visto el borrador del expediente 009238, presentado por:

2012201211 - ENCISO URETA MAURICIO JESUS

Titulado:

**DISEÑO DE UN SISTEMA MÓVIL DE CAPTACIÓN Y REDIRECCIONAMIENTO DE RADIACIÓN
SOLAR PARA CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE LA CIUDAD DE AREQUIPA PERÚ**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO MECÁNICO

**30857994 - GORDILLO ANDIA CARLOS ALBERTO
DICTAMINADOR**



**21535915 - DONAYRE CAHUA JESUS MANUEL
DICTAMINADOR**



**40386948 - VALDEZ LOAIZA JUAN CARLOS
DICTAMINADOR**



Diseño de un sistema móvil de captación y redireccionamiento de radiación solar para condiciones climatológicas de la ciudad de Arequipa Perú

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
3	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1%
4	cio.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	<1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Mauricio Vicente Enciso Miranda y Maria Esperanza Ureta Alemán, quienes con su amor incondicional, esfuerzo incansable y sabios consejos han sido el pilar más importante en mi vida. Gracias por ser mi ejemplo de perseverancia y por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo, dedicación y fe.

A mi novia, Karem, por su amor, comprensión y apoyo constante. Gracias por caminar a mi lado en cada etapa de este desafío, brindándome aliento y motivación para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mis hermanas, Claudia y Fiorella, por ser mis compañeras de vida y una fuente constante de inspiración. Su cariño, apoyo y confianza me han impulsado a superar cada obstáculo y a crecer tanto personal como profesionalmente.

Este logro es para todos ustedes, que han sido mi inspiración, mi fuerza y mi motivación para llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la salud, la fortaleza y las oportunidades necesarias para alcanzar este importante logro en mi vida.

A mis padres, Mauricio Vicente Enciso Miranda y María Esperanza Ureta Alemán, a quienes debo todo lo que soy. Su amor, sacrificio y confianza en mis capacidades han sido mi mayor motivación. Gracias por brindarme las herramientas y enseñanzas necesarias para enfrentar cada desafío con determinación y optimismo.

Agradezco profundamente al Instituto INNOVERGY, cuya colaboración técnica y recursos hicieron posible llevar a cabo esta investigación. En especial, extendo mi agradecimiento al Dr. Hugo Guillermo Jiménez Pacheco, director del Instituto INNOVERGY, por su liderazgo, apoyo y visión, que fueron clave para el desarrollo de este proyecto.

A mi asesor, el Dr. Camilo Fernández Barriga, por su orientación, paciencia y valiosas enseñanzas durante el desarrollo de este trabajo. Su guía fue esencial en el proceso y me ayudó a consolidar este logro académico.

De manera especial, expreso mi agradecimiento a Karem Vásquez, David Manrique y a Mark Zavala, quienes estuvieron presentes en momentos clave, brindándome su apoyo en esta tesis. Su disposición para darme una mano y su compromiso fueron fundamentales para superar desafíos y alcanzar los objetivos de este proyecto.

Finalmente, agradezco a la Universidad Católica de Santa María, a los docentes que formaron parte de mi formación académica, y a mis amigos, quienes con su ánimo y compañía hicieron de este camino una experiencia enriquecedora y llena de aprendizaje.

La presente tesis fue financiada por la Universidad Católica de Santa María bajo el contrato N° según Resolución No. 30166-R-2024, dentro del Fondo de Investigación para la Ejecución del Proyecto 2022-I

RESUMEN

El aumento de la contaminación por energías convencionales ha impulsado el desarrollo de energías renovables. Entre estas, los paneles solares bifaciales destacan por captar luz solar en ambos lados, generando más energía que los paneles tradicionales. Este proyecto buscó diseñar, caracterizar y construir un sistema móvil de captación y redireccionamiento de radiación solar, empleando paneles bifaciales adaptados al clima de Arequipa, Perú.

Primero, se recopiló información climática relevante y se estudiaron las características de la celda fotovoltaica seleccionada. A continuación, se diseñó una celda con tamaño personalizado, estableciendo parámetros específicos para optimizar su funcionamiento. Un aspecto crucial fue evaluar la radiación en ambas caras de la celda. Para esto, se utilizó un modelo en ANSYS®, con el cual se analizó cómo la radiación y la temperatura influyen en la producción energética. Con estos datos, se calculó la capacidad de generación del prototipo y se replicó este procedimiento de forma simplificada en un panel estático para comparar ambos sistemas.

El prototipo final fue construido mediante un proceso de laminación que permitió integrar las celdas bifaciales y optimizar la captación de radiación en ambas caras. Los resultados del modelado se validaron con los datos obtenidos del prototipo, obteniendo un error relativo del 19.3%. Además, se observó una ganancia bifacial de entre el 27% y el 35% en comparación con el panel estático.

Este sistema portátil demostró ser una solución viable para maximizar la producción de energía en diferentes entornos y condiciones, siendo escalable y adaptable a distintas aplicaciones.

PALABRAS CLAVE: Celda fotovoltaica, bifacial, radiación, redirección solar

ABSTRACT

The increase in pollution from conventional energies has driven the development of renewable energies. Among these, bifacial solar panels stand out for capturing sunlight on both sides, generating more energy than traditional panels. This project sought to design, characterize, and build a mobile solar radiation capture and redirection system, using bifacial panels adapted to the climate of Arequipa, Peru.

First, relevant climate information was collected, and the characteristics of the selected photovoltaic cell were studied. Next, a custom-sized cell was designed, establishing specific parameters to optimize its operation. A crucial aspect was to evaluate the radiation on both sides of the cell. For this, a model in ANSYS® was used, with which it was analyzed how radiation and temperature influenced energy production. With this data, the generation capacity of the prototype was calculated, and this procedure was replicated in a simplified form on a static panel to compare both systems.

The final prototype was built using a lamination process that allowed the integration of bifacial cells and optimized radiation capture on both sides. The modelling results were validated with the data obtained from the prototype, obtaining a relative error of 19.3%. In addition, a bifacial gain of between 27% and 35% was observed compared to the static panel.

This portable system proved to be a viable solution to maximize energy production in different environments and conditions, being scalable and adaptable to different applications.

KEYWORDS: Photovoltaic cell, bifacial, radiation, solar redirection

ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
Introducción	1
Capítulo I	2
1. Antecedentes	2
1.1. Determinación del problema	2
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Campo y línea de desarrollo.....	4
1.4. Objetivos de la investigación	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	5
1.5.1. Justificación social.....	5
1.5.2. Justificación ambiental.....	5
1.6. Identificación de variables	5
1.6.1. Variables independientes.....	5
1.6.2. Variables dependientes.....	6
1.7. Hipótesis de la investigación.....	6
1.8. Alcances.....	6
Capítulo II	7
2. Marco teórico	7
2.1. Estado del arte	7
2.1.1. Energías renovables	7
2.1.2. Energía solar	8
2.1.3. Instalaciones fotovoltaicas.....	12
2.1.4. Elementos de una instalación fotovoltaica	13
2.1.5. El panel solar	14
2.1.6. Paneles fotovoltaicos convencionales y paneles fotovoltaicos bifaciales	15
2.1.7. Sistemas fotovoltaicos bifaciales	17
2.1.8. Tipos de seguidores solares	20
2.1.9. Antecedentes.....	22
2.2. Bases teóricas.....	25
2.2.1. Descripción y clasificación.....	25
2.2.2. Principios dinámicos	45

2.2.3.	Principios estructurales.....	48
2.2.4.	Materiales y recursos.....	50
2.3.	Normas y procedimientos aplicables.....	50
2.3.1.	Metodología VDI 2221.	50
Capítulo III	.....	52
3.	Dimensionamiento y simulación.....	52
3.1.	Cálculo analítico teórico preliminar.....	52
3.1.1.	Análisis preliminar.....	52
3.1.2.	Diseño preliminar del sistema.....	54
3.1.3.	Diseño y modelamiento general.....	59
3.2.	Evaluación y simulación.....	72
3.2.1.	Simulación computacional FEA.....	72
3.3.	Diseño y modelamiento de componentes.....	79
3.3.1.	Cálculo de la estructura inferior.....	79
3.3.2.	Cálculo de la Estructura utilizando el Método de la Matriz de Rigidez.....	85
3.3.3.	Caja reductora.....	90
3.3.4.	Selección de actuadores.....	96
Capítulo IV	.....	99
4.	Construcción prototipo a nivel laboratorio.....	99
4.1	Selección de materiales.....	99
4.1.1.	Panel fotovoltaico bifacial.....	99
4.1.2.	Estructura:.....	101
4.1.3.	Sistema de transmisión:.....	101
4.2	Selección de procesos de manufactura.....	101
4.3	Adquisición de actuadores y accesorios.....	102
4.3.1.	Motor NEMA.....	103
4.3.2.	Controlador PWM.....	103
4.3.3.	Batería.....	103
4.3.4.	Carga.....	103
4.4	Ensamblaje general del sistema prototipo.....	104
4.4.1	Fabricación del panel bifacial:.....	104
4.4.2	Estructura:.....	105
4.4.3	Sistema de transmisión:.....	106
4.4.4	Conexiones eléctricas:.....	107
4.4.5	Costos:.....	108
Capítulo V	.....	112
5.	Estudio experimental.....	112

5.1	. Condiciones de operación	112
5.2	. Adquisición de datos.	112
Capítulo VI	.....	113
6.	Resultados	113
6.1.	Resultados obtenidos.	113
6.1.1.	Resultados simulación temperatura.....	113
6.1.2.	Resultados simulación eléctrica Matlab Simulink	114
6.1.3.	Resultados del cálculo de la estructura inferior.	116
	Principales variables de salida	116
6.1.4.	Resultados del cálculo de la estructura mediante la matriz de rigidez	117
6.1.5.	Resultados cálculo de pernos	119
6.1.6.	Resultados del cálculo de engranajes y ejes	120
	Principales variables de salida: Cálculo de ejes de la caja reductora (Con valores)	121
6.1.7.	Resultados simulación producción energética	123
6.2.	Resultados finales.....	127
Conclusiones	.....	129
Recomendaciones	.....	131
Referencias bibliográficas	.....	133
ANEXOS	.....	136
	Anexo A: Programa en el software EES para la relación de la radiación absorbida.	136
	Anexo B: Código usado en Matlab para la curva I-V y P-I.	137
	Anexo C: Programa en el software Matlab-Simulink para el modelado eléctrico ...	138
	Anexo D: Programa en el software EES para la producción energética.....	141
	Anexo E: Programa en el software EES para el diseño y modelamiento de componentes	145
	Anexo F: Datos de la celda fotovoltaica.	155
	Anexo G: Adquisición de datos.	156
	Anexo H: Código del motor	159
	Anexo I: Planos.....	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla.2.1.	<i>Parámetros de los sistemas LCPV con paneles fotovoltaicos bifaciales ..</i>	24
Tabla.2.2	<i>Módulos normalizados</i>	47
Tabla.2.3.	<i>Esfuerzo flexionante admisible aproximado en engranajes de plástico....</i>	49
Tabla.2.4.	<i>Factor de Lewis para engranajes de plástico.</i>	49
Tabla.3.1.	<i>Lista de exigencias</i>	52
Tabla.3.2.	<i>Matriz morfológica</i>	53
Tabla.3.3.	<i>Ensamble del prototipo dividido por los sistemas principales</i>	58
Tabla.3.4.	<i>Datos climáticos y geográficos de ubicación planteada (Arequipa-Perú)</i>	59
Tabla.3.5	<i>Datos del panel bifacial conformado por las celdas adaptadas.....</i>	59
Tabla.3.6.	<i>Datos de las diferentes capas de la simulación térmica.</i>	62
Tabla.3.7.	<i>Estadísticas del mallado aplicado a todas las capas (simulación térmica).....</i>	62
Tabla.3.8.	<i>Materiales utilizados (simulación térmica).</i>	63
Tabla.3.9.	<i>Parámetros de referencia para la celda bifacial</i>	65
Tabla.3.10.	<i>Estadísticas del mallado empleado para el solucionador Trasient Sturctural.</i>	74
Tabla.3.11.	<i>Materiales usados en la simulación en mechanical.</i>	74
Tabla.3.12.	<i>Estadísticas del mallado empleado para el solucionador Fluid Flow CFX.....</i>	76
Tabla.4.1.	<i>Tabla del proceso seguido para la laminación del panel fotovoltaico bifacial.</i>	105
Tabla.4.2.	<i>Costos de compra de materiales para la fabricación del prototipo.</i>	109
Tabla.4.2.	<i>Costos de compra de materiales para la fabricación del prototipo.</i>	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. <i>Estructura del sol.</i>	9
Figura 2.2. <i>Radiación global con sus respectivos componentes y cómo inciden en un panel fotovoltaico.</i>	10
Figura 2.3. <i>Fotovoltaica aplicada en edificios.</i>	13
Figura 2.4. <i>Partes de una instalación fotovoltaica.</i>	14
Figura 2.5. <i>Estructura y configuración de una celda fotovoltaica bifacial y monofacial.</i>	16
Figura 2.6.(a-d) <i>posibilidades para instalaciones de módulos bifaciales y (e) Comparación de generación de energía, Curvas de operación para módulos monofaciales y bifaciales</i>	18
Figura 2.7. <i>Unión p-n de una celda fotovoltaica.</i>	19
Figura 2.8. <i>Concentradores solares fabricados en Solar Wind Company en Krasnodar-Rusia (a) Concentradores solares de cresta con seguidor solar (Planta de energía fotovoltaica de 0,5 MW), (b) Concentrador pseudo parabólico TRAXLE con paneles fotovoltaicos bifaciales construido en Praga y (c) Segunda variante del concentrador pseudo parabólico con paneles fotovoltaicos bifaciales construido en Ryazan....</i>	24
Figura 2.9. (a) <i>Ángulo de Zenith, Pendiente, Angulo de azimut de la superficie y ángulo de azimut solar para una superficie inclinada; (b)Vista superior del ángulo de azimut solar</i>	27
Figura 2.10. <i>Irradiación mensual global hallada mediante PVGIS.</i>	30
Figura 2.11. <i>Curvas típicas I-V y P-V para un módulo fotovoltaico.</i>	39
Figura 2.12. <i>Circuito equivalente para un generador fotovoltaico.</i>	41
Figura 3.1. <i>Diagrama de flujo del proceso seguido para el diseño del prototipo planteado.</i>	54
Figura 3.2. <i>Esquema de la celda fotovoltaica a emplearse proporcionado por el fabricante</i>	55
Figura 3.3. <i>Configuración empleada para las celdas.</i>	56
Figura 3.4. <i>Configuración empleada para el panel.</i>	57
Figura 3.5. <i>Número de ecuaciones y variables del programa del Anexo A.</i>	61
Figura 3.6. <i>Cargas térmicas aplicadas a las distintas capas.</i>	63
Figura 3.7. <i>Circuito equivalente para una celda fotovoltaica bifacial.</i>	66
Figura 3.8. <i>Modelado en el software Simulink del panel bifacial.</i>	67
Figura 3.9. <i>Grafica P-V a las condiciones de referencia para ambas caras del panel fotovoltaico bifacial.</i>	68
Figura 3.10. <i>Número de ecuaciones y variables del programa del Anexo D.</i>	72
Figura 3.11. <i>Geometría exportada del software Inventor y editada en SpaceClaim.</i>	73
Figura 3.12. <i>Mallado empleado para el solucionador Trasient Sturctural.</i>	73
Figura 3.13. <i>Materiales aplicados a las zonas respectivas (a)Acero inoxidable (b)Aluminio</i>	74

Figura 3.14. <i>Condiciones de contorno aplicadas a él solucionador Trasient Sturctural (a)Soporte cilíndrico, (b)Apoyo fijo y (c)System Coupling Región.</i>	75
Figura 3.15. <i>Mallado empleado para el solucionador Fluid Flow CFX) vista sección (mallado interior en 2D).</i>	76
Figura 3.16. <i>Condiciones de contorno aplicadas a él solucionador Fluid Flow CFX (a)Inlet, (b)Outlet y (c)Walls.</i>	77
Figura 3.17. <i>Convergencia de las ecuaciones de ambos solucionadores.</i>	77
Figura 3.18. <i>Contorno de velocidad aplicado a un plano y contorno de presiones aplicado a la superficie system Coupling.</i>	78
Figura 3.19. <i>Vectores de velocidad del flujo del fluido.</i>	79
Figura 3.20. <i>Diagrama de cuerpo libre de la estructura en el plano x-y.</i>	80
Figura 3.21. <i>Diagrama de cuerpo libre del soporte 3D y las columnas.</i>	81
Figura 3.22. <i>Esquema de las columnas y cambio de coordenadas.</i>	81
Figura 3.23. <i>Esquema isométrico del interior de la caja reductora.</i>	82
Figura 3.24. <i>Diagrama de cuerpo libre de la sección transversal del elemento analizado.</i>	83
Figura 3.25. <i>Vista de sección del ángulo para el análisis de esfuerzo cortante puro</i>	84
Figura 3.26. <i>Estructura superior sistema de reflexión.</i>	86
Figura 3.27. <i>Nodos de la estructura analizada.</i>	86
Figura 3.28. <i>Cargas aplicadas a la estructura analizada.</i>	88
Figura 3.29. <i>Esquema isométrico del interior de la caja reductora.</i>	91
Figura 3.30. <i>Diagrama de cuerpo libre del engranaje inicial del eje 2.</i>	92
Figura 3.31. <i>Diagrama de cuerpo libre del engranaje final del eje 2.</i>	93
Figura 3.32. <i>Diagrama de cuerpo libre de los engranajes intermedios del eje 2.</i>	93
Figura 3.33. <i>Diagrama de cuerpo libre del eje 3.</i>	95
Figura 3.34. <i>Diagrama de cuerpo libre del eje 1.</i>	95
Figura 3.35. <i>Número de ecuaciones y variables del programa del Anexo E.</i>	96
Figura 4.1. <i>Estructura interna de un panel fotovoltaico.</i>	99
Figura 4.2. <i>(a)Parte superior de la estructura, (b)Base de la estructura ensamblada y (c) Estructura terminada.</i>	106
Figura 4.3. <i>Pruebas de conexión eléctrica sin el sistema de movimiento.</i>	108
Figura 4.4. <i>Prototipo ensamblado.</i>	108
Figura 6.1. <i>Filtro de temperatura a las caras de celda fotovoltaica bifacial.</i>	113
Figura 6.2. <i>Carta paramétrica de los datos de la variación de radiación a la cara posterior.</i>	114
Figura 6.3. <i>(a)Gráficas de I-V y (b)P-V para distintos flujos de radiación aplicados a la cara posterior del panel fotovoltaico bifacial.</i>	115
Figura 6.4. <i>(a)Diagrama de fuerza cortante de la estructura, (b) Diagrama de momento flector de la estructura y (c) Fuerzas axiales en la estructura.</i>	119

Figura 6.5. <i>Diagrama de momento flector del eje 2 en el plano x-y.</i>	121
Figura 6.6. <i>Diagrama de momento flector del eje 2 en el plano x-z.</i>	121
Figura 6.7. <i>Diagrama de momento flector del eje 3 en el plano x-y.</i>	122
Figura 6.8. <i>Diagrama de momento flector del eje 3 en el plano x-z.</i>	122
Figura 6.9. <i>Gráfica de la energía producida, la carga alimentada, energía proporcionada a la carga y la cantidad de energía que supera la carga para el sistema fotovoltaico bifacial con seguidor solar y redirección de radiación.</i>	123
Figura 6.10. <i>Gráfica de la energía producida, la carga alimentada, energía proporcionada a la carga y la cantidad de energía que supera la carga para el sistema fotovoltaico bifacial estático y sin redirección de radiación.</i>	124
Figura 6.11. <i>Gráfica de la energía producida al día por el sistema con redirección vs el sistema sin redirección.</i>	125
Figura 6.12. <i>Gráfica generada de los datos adquiridos el día (10/03/2024) vs día (08/03/2024).</i>	126
Figura 6.13. <i>Gráfica generada de los datos adquiridos el día (11/03/2024) vs día (08/03/2024).</i>	127

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidad
G_{sc}	constante solar	$[W/m^2]$
I	Irradiación solar global terrestre sobre una superficie horizontal para una hora	$[J/m^2]$
I_0	Irradiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal para una hora	$[J/m^2]$
\bar{I}_0	Irradiación solar extraterrestre promedio mensual sobre una superficie horizontal para una hora	$[W \cdot h/m^2]$
I_T	Irradiación solar total sobre una superficie inclinada	$[W \cdot h/m^2]$
\bar{I}_T	Irradiación solar extraterrestre promedio mensual sobre una superficie inclinada para una hora	$[W \cdot h/m^2]$
\bar{H}	Irradiación solar promedio mensual sobre una superficie horizontal para un día	$[W \cdot h/m^2]$
\bar{H}_d	Irradiación solar difusa sobre una superficie horizontal para un día	$[W \cdot h/m^2]$
I_T	Irradiación solar total sobre una superficie inclinada	$[W \cdot h/m^2]$
\bar{H}_o	Irradiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal para un día	$[W \cdot h/m^2]$
δ	Ángulo de declinación solar	$[^\circ]$
θ	Ángulo de inclinación de la cubierta receptora	$[^\circ]$
ϕ	Latitud de la zona de instalación	$[^\circ]$
ω	Ángulo de hora	$[^\circ]$
ω_s	Ángulo horario de ocaso	$[^\circ]$
θ_z	Ángulo de Zenit	$[^\circ]$

γ_z	Ángulo de azimut solar	[°]
β	Ángulo que representa la pendiente del panel	[°]
γ	Ángulo de azimut de la superficie	[-]
r_d	Relación entre la radiación difusa horaria y la radiación difusa diaria	[-]
r_t	Relación entre la radiación total horaria y la radiación total diaria	[-]
$\overline{K_T}$	Índice de claridad promedio mensual	[-]
R_b	Relación entre la radiación de haz en la superficie inclinada con la superficie horizontal	[-]
$\tau\alpha$	Producto de la transmitancia – absorbancia efectiva	[-]
$G_{T,NOCT}$	Radiación solar incidente a las condiciones de la temperatura nominal de funcionamiento de la celda	[W·h/m ²]
T_{NOCT}	Temperatura nominal de funcionamiento de la celda	[°C]
$T_{a,NOCT}$	Temperatura ambiente a las condiciones de la temperatura nominal de funcionamiento de la celda	[°C]
$U_{L,NOCT}$	Coefficiente de pérdidas por convección y radiación desde arriba y desde abajo y por conducción a través de cualquier estructura de montaje	[-]
$\eta_{mp,ref}$	Eficiencia referencial en el punto de máxima potencia del arreglo	[%]
μ_{mp}	Coefficiente de eficiencia de temperatura del punto de máxima potencia	[-]
T_{ref}	Temperatura de la celda de referencia	[°C]
η_{im}	Eficiencia del módulo promedio mensual para cada hora	[%]

A_c	Área del arreglo	[m ²]
N_p	Número de paneles del arreglo	[-]
$X_{c,i}$	Radiación crítica adimensional para cada hora del día	[-]
E_{im}	Producción de energía eléctrica promedio mensual para cada hora del día	[W]
φ	Utilizabilidad	[-]
$E_{ex,im}$	Exceso de energía promedió mensual para cada hora del día	[W]
$E_{L,im}$	Energía suministrada a la carga promedio mensual para cada hora del día	[W·h]
$E_{ex,m}$	Exceso de energía diario promedio mensual	[W·h]
$E_{L,m}$	Energía suministrada a la carga promedio mensual para un día	[W·h]

Introducción

En la actualidad, podemos apreciar diferentes iniciativas hacia el uso de energías verdes por ser limpias y sostenibles. Esto ha incrementado el interés en estudios, investigaciones, desarrolladores, fabricantes y entidades privadas a realizar esfuerzos en la optimización de hacer uso de estas de manera más eficiente cada vez. Sin embargo, el nivel de madurez tecnológica actual en nuestra región es muy escaso, tanto en el entorno de laboratorio, así como también, en la construcción. Por otro lado, cabe resaltar el gran potencial de nuestra región hacia las posibilidades de obtención de energía solar, gracias a los altos índices de radiación que se tienen.

En el presente trabajo de tesis, se pretende realizar un diseño óptimo para un sistema general de captación y redireccionamiento de la radiación solar presente en la zona. Esto se realizará en base a la evaluación estática y dinámica de variables independientes y dependientes en función a las cargas y las posiciones en las que se deberá poner según la zona horaria los captadores solares. Con el fin de realizar una comparativa o semejanza según la posición o el área establecida. Por ello, es necesario definir las variables, condiciones y características de la mano del uso de metodología alemana sobre diseño y creación VDI 2221, junto con los métodos teóricos y prácticos aprendidos y desarrollados a lo largo de la carrera profesional de Ingeniería Mecánica.

Capítulo I

1. Antecedentes.

En el año 1839 el físico francés Alexandre Edmond Becquerel encontró que determinados materiales producían corriente eléctrica al exponerse a la luz.

La primera celda solar fotovoltaica funcional fue desarrollada utilizando selenio recubierto de oro creando una delgada capa que generaba electricidad al recibir la luz del sol en el año 1883 por Charles Fritts.

En el siglo XX los avances de la física condujeron a un mejor entendimiento de los materiales semiconductores y sus propiedades fotovoltaicas.

La NASA y otras agencias espaciales durante la década de 1950 empezaron a utilizar paneles fotovoltaicos y descubrieron que la energía fotovoltaica era una fuente eficiente y confiable en el espacio.

El constante uso de los combustibles fósiles llevó a un aumento en los precios de la energía lo que impulsó la investigación y el desarrollo de las tecnologías fotovoltaicas conduciendo a mejoras de eficiencia y una reducción en los costes de producción.

La tecnología fotovoltaica se ha vuelto cada vez más accesible y se está utilizando cada vez más para aplicaciones terrestres como son los sistemas residenciales y comerciales llegando hasta plantas de energía solar

1.1. Determinación del problema.

Perú cuenta con una notable disponibilidad de energía solar a lo largo de casi todo su territorio durante todo el año, debido a su cercanía con la línea ecuatorial. Según el Atlas Solar del Perú, desarrollado por el Ministerio de Energía y Minas, la radiación solar anual es significativa: en la región andina fluctúa entre 5,5 y 6,5 kWh/m², en la costa varía entre 5,0 y 6,0 kWh/m², y en la selva se encuentra entre 4,5 y 5,0 kWh/m². Estas cifras revelan el gran potencial que tiene Perú para la generación de energía fotovoltaica. Por otro lado, en la conferencia Sun World Perú 2019, se resaltó la motivación de las empresas que se dedican a la generación de energía solar por desarrollar estas tecnologías en el país. Desde el 2008, con la promulgación del Decreto Legislativo N° 102, denominado Ley de Fomento a la Inversión en Energía Eléctrica a partir de Energías Renovables, el gobierno

ha impulsado la diversificación de las fuentes energéticas mediante subastas específicas para energías renovables, aunque en la actualidad el interés en estas ha disminuido. Además, el avance en el uso de energía solar ha sido más lento de lo esperado según los objetivos establecidos en la Política Energética Nacional del Perú 2010-2040 (Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2010), que busca ampliar la matriz energética bajo criterios de eficiencia económica y de cobertura, derivando del primer Plan de Electrificación Rural (Pérez Guadalupe, 2016)

Por ello actualmente no se puede realizar una optimización y evaluación de diferentes sistemas de captación y redireccionamiento de radiación solar, debido a la falta de desarrollo tecnológico propio dificultando estudios e investigación de diferentes materiales, geometrías, posiciones de manera experimental. Además, se desconoce cómo afectaría los principios teóricos y fenómenos físicos en nuestra región a los prototipos, según su objetivo y funcionalidad. El pronóstico de la radiación solar allana el camino para la planificación adecuada, la gestión de reservas y eludir la penalización, ya que la energía solar es de naturaleza esporádica. Esto, sin mencionar, el nivel de dificultad de diseño para personas excluyentes del área de mecánica, de la manufactura y calidad técnica que se debe tener en la fabricación y construcción.

1.2. Formulación del problema.

Las energías renovables son esenciales para abordar los desafíos ambientales, promover la sostenibilidad y garantizar un futuro energético limpio y seguro, entre ellas está la energía solar fotovoltaica, esta es una fuente de energía prometedora, pero también presenta varios desafíos en su desarrollo entre ellos están

Costos de instalación: Los costos de los paneles solares han disminuido con el paso de los años no obstante siguen siendo teniendo un costo considerablemente alto para la mayoría de personas y empresas.

Eficiencia y densidad de energía: La eficiencia de los paneles solares han mejorado, pero aún se encuentra lejos de ser óptima estas rondan el rango de 15 a 20%, la densidad de energía solar también es relativamente baja por que se necesitan amplias áreas para producir cantidades significativas de energía eléctrica

Ausencia de madurez tecnológica en nuestra región de investigación y desarrollo de sistemas para obtención y uso eficiente de energía solar

se busca formar una configuración que combine los aspectos de seguidor solar y de sistemas fotovoltaicos de baja concentración (LCPV).

Los sistemas fotovoltaicos de concentración baja son aquellos que poseen una concentración en la escala de 2 hasta 100 soles.

1.3. Campo y línea de desarrollo.

- Ingeniería Mecánica.
- Investigación aplicada.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Diseño, caracterización y evaluación estructural de un sistema móvil de captación y redireccionamiento de radiación solar utilizando la tecnología de paneles bifaciales a escala prototipo utilizando un sistema económico y versátil

1.4.2. Objetivos específicos.

- a) Realizar la memoria de cálculo teórico de los fenómenos físicos que intervienen en una zona óptima de obtención de radiación solar.
- b) Modelar y simular los esfuerzos con herramientas computacionales del diseño planteado.
- c) Construcción a escala laboratorio funcional del diseño definido.
- d) Estudiar la viabilidad de semejanza y comparativa de los resultados con los datos reales.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

1.5.1. Justificación social

Actualmente en nuestra región no se cuenta con un modelo experimental para poder evaluar diferentes posiciones, seguimiento o geometrías de captación y redireccionamiento de radiación solar. Así como también, un indicador inicial de lo que sería el desarrollo de sistemas estáticos y dinámicos de la estructura.

El desarrollo tecnológico de las fuentes de energías renovables conlleva una serie de beneficios como son:

Acceso de energía para regiones lejanas: La energía solar fotovoltaica permite generar energía eléctrica para proporcionar a comunidades aisladas y así mejorar su calidad de vida

Diversificación de la matriz energética: Con la existencia y desarrollo de la fotovoltaica aumentaron la cantidad de fuentes de energía factibles disponibles, al diversificar la matriz energética se aumenta la estabilidad del suministro y evita posibles perturbaciones

1.5.2. Justificación ambiental

La investigación y desarrollo de tecnologías destinadas a fuentes de energía renovables son esenciales para impulsar el cambio hacia un futuro con un sistema energético más limpio, el desarrollo de estas tecnologías también reduce la dependencia a los combustibles fósiles amortiguando así las emisiones de gases de efecto invernadero

1.6. Identificación de variables

1.6.1. Variables independientes.

- Irradiación solar promedio
- Temperatura ambiente

- Velocidad del viento
- Inclinación del panel
- Presión atmosférica

1.6.2. Variables dependientes.

- Temperatura del panel
- Eficiencia fotovoltaica
- Potencia eléctrica de salida

1.7. Hipótesis de la investigación.

La energía fotovoltaica de concentración combinada con la tecnología bifacial de las celdas fotovoltaicas ofrece una alternativa a tener en cuenta en el camino del desarrollo de las tecnologías fotovoltaicas debido a que reducen costos al requerir menos células fotovoltaicas y utilizar más materiales reflectantes.

Por motivos económicos, es común emplear células de silicio, ya sean estándar o con ciertas modificaciones. En estas circunstancias, el flujo de calor es lo suficientemente reducido como para prescindir de un sistema de enfriamiento. Los principios de la óptica establecen que un panel solar con baja concentración de luz puede tener un ángulo de aceptación amplio, lo que en ciertas ocasiones permite que no se necesite un sistema de seguimiento solar.

1.8. Alcances.

Por medio de los principios relaciones al diseño en base al modelo VDI 2221, así como también, el uso de plantillas Mathcad, softwares de diseño asistido por computadora, simulación y análisis FEA, se podrá optimizar los diseños de sistemas de fijación y movimiento de la posición de los receptores y deflectores de radiación solar poder evaluar la viabilidad de modelamientos y semejanzas determinadas por la Carga útil (Peso máximo admisible) el modelamiento adimensional (Escala, Energía, Materiales Manufactura y herramientas). Así mismo, los datos de estaciones meteorológicas y datos satelitales se pueden obtener para la predicción de la radiación solar.

Capítulo II

2. Marco teórico.

2.1. Estado del arte.

2.1.1. Energías renovables.

Las energías renovables se definen como aquellas fuentes de energía que se generan de manera continua y no se agotan en la escala de tiempo humana, como el viento, la radiación solar, el agua o la biomasa. Los tipos principales de energías renovables incluyen: biomasa, energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y energías marinas. La mayoría de estas energías, directa o indirectamente, derivan del Sol, a excepción de la geotérmica y la energía de las mareas (Schallenberg Rodríguez, 2008).

- **Energía Eólica:** Se obtiene de la fuerza del viento, transformada en electricidad mediante turbinas y aerogeneradores que convierten la energía cinética en energía eléctrica. Esta fuente es particularmente eficiente en zonas costeras y lugares con fuertes vientos.
- **Energía Hidráulica:** Es una forma de energía derivada indirectamente del Sol, ya que el ciclo del agua comienza con la evaporación provocada por el calor solar en mares y lagos. El agua se transporta a través de la atmósfera y regresa a la superficie terrestre en forma de precipitaciones. La energía potencial del agua se transforma mientras se desplaza desde la tierra firme de vuelta a los cuerpos de agua.
- **Energía de Biomasa:** Esta fuente se diferencia de otras energías renovables porque permite el almacenamiento natural de energía. La materia orgánica actúa como almacén de energía solar, transformándola en lo que se conoce como biomasa, en lugar de depender de procesos artificiales para su almacenamiento, como sucede con la energía solar o eólica.
- **Energía de los Océanos:** Esta categoría emergente aprovecha la energía contenida en las mareas, las olas, las corrientes oceánicas y las diferencias térmicas del agua para generar electricidad.

- **Energía Solar:** Proviene directamente del Sol y puede transformarse en electricidad mediante sistemas de energía solar térmica o mediante paneles fotovoltaicos que captan la luz solar (Jarabo et al., s. f.).

Cada tipo de energía renovable presenta sus propias ventajas y desafíos. La inclusión de estas fuentes en la matriz energética es clave para avanzar hacia un sistema energético más limpio y sostenible. Su implementación depende de factores específicos, como las condiciones geográficas, económicas y tecnológicas de cada región. Impulsar la investigación y el uso de estas energías es esencial para avanzar hacia un futuro menos dependiente de combustibles fósiles y más amigable con el medio ambiente.

2.1.2. Energía solar

2.1.2.1. El sol

El sol funciona como un reactor de fusión en operación continua, donde sus gases actúan como contenedor al ser retenidos por su gravedad. Posee un diámetro de $1,39 \times 10^9$ metros y se encuentra, en promedio, a $1,5 \times 10^{11}$ metros de la Tierra. Su temperatura efectiva como cuerpo negro es de 5777 K, mientras que en su núcleo se estima una temperatura de entre 8×10^6 y 40×10^6 K, con una densidad unas 100 veces mayor que la del agua.

La energía generada en el interior, a temperaturas extremadamente altas, debe trasladarse hacia la superficie para ser irradiada al espacio. Este proceso involucra mecanismos radiativos y convectivos, donde la emisión y absorción ocurren de manera sucesiva. El núcleo del sol emite radiación principalmente en forma de rayos X y rayos gamma, mientras que las longitudes de onda se hacen mayores a medida que la temperatura disminuye con el aumento de la distancia radial.

El 90% de la energía solar se produce en la región comprendida entre 0 y 0,23 veces el radio solar (R), donde se concentra el 40% de su masa. A 0,7R del centro, la temperatura baja a aproximadamente 130 000 K y la densidad a 70 kg/m^3 , marcando el inicio de procesos convectivos. La zona entre 0,7 y 1,0R se denomina zona convectiva, donde la temperatura desciende a 5000 K y la densidad a 10^{-5} kg/m^3 .

La capa externa de esta zona es la fotosfera, un límite claramente definido a pesar de su baja densidad. Esta capa opaca, formada por gases altamente ionizados, absorbe y emite un espectro continuo de radiación, siendo responsable de la mayor parte de la luz solar que observamos. (Duffie et al., 2020)

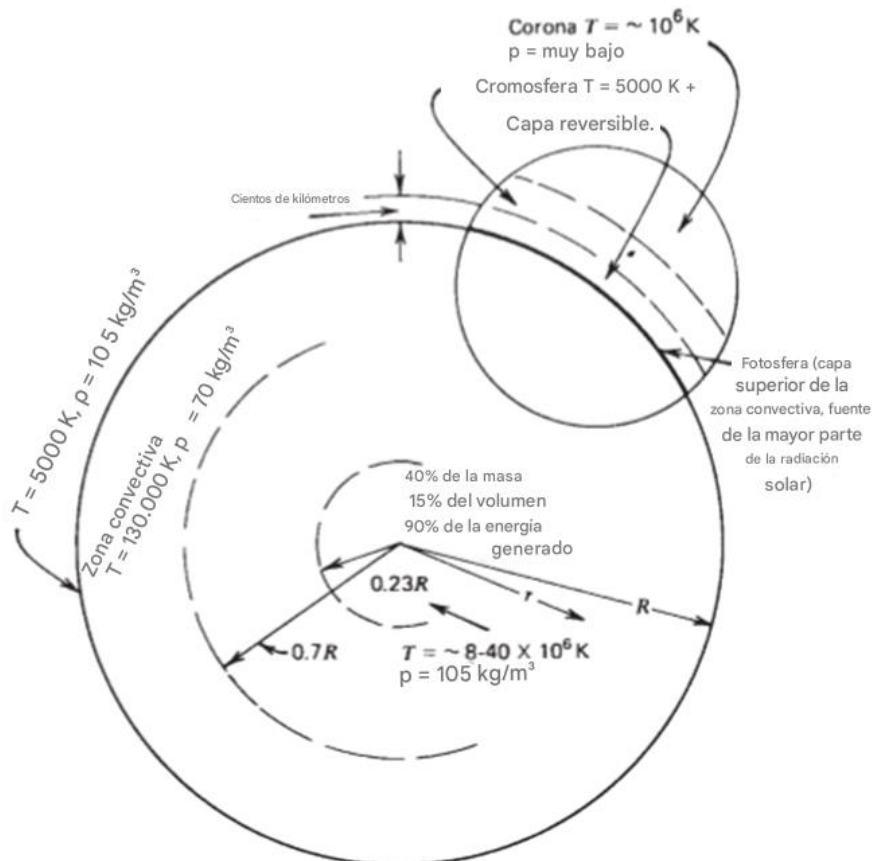


Figura 2.1. Estructura del sol.

Nota. De "Ingeniería solar de procesos térmicos, fotovoltaica y eólica.", por (Duffie et al., 2020)

2.1.2.2. Radiación solar

La energía producida por el sol alcanza el planeta tierra como radiación solar la cual posee una longitud de onda que va de 300 hasta 2500nm. La franja visible de la radiación solar se encuentra entre los 400 y 700 nm, representando aproximadamente el 50% de la radiación total emitida.

La cantidad de energía que recibe la Tierra en un año asciende a $5,46 \times 10^{24}$ W (Chen, 2011) .

La densidad de potencia solar, es decir, la potencia por unidad de área justo por encima de la atmósfera terrestre es conocida como la constante solar y tiene un valor de 1366 W/m^2 . Sin embargo, este valor se reduce en un 30% al atravesar la atmósfera, resultando en una insolación aproximada de 1000 W/m^2 en la superficie terrestre, al nivel del mar, durante un día despejado (Lynn, 2010).

La radiación solar que alcanza la superficie terrestre se divide en tres componentes principales como se aprecia en la figura 2.2:

- Radiación directa: Proviene en línea recta directamente desde el sol.
- Radiación difusa: Llega desde todas las direcciones excepto directamente del sol.
- Albedo: Es la radiación que se refleja desde la superficie de la Tierra.

La combinación de estos tres elementos constituye lo que se conoce como radiación global.

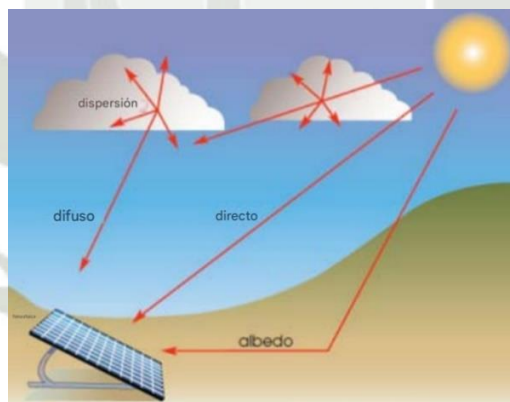


Figura 2.2. Radiación global con sus respectivos componentes y cómo inciden en un panel fotovoltaico.

Nota. De “Electricidad de la luz solar”, por (Paul A.Lynn, 2010).

2.1.2.3. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una fuente renovable, por lo tanto, inagotable y limpia, que puede utilizarse directamente en el lugar donde se genera. Su desarrollo tecnológico avanza de manera gradual pero constante. A diferencia de otras tecnologías,

en las celdas solares la luz solar se convierte directamente en electricidad, sin pasar por la transformación en calor, gracias al efecto fotovoltaico. Este efecto se basa en que la luz, al incidir sobre ciertos materiales, es capaz de generar una corriente eléctrica, es decir, un flujo organizado de electrones. (Hidalgo Osorio et al., 2021)

El proceso de generación de energía solar fotovoltaica comienza con los paneles solares, también conocidos como módulos fotovoltaicos. Estos paneles están compuestos por múltiples células solares.

Cuando la luz del sol alcanza las células solares, los fotones, que son partículas de luz, energizan a los electrones presentes en el material semiconductor. Este proceso genera una diferencia de potencial eléctrico entre las capas de la célula, produciendo una corriente eléctrica continua. La energía generada por cada célula se combina en los paneles solares, pudiendo utilizarse directamente como electricidad o almacenarse en baterías para su uso posterior.

Los sistemas solares fotovoltaicos pueden ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones, desde pequeños dispositivos electrónicos hasta grandes instalaciones de generación de energía a escala utility. Pueden instalarse en techos de edificios, estructuras montadas en el suelo o integrarse en productos y equipos específicos.

La energía solar fotovoltaica presenta varias ventajas significativas. Es una fuente de energía limpia y renovable, lo que significa que no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni contribuye al cambio climático. Además, la radiación solar es inagotable y está ampliamente disponible en todo el mundo, lo que la hace una fuente de energía potencialmente abundante y accesible.

Sin embargo, también hay desafíos asociados con la energía solar fotovoltaica. La eficiencia de los paneles solares puede verse afectada por factores como la ubicación geográfica, la inclinación y orientación de los paneles, y las condiciones climáticas. Además, los costos iniciales de instalación pueden ser altos, aunque están disminuyendo gradualmente.

En general, la energía solar fotovoltaica se considera una de las tecnologías clave en la transición hacia un sistema energético más sostenible y libre de carbono. Su

adopción continúa aumentando a medida que se mejoran las tecnologías y se implementan políticas de apoyo en todo el mundo.

2.1.3. Instalaciones fotovoltaicas

2.1.3.1. Clasificación de las instalaciones fotovoltaicas

Aplicaciones autónomas: Son aplicaciones sin conexión a la red eléctrica pública, con el fin de aportar energía al lugar donde se encuentran ubicadas. Se pueden distinguir dos bloques:

- **Aplicaciones espaciales:** son aquellos que brindan energía eléctrica a maquinas ubicadas por el ser humano en órbita espacial tales como satélites, la Estación Espacial Internacional, etc. Esta área de investigación llevó al desarrollo de los equipos fotovoltaicos tal y como los conocemos en la actualidad.

Aplicaciones terrestres: los más destacados son, por ejemplo, telefonía de zonas rural, repetidores (de telefonía, televisión, etc.), electrificación de zonas rurales, señales de tránsito luminosas formadas por diodos LED, alumbrado público y bombeo de agua.

Aplicaciones conectadas a la red: En esta aplicación el productor no utiliza la energía directamente, sino que se vende al organismo encargado de la gestión energética de cada país. La energía producida se realiza en el periodo de tiempo que la curva de demanda de electricidad aumenta; podemos distinguir algunas de estas aplicaciones:

-Centrales fotovoltaicas y huertos solares: En estos recintos se concentra un número determinado de instalaciones fotovoltaicas de diferentes propietarios a fin de vender la electricidad generada a la compañía eléctrica con la cual se haya establecido el contrato. Cada una de estas instalaciones tiene su propietario y todas ellas se ubican en el mismo lugar, esto favorece el mantenimiento de la instalación, vigilancia, pólizas de seguros, etc.

-Edificios fotovoltaicos: Esta es una aplicación relativamente reciente en el uso de la energía solar fotovoltaica. Los avances en los productos de este tipo han permitido

el uso de los módulos como material constructivo en cerramientos, cubiertas y fachadas manteniendo la estética. También, es importante señalar que la energía fotovoltaica es el sistema de energías renovables más adecuado para la generación de electricidad en zonas urbanas sin provocar efectos ambientales adversos. La integración arquitectónica consiste en combinar la doble función, como elemento de construcción y como generador de electricidad, de los módulos fotovoltaicos, ejemplo no se muestran edificios fotovoltaicos junto con otras aplicaciones se puede apreciar en la figura 2.3.



Figura 2.3. *Fotovoltaica aplicada en edificios.*

Nota De “Nuevos conceptos y aplicaciones de los sistemas solares fotovoltaicos.”, por (Aghaei, Ebadi, et al., 2020)

Normalmente los sistemas fotovoltaicos suelen integrarse en techos, porque allí es donde alcanzan la máxima captación de energía solar, pero últimamente se están comenzando a integrar en muros y fachadas, en las que, por ejemplo, el vidrio es reemplazado por módulos de láminas delgadas semitransparentes

2.1.4. Elementos de una instalación fotovoltaica

Generalmente las instalaciones solares fotovoltaicas se ajustan a un esquema similar al mostrado en la figura. 2.4.



Figura 2.4. Partes de una instalación fotovoltaica.

Nota De “Diseño y monitoreo de sistemas solares fotovoltaicos.”, por (Aghaei, Kumar, et al., 2020)

2.1.4.1. El Regulador

Para un correcto funcionamiento de la instalación, hay que instalar un sistema de regulación de carga en la unión entre los paneles solares y las baterías. Este elemento recibe el nombre de regular y tienen como misión evitar situaciones de carga y sobre descarga de la batería, con el fin de alargar su vida útil.

El regulador trabaja por tanto en las dos zonas. En la parte relacionada con la carga, su misión es la de garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar las situaciones de sobrecarga, y en la parte de descarga se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería.

2.1.5. El panel solar

También llamado módulo fotovoltaico es conformado por un conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas, y montadas en una estructura de soporte o marco. Están diseñadas para valores determinados de tensión (6V, 12V, 24V) y proporcionan en su salida de conexión una tensión continua

Partes de un panel fotovoltaico.

- Marco de aluminio: le brinda robustez al panel solar fotovoltaico

- Vidrio templado: Tiene como función proteger de los impactos externos debido que las células fotovoltaicas son muy frágiles también asegura la transmisión térmica mayor de 90%.
- Laminado de EVA (Acetato Vinil Etileno); Funciona como aislante dieléctrico contra agentes químicos externos y también como un sellante transparente.
- Capa de células fotovoltaicas: En esta capa los fotones y los electrones fluyen y se genera la electricidad.
- Hoja posterior: sirve como aislante.
- Caja de conexiones: recibe el flujo de corriente y alimenta al inversor con la corriente continua generada para transformarla y posteriormente su usarla.

La potencia que genera una célula de tamaño estándar (digamos de 10 x 10 cm) es muy pequeña (en torno a 1 o 2 W), por lo que generalmente será necesario tener que asociar varias de ellas con el fin de proporcionar la potencia necesaria al sistema fotovoltaico de la instalación, Es de este hecho de donde surge el concepto de panel solar o modulo fotovoltaico, cuyos elementos y características acabamos de ver.

Según la conexión eléctrica que hagamos de las células, nos podemos encontrar con diferentes posibilidades:

- La conexión en serie de las células permitirá aumentar la tensión final en los extremos de la célula equivalente
- La conexión en paralelo permitirá aumentar la intensidad total del conjunto.

2.1.6. Paneles fotovoltaicos convencionales y paneles fotovoltaicos bifaciales

El principio de funcionamiento de los paneles fotovoltaicos bifaciales es el mismo que el de la tecnología mono facial fotovoltaica “el efecto fotoeléctrico”. Los fotones con energía mayor que la banda prohibida transfieren su energía al electrón e^- y dan lugar a pares electrón-hueco. Los portadores generados cerca de la región de agotamiento del

semiconductor no se recombinan, sino que se difunden hacia el sustrato y el emisor y son atraídos por el campo eléctrico interno, dirigiendo electrones y huecos hacia los semiconductores tipo N y tipo P, respectivamente.

De este modo se crea una fuerza electromotriz entre los contactos delantero y trasero. Cuando los dos lados de las células fotovoltaicas están conectados, los electrones se mueven a través de la carga externa. Sin embargo, a diferencia de los sistemas monofaciales, los módulos bifaciales pueden utilizar la luz que incide tanto en el cristal frontal como en el posterior de las células bPV. Debido a sus características bifaciales, tanto los cristales delanteros como los traseros están cubiertos con revestimientos antirreflectantes (AR). Para mejorar la absorción de la irradiación de la célula fotovoltaica bifacial, el contacto posterior se fabrica en forma de rejilla de metalización abierta, ya sea en metales Ag o Al (Mouhib et al., 2022) (Figura 2.5)

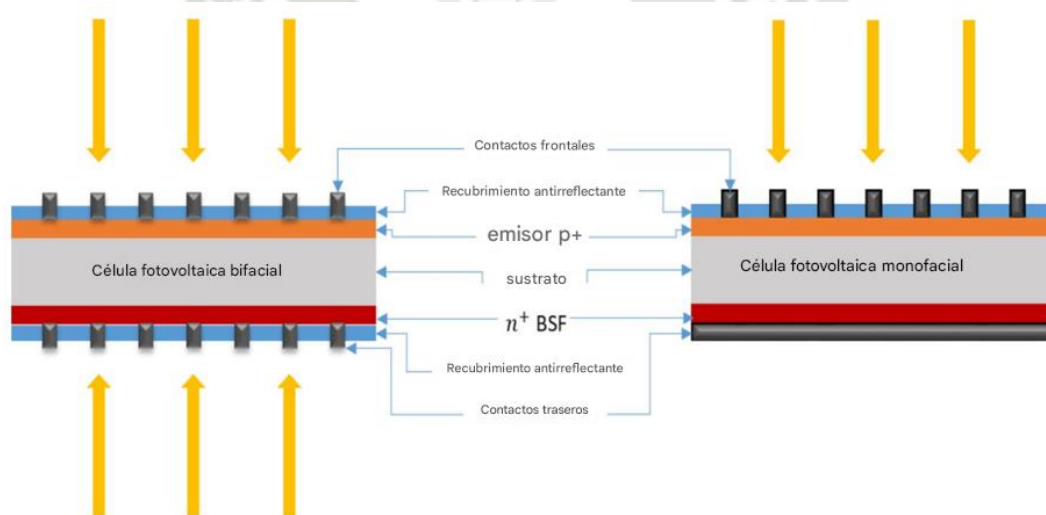


Figura 2.5. Estructura y configuración de una celda fotovoltaica bifacial y monofacial

Nota. De “Resumen de los fundamentos y aplicaciones de la tecnología fotovoltaica bifacial: agrivoltaica y acuavoltaica”, por (Mouhib et al., 2022)

La capacidad de los paneles bifaciales para captar la radiación solar por ambos lados puede aumentar la producción de energía en comparación con los paneles tradicionales. La cantidad adicional de energía generada depende de diversos factores, como la ubicación geográfica, la orientación e inclinación del panel, y el entorno circundante. En general, se estima que los paneles bifaciales pueden aumentar la

producción de energía en un rango de 5% a 30% en comparación con los paneles convencionales.

Además de su capacidad para generar más electricidad, los paneles bifaciales ofrecen otras ventajas. Al captar luz solar de ambos lados, son menos sensibles a la sombra y a las variaciones de la radiación solar a lo largo del día, lo que puede mejorar su rendimiento en condiciones desafiantes. También presentan una mayor durabilidad, ya que la radiación solar puede limpiar la parte trasera del panel y reducir la acumulación de suciedad y polvo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que los paneles bifaciales suelen ser más costosos que los paneles fotovoltaicos tradicionales. Además, su instalación requiere consideraciones especiales, como la elección de estructuras de montaje adecuadas y la optimización de la orientación y el espaciado entre los paneles.

2.1.7. Sistemas fotovoltaicos bifaciales

Las instalaciones clásicas de inclinación fija, como se muestra en la figura 2.6 (a), pueden generar una ganancia bifacial máxima de hasta el 30% en grandes sistemas fotovoltaicos, si la geometría de la instalación es óptima (es decir, borde inferior del módulo instalado a $>0.5\text{m}$ del suelo, sombreado bajo desde la parte trasera, con alta distancia entre módulos, así como un albedo muy alto, por ejemplo, nieve fresca). Las instalaciones horizontales figura 2.6. (b) son bastante interesantes, por ejemplo, para techos de cocheras o estaciones de bus, y las instalaciones verticales para hacer uso de un GCR (índice de cobertura de suelo) bajo, como en agrivoltaica, donde la tierra también se utiliza para la agricultura. Figura 2.6.(c).(Kopecek & Libal, 2021)

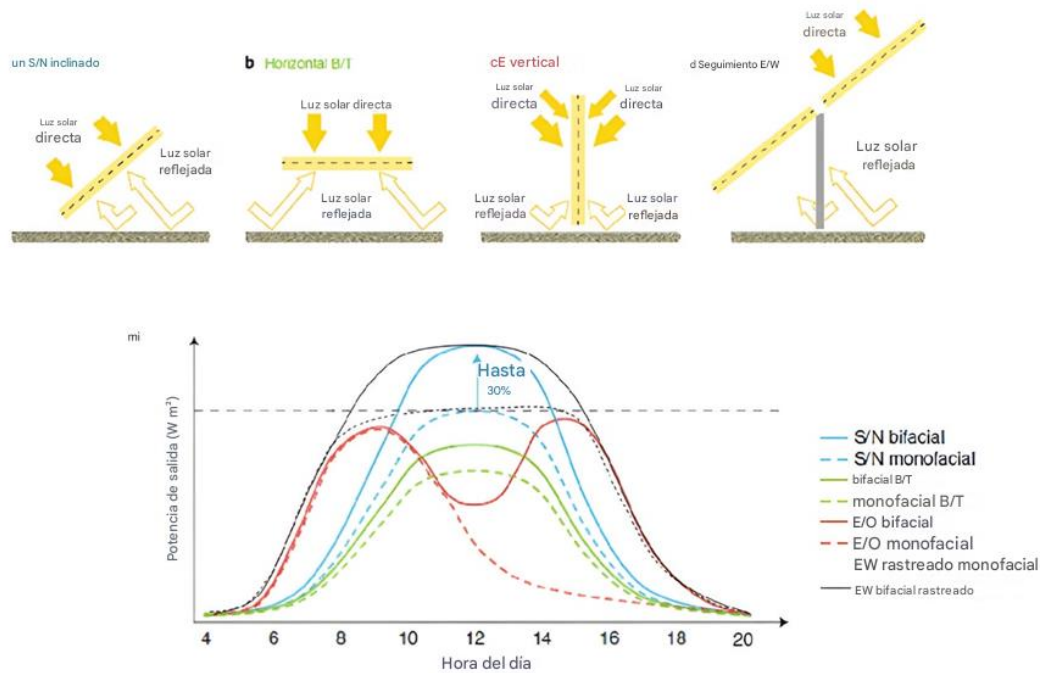


Figura 2.6.(a-d) posibilidades para instalaciones de módulos bifaciales y (e) Comparación de generación de energía, Curvas de operación para módulos monofaciales y bifaciales

Nota. De "Fotovoltaica bifacial 2021: situación, oportunidades y desafíos", por (Kopecek & Libal, 2021)

La instalación con mayor producción de energía es la combinación de HSAT (Horizontal Single Axis Tracker) con módulos bifaciales, y en la mayoría de los casos esto también da como resultado el LCOE más bajo como se describe en la introducción. En nuestra opinión, como los sistemas de seguimiento requieren de todos modos una distancia bastante grande entre filas y los módulos deben montarse a gran altura del suelo (debido a las limitaciones geométricas de los seguidores), no tiene sentido utilizar módulos monofaciales en los sistemas HSAT.

2.1.7.1. Células solares: características básicas y funcionamiento:

La célula solar es lo principal de cualquier instalación de energía solar fotovoltaica en los cuales la luz solar es rápidamente convertida en electricidad. La celda solar es un dispositivo de unión p-n.

Las celdas fotovoltaicas reciben los fotones de la luz y emiten electrones. Para lograr este efecto se utilizan dos capas de silicio, una de ellas está dopada o contaminada

con átomos de algún elemento con más electrones. Esta capa está denominada silicio-N. Y la otra capa está contaminada o dopada con átomos de algún elemento con menos electrones, y se le llama silicio-P. (Al-Ezzi & Ansari, 2022)

Cuando las placas solares reciben la luz, los fotones “excitan” los electrones del silicio dopado, liberándose del átomo al que pertenecen. Cuando la cantidad de estos electrones liberados aumenta, tienden a desplazarse a un espacio que ha quedado libre, produciéndose así la corriente eléctrica, este efecto está ilustrada en la figura 2.7.

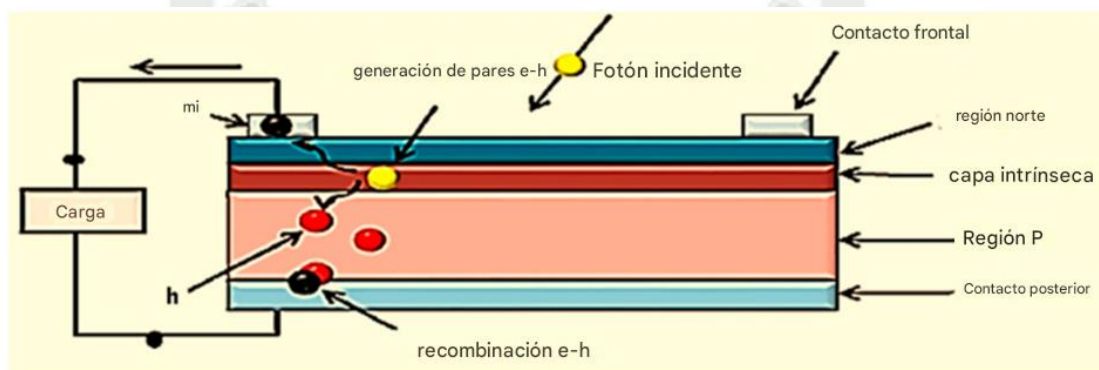


Figura 2.7. Unión p-n de una celda fotovoltaica.

Nota. De “Células solares fotovoltaicas: una revisión”, por: (Al-Ezzi & Ansari, 2022)

Parámetros fundamentales de la célula solar

- **Corriente de iluminación (IL):** Corriente generada cuando incide la radiación solar sobre la célula.
- **Corriente de oscuridad:** esta es debida a la recombinación de los pares de electrón-hueco que se producen en el interior del semiconductor.
- **Tensión de circuito abierto (Voc):** Es la máxima tensión que se obtiene en los extremos de la célula solar, se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la célula.
- **Corriente de cortocircuito (Isc):** Es el máximo valor de corriente que puede circular por la célula solar. Se produce cuando sus terminales están cortocircuitados.

Cuando una célula solar es conectada a una carga, los valores de tensión e intensidad varían. Existirán dos de ellos para los cuales la potencia entregada será máxima: V_m (tensión máxima) e I_m (intensidad máxima), que siempre serán más bajos que V_{oc} e

Isc. En función de estos valores, la potencia máxima que puede entregar la célula solar será:

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (1)$$

Donde:

P_{mp} : Potencia del punto de máxima potencia [W].

V_{mp} : Voltaje del punto de máxima potencia [V].

I_{mp} : Corriente del punto de máxima potencia [A].

Así podemos definir un parámetro de la célula solar que recibe el nombre de factor de forma (FF) y que se calcula mediante:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2)$$

Donde:

FF : Factor de forma

V_{mp} : Voltaje del punto de máxima potencia [V].

I_{mp} : Corriente del punto de máxima potencia [V].

I_{sc} : Corriente de corto circuito [A].

V_{oc} : Voltaje de circuito abierto [V].

De esta manera, el factor de forma es el cociente de la máxima potencia que puede entregar la célula a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. Los valores típicos del factor de forma son 0.7 o 0.8.

2.1.8. Tipos de seguidores solares

Seguidores solares de un eje: Los seguidores solares de un solo eje tienen un grado de libertad que actúa como eje de rotación. El eje de rotación de los seguidores de un solo eje suele estar alineado a lo largo de un meridiano norte verdadero.

Los seguidores solares de un eje son los más comunes y populares. Estos sistemas están diseñados para seguir el movimiento del sol a lo largo del día, girando el panel fotovoltaico en un solo eje (generalmente el eje horizontal). Esto permite que los paneles se orienten siempre hacia el sol, maximizando la captación de radiación solar y mejorando la eficiencia de generación de energía. Los seguidores solares de un eje pueden aumentar

la producción de energía en un 20% a 40% en comparación con los sistemas estáticos.

Sus tipos son los siguientes:

Eje horizontal (Un eje horizontal y orientado en dirección norte-sur): El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida con el meridiano terrestre que contiene al sol

Eje azimutal (Un eje vertical, el ángulo de la superficie es constante e igual a la latitud): El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida con el meridiano local que contiene al sol

Eje polar (Un eje orientado al sur e inclinado un ángulo igual a la latitud): El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida con el meridiano terrestre que contiene al sol.

Seguidores solares de dos ejes: Los seguidores solares de dos ejes ofrecen un seguimiento más preciso del sol en comparación con los de un solo eje. Estos sistemas tienen la capacidad de girar los paneles fotovoltaicos tanto en el eje horizontal como en el eje vertical. Al seguir el movimiento del sol en dos direcciones, los paneles se mantienen en una posición óptima en relación con la radiación solar incidente.

Seguidores solares de concentración: Los seguidores solares de concentración utilizan lentes o espejos para enfocar la radiación solar en células fotovoltaicas de alta eficiencia. Estos sistemas aprovechan la capacidad de concentración para aumentar la intensidad de la luz solar que llega a los paneles, lo que resulta en una mayor producción de energía. Sin embargo, los seguidores solares de concentración suelen ser más costosos y requieren un mantenimiento más riguroso debido a la necesidad de alinear con precisión los elementos de concentración.

Seguidores solares de punto focal: Los seguidores solares de punto focal utilizan un sistema de espejos o lentes para redirigir la luz solar hacia un punto focal específico, donde se encuentra la célula fotovoltaica. Esto permite que la radiación solar se concentre en un área más pequeña, lo que puede aumentar la eficiencia de generación de energía. Estos seguidores solares son adecuados para aplicaciones en las que se requiere un alto nivel de precisión y concentración de la luz solar.

2.1.9. Antecedentes.

En el contexto nacional, Perú ha mostrado un crecimiento notable en el uso de paneles fotovoltaicos en los últimos años, aunque su avance ha sido más lento en comparación con otros países de la región. No obstante, el país ha implementado diversas políticas y programas para fomentar la adopción de esta tecnología como parte de su matriz energética. Un ejemplo clave es el Programa Nacional de Electrificación Rural Fotovoltaica (PRONERF), lanzado en 2010, que busca proporcionar acceso a la electricidad a comunidades rurales aisladas mediante la instalación de sistemas fotovoltaicos. Este programa ha sido un catalizador importante para la expansión de la energía solar en zonas donde la conexión a la red eléctrica convencional es limitada o inexistente, mejorando la calidad de vida de miles de habitantes.

Otro pilar en el desarrollo de la energía solar en Perú ha sido la Ley de Promoción de Energías Renovables (Ley N° 27191), promulgada en 1999 y modificada en 2008, la cual establece incentivos financieros y beneficios fiscales para atraer la inversión en proyectos de energías renovables, incluidos los de energía solar fotovoltaica. Estos incentivos han permitido que tanto el sector público como el privado impulsen proyectos de generación de energía solar, favoreciendo la diversificación de las fuentes energéticas del país y contribuyendo a una matriz más limpia y sostenible. Adicionalmente, la subasta de energías renovables llevada a cabo en 2016 marcó un hito importante al asignar contratos de suministro a largo plazo para proyectos solares, lo que incrementó la capacidad instalada y reforzó la presencia de energía solar en el mercado peruano.

El desarrollo de instalaciones solares a gran escala también ha sido relevante para el crecimiento del sector. Un ejemplo emblemático es la planta solar fotovoltaica Intipampa, situada en Moquegua, con una capacidad de 40 MW, inaugurada en 2012. Este y otros proyectos de gran envergadura han permitido que el país aproveche mejor su potencial de radiación solar, que es uno de los más altos de la región. Paralelamente, diversas municipalidades y organizaciones han promovido proyectos de electrificación solar en comunidades rurales, extendiendo el acceso a la electricidad mediante paneles solares y superando las barreras geográficas y económicas que limitan el acceso a la red eléctrica convencional.

A nivel internacional, los avances en la tecnología de paneles fotovoltaicos también han influido en las estrategias y perspectivas de Perú. Las investigaciones de Poulek y sus colaboradores desde la década de 1990 han sido pioneras en el desarrollo de paneles bifaciales de baja concentración (LCPV) mostrados en su configuración básica en la figura 2.8, los cuales han demostrado ser más eficientes al captar la luz reflejada y aumentar la producción energética hasta un 30% en comparación con los paneles monofaciales. Estos sistemas han sido perfeccionados con el uso de tecnologías como el gel de polisiloxano y configuraciones de seguimiento solar de un eje, mostrando mejoras en durabilidad y rendimiento en diversas condiciones climáticas. La colaboración con instituciones como la Universidad Checa de Ciencias de la Vida ha potenciado estos desarrollos los cuales se muestran ilustrados en la figura 2.8, subrayando la importancia de la investigación continua y la innovación en el avance de la energía solar global. Estas tendencias tecnológicas internacionales refuerzan las perspectivas de crecimiento y adaptación en países como Perú, que buscan optimizar sus recursos solares y reducir los costos de generación eléctrica, una comparativa de los sistemas y sus respectivas ganancias se encuentra la tabla 2.1.

(a)



(b)



(c)



Figura 2.8. *Concentradores solares fabricados en Solar Wind Company en Krasnodar-Rusia (a) Concentradores solares de cresta con seguidor solar (Planta de energía fotovoltaica de 0,5 MW), (b) Concentrador pseudo parabólico TRAXLE con paneles fotovoltaicos bifaciales construido en Praga y (c) Segunda variante del concentrador pseudo parabólico con paneles fotovoltaicos bifaciales construido en Ryazan*

Nota. De “República Checa avanza en la construcción de concentradores de radiación para sistemas fotovoltaicos”, por (Poulek et al., 2016)

Tabla.2.1.

Parámetros de los sistemas LCPV con paneles fotovoltaicos bifaciales

Concentrador	Número y potencia de los paneles	Tamaño y disposición de las células bifaciales	Temperatura de funcionamiento de los paneles fotovoltaicos	GCR	Proporción bifacial de células fotovoltaicas delante/detrás (%)	Ganancia de energía	Laminación
Cresta (TRAXLE)	14*170 W	125x12 5 mm ² 6 x 12	55°C	1.5	100/50	+72%	Vidrio/EVA/TPT
Pseudo Parabólico I (TRAXLE)	4*170 W	125x12 5 mm ² 6 x 12	95°C	4.1	100/60	+167%	Vidrio/silicosis en gel/vidrio
Pseudo Parabólico II (TRAXLE)	2*175 W	125x62, 5 mm ² 10 x 14	96°C	3.6	100/60	+114%	Vidrio/silicosis en gel/vidrio

Nota. El término GCR significa relación de concentración geométrica, el término TPT se refiere al material tedlar polyester tedlar que es otro material usado en la laminación de paneles fotovoltaicos, los modelos de concentrador de esta tabla son los referidos en la figura 2.8 Fuente: (Poulek et al., 2016)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Descripción y clasificación.

2.2.1.1. Dinámica solar

Las relaciones geométricas entre un plano de cualquier orientación con respecto a la tierra en cualquier momento (ya sea que este plano este fijo o en movimiento con respecto a la tierra) y la radiación solar entrante, es decir, la posición del sol con respecto a ese plano, esta puede describirse gracias varios ángulos. (Duffie et al., 2020) Algunos de los ángulos se indican en la figura 2.9. los ángulos y un conjunto de convenciones de signos consistentes son:

Longitud (L): es la ubicación angular al oeste de Greenwich, Inglaterra ($0^\circ \leq L \leq 360^\circ$). La convección de longitud se da como ($-180^\circ \leq L \leq +180^\circ$),

Latitud (ϕ): La ubicación angular al norte o al sur del ecuador, norte positivo; ($-90^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$).

Declinación (δ): Es la posición angular del sol al medio día (es decir, cuando el sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, norte positivo; ($-23.45^\circ \leq \delta \leq +23.45^\circ$).

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left(360 \cdot \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right) [^\circ] \quad (3)$$

Pendiente (β): Es el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal; ($-0^\circ \leq \beta \leq +180^\circ$). ($\beta > 90^\circ$) significa que la superficie tiene un componente orientado hacia abajo.

Ángulo de azimut de la superficie (γ): Es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal de la superficie desde el meridiano local, con el valor de cero cuando esta hacia el sur, negativo al este y positivo al oeste; ($-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$).

Ángulo de hora (ω): es el desplazamiento angular del sol al este u oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a 15° por hora; es negativo por las mañanas y positivo en las tardes.

$$\omega = ((ht - 12) \cdot 15)[^\circ] \quad (4)$$

Ángulo de incidencia (θ): Es el ángulo entre la radiación del haz sobre una superficie y la normal a esta superficie.

Ángulo de Zenith (θ_z): Representa el ángulo entre la vertical y la línea hacia el sol, es decir el ángulo de incidencia de la radiación del haz sobre una superficie horizontal

$$\theta_z = (\arccos(\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi)) [^\circ] \quad (5)$$

Ángulo de altitud solar (α_s): Es el ángulo entre la horizontal y la línea hacia el sol, es decir, el complemento del ángulo de zenit.

Ángulo de azimut solar: Es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección del haz de radiación en el plano horizontal, como se muestra en la figura 2.9. Los desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos (Duffie et al., 2020)

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left(\arccos \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) [^\circ] \quad (6)$$

Ángulo horario de ocaso

$$\omega_s = (\arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)))[^\circ] \quad (7)$$

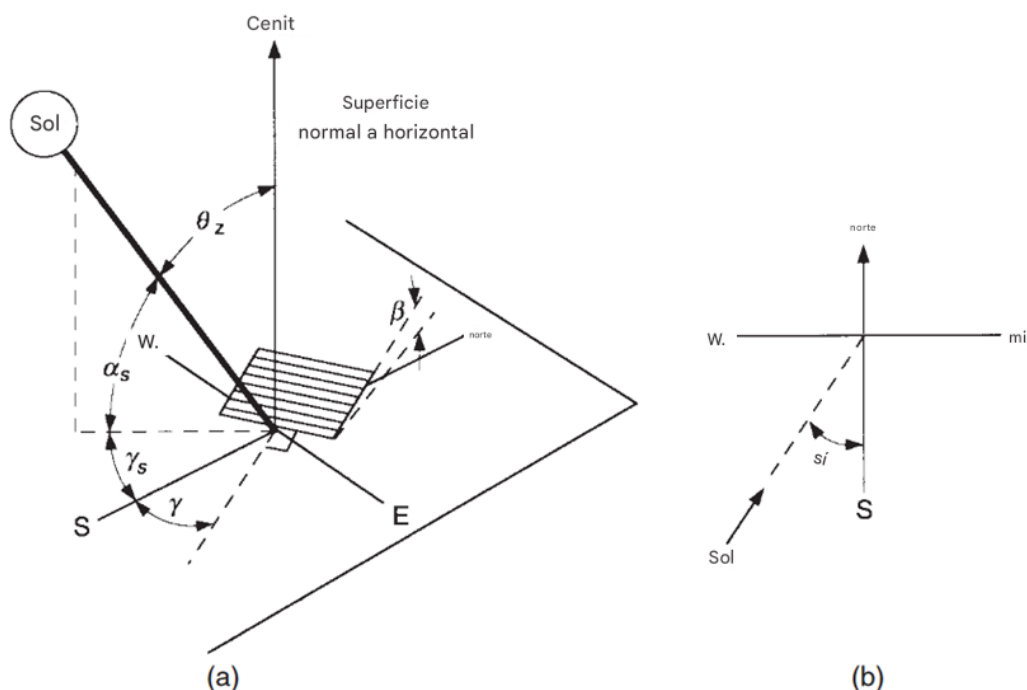


Figura 2.9. (a) Ángulo de Zenith, Pendiente, Angulo de azimut de la superficie y ángulo de azimut solar para una superficie inclinada; (b) Vista superior del ángulo de azimut solar

Fuente: (Duffie et al., 2020)

2.2.1.2. Absorbancia para celdas fotovoltaicas

La absorbancia en celdas fotovoltaicas es la medida de la cantidad de luz solar que una celda puede absorber y convertir en energía eléctrica. Una alta absorbancia indica una mayor eficiencia en la captación de luz y generación de electricidad.

Relación entre la radiación absorbida S y la radiación absorbida en condiciones de referencia

$$\frac{S}{S_{ref}} = M \cdot \left(\frac{G_b}{G_{ref}} \cdot R_{beam} \cdot K_{\tau\alpha,b} + \frac{G_d}{G_{ref}} \cdot K_{\tau\alpha,d} \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \frac{G}{G_{ref}} \cdot \rho_g \cdot K_{\tau\alpha,g} \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) [-] \quad (8)$$

Donde:

- M : Modificador de la masa de aire
- $K_{\tau\alpha,b}$: Modificador del ángulo de incidencia en el ángulo de incidencia del haz
- $K_{\tau\alpha,d}$: Modificador del ángulo de incidencia en el ángulo de incidencia para la radiación difusa
- $K_{\tau\alpha,g}$: modificador del ángulo de incidencia en el ángulo de incidencia para la radiación reflejada del suelo
- G_b : Radiación del haz de luz (W/m^2)
- G_d : Radiación difusa (W/m^2)
- G_g : Radiación reflejada del suelo (W/m^2)

Modificador de la masa de aire.

$$M = \sum_0^4 a_i (AM)^i \quad (9)$$

Donde:

- AM : Masa de aire

a_i : Constantes para diferentes materiales (Silicio monocristalino)
 $a_0.. a_4: 0,935823, 0,054289, -0,008677, 0,000527, -0,000011$

$$\tau\alpha(\theta) = e^{-\left(\frac{KL}{\cos\theta_r}\right)} \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right) \right] \quad (10)$$

Donde:

θ : Ángulo de incidencia
 θ_r : Ángulo de refracción.
 K : Coeficiente de extinción. ($4m^{-1}$)
 L : Espesor del vidrio. (0.004[mm])

Modificador del ángulo de incidencia.

$$K_{\tau\alpha}(\theta) = \frac{\tau\alpha(\theta)}{\tau\alpha(0)} [-] \quad (11)$$

Índice de claridad

$$k_t = \frac{G_b + G_d}{G_o} [-] \quad (12)$$

$$\frac{G_d}{G_d + G_b} = (0.9511 - 0.1604 \cdot k_T + 4.388 \cdot k_T^2 + 16.638 \cdot k_T^3 + 12.336 \cdot k_T^4) [-] \quad (13)$$

Radiación en superficies inclinadas:

$$G_T = (G_b \cdot R_b + G_d \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + (G_b + G_d) \cdot \rho_g \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2}) (W/m^2) \quad (14)$$

2.2.1.3. Ángulos para el seguimiento de las superficies

Algunos colectores solares “siguen” el sol moviéndose en formas prescritas para minimizar el ángulo de incidencia de la radiación del haz en sus superficies y así maximizar la radiación del haz incidente. Los ángulos de incidencia y los ángulos de azimut de la superficie son necesarios para estos colectores. Las relaciones en esta sección serán útiles en los cálculos de radiación para estas superficies en movimiento. (Duffie et al., 2020)

Está claro que el seguimiento puede cambiar significativamente la distribución temporal de la radiación del haz incidente. El seguimiento no siempre da como resultado un aumento de la radiación del haz; compare la radiación del solsticio de invierno en la superficie de seguimiento norte-sur con la radiación en la superficie fija.

Para un plano girado alrededor de un eje norte-sur paralelo al eje de la tierra con un ajuste continuo para minimizar θ .

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (15)$$

La pendiente varía continuamente y es

$$\tan \beta = \frac{\tan \phi}{\cos \gamma} \quad (16)$$

El ángulo azimutal de la superficie es

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta' \sin \phi} + 180c_1c_2 \quad (17)$$

Dónde

$$\cos \theta' = \cos \theta_z \cos \phi + \sin \theta_z \sin \phi \cos \gamma_s \quad (18)$$

$$c_1 = \begin{cases} 0 & \text{if } \left(\tan^{-1} \frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta' \sin \phi} \right) \gamma_s \geq 0 \\ +1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$c_2 = \begin{cases} +1 & \text{if } \gamma_s \geq 0 \\ -1 & \text{if } \gamma_s < 0 \end{cases} \quad (20)$$

2.2.1.4. Cálculos de radiación

Irradiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal para un día:

Es la cantidad de energía solar que recibe una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera terrestre durante un día completo. Se calcula en función de la constante solar, la inclinación de la Tierra, la distancia Tierra-Sol y el ángulo de incidencia de los rayos solares.

$$\bar{H}_o = \left(\frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(360 \cdot \frac{n}{365} \right) \right] \cdot \left[\cos \delta \cos \phi \cos \omega_s + \frac{(\pi \cdot \omega_s)}{180} \cdot \sin \phi \sin \delta \right] \right) \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (21)$$

Irradiación diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal: Se obtuvo mediante el programa PVGIS el cual es una base de datos para cálculos relacionados con radiación con datos actualizados de esta herramienta extrajimos la Irradiación mensual global sobre una superficie horizontal (H), con dicho vamos estimamos la radiación diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal, en la figura 2.10 se aprecia un gráfico realizado mediante el ya mencionado programa PVGIS

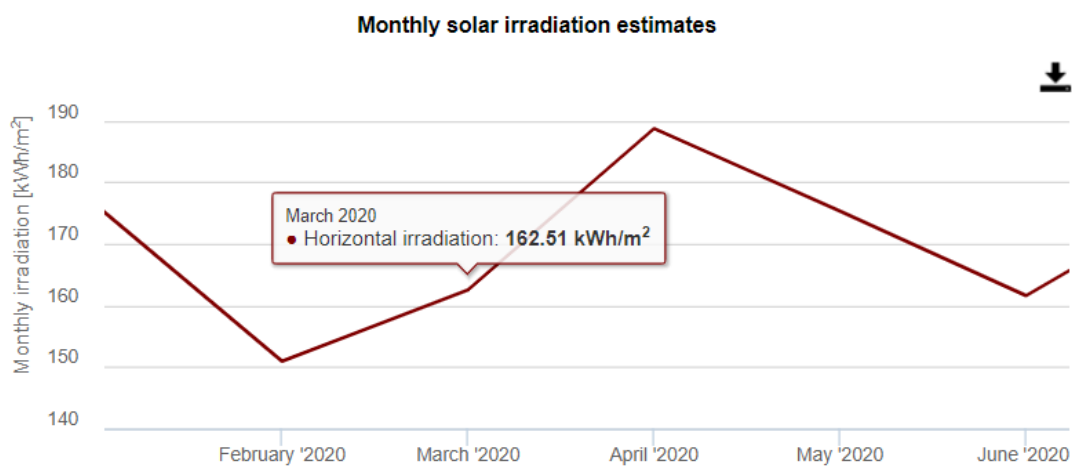


Figura 2.10. Irradiación mensual global hallada mediante PVGIS.

Nota. Se introdujo a la aplicación web de PVGIS los datos del lugar de trabajo como son la latitud y longitud los cuales son -16.40 y 71.50 respectivamente el dato tomado fue la irradiación horizontal para el mes de marzo.

$$\bar{H} = \frac{H}{31} \quad (22)$$

$$\bar{H} = \frac{162.51 \left[\frac{KW \cdot h}{m^2} \right]}{31} = 5.24 \left[\frac{KW \cdot h}{m^2} \right] = 1.8864 \cdot 10^7 \left[\frac{J}{m^2} \right]$$

El índice de claridad promedio mensual: K_T es la proporción del promedio mensual diario radiación sobre una superficie horizontal a la radiación extraterrestre diaria promedio mensual.

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (23)$$

Radiación difusa diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal.

$$\bar{H}_d = ((1.311 - 3.022 \cdot \bar{K}_T + 3.427 \cdot \bar{K}_T^2 - 1.821 \cdot \bar{K}_T^3) \cdot \bar{H}) [J/m^2] \quad (24)$$

Relación de radiación del haz en una superficie inclinada a ese en superficie horizontal.

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} [-] \quad (25)$$

2.2.1.5. Diseño de instalaciones fotovoltaicas

Hay muchos paralelos entre el diseño de sistemas térmicos y el diseño de sistemas fotovoltaicos. El equipo es lo suficientemente costoso como para que los costos de inversión dominen los costos del ciclo de vida, y se debe evitar el diseño excesivo de los sistemas. Por lo tanto, existe la necesidad de medios para predecir la producción eléctrica útil anual de los sistemas fotovoltaicos. El método presentado aquí es un método analítico que proporciona la misma información. Para la *i*-ésima hora del día, la potencia de salida de un conjunto fotovoltaico con seguimiento del punto de máxima potencia es.

$$P_i = A_c G_{T,i} \eta_{mp} \eta_e \quad (26)$$

Donde:

- P_i : Potencia de salida para la *i*-ésima hora del día [W]
- A_c : Área del arreglo [m^2]
- $G_{T,i}$: Radiación solar incidente en el arreglo [J/m^2]
- η_{mp} : Máxima eficiencia del punto de potencia del arreglo
- η_e : Eficiencia de cualquier equipo de acondicionamiento de energía

Sustituyendo la temperatura de la celda $\eta_{mp} = \eta_{mp,ref} + \mu_{mp}(T_c - T_{c,ref})$ en el rendimiento $(\tau\alpha)G_T = \eta_c G_T + U_L(T_c - T_a)$.

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,ref} \left[1 + \frac{\mu_{mp}}{\eta_{mp,ref}} (T_a - T_{ref}) + \frac{\mu_{mp} G_T \tau\alpha}{\eta_{mp,ref} U_L} \left(1 - \frac{\eta_{mp}}{\tau\alpha} \right) \right] \quad (27)$$

Donde:

- η_{mp} : Máxima eficiencia del punto de potencia del arreglo

- μ_{mp} : Coeficiente de eficiencia de temperatura del punto de máxima potencia
- $\eta_{mp,ref}$: Máxima eficiencia del punto de potencia de referencia
- T_a : Temperatura ambiente [°C]
- T_{ref} : Temperatura de la celda de referencia [°C]
- G_T : Radiación solar incidente [W/m^2].
- $\tau\alpha$: Producto de la transmitancia-absorbancia efectiva.
- U_L : Coeficiente de pérdidas por convección y radiación desde arriba y desde abajo y por conducción a través de cualquier estructura de montaje

El término $\frac{\eta_{mp}}{\tau\alpha}$ siempre es pequeño en comparación con la unidad y, por lo tanto, se puede aproximar mediante $\eta_{mp,ref}$ sin introducir un error significativo. El poder es el

$$P_i = A_c G_{T,i} \eta_{mp,ref} \eta_e \left[1 + \frac{\mu_{mp}}{\eta_{mp,ref}} (T_a - T_{ref}) + \frac{\mu_{mp} G_{T,i} \tau\alpha}{\eta_{mp,ref} U_L} (1 - \eta_{mp,ref}) \right] \quad (28)$$

Donde:

- P_i : Potencia de salida para la i-ésima hora del día [W]
- A_c : Área del arreglo [m^2]
- $G_{T,i}$: Radiación solar incidente en el arreglo [W/m^2]
- μ_{mp} : Coeficiente de eficiencia de temperatura del punto de máxima potencia
- $\eta_{mp,ref}$: Máxima eficiencia del punto de potencia de referencia
- T_a : Temperatura ambiente [°C]
- T_{ref} : Temperatura de la celda de referencia [°C]
- G_T : Radiación solar incidente en el arreglo [W/m^2]
- $\tau\alpha$: Producto de la transmitancia-absorbancia efectiva
- U_L : Coeficiente de pérdidas por convección y radiación desde arriba y desde abajo y por conducción a través de cualquier estructura de montaje

La eficiencia de matriz promedio mensual $\bar{\eta}_i$ para la hora i es la relación $\frac{E_i}{A_c I_T}$.

$$\bar{\eta}_i = \eta_{mp,ref} \eta_e \left[1 + \frac{\mu_{mp}}{\eta_{mp,ref}} (\bar{T}_a - T_{ref}) + \frac{\mu_{mp} \bar{G}_T \tau\alpha}{\eta_{mp,ref} U_L} (1 - \eta_{mp,ref}) Z_i \right] \quad (29)$$

$$Z_i = \frac{1}{NI_T^2} \sum_{n=1}^N I_{T,n}^2 \quad (30)$$

Donde:

- $\bar{\eta}_i$: Eficiencia de matriz promedio mensual para la hora i
 A_c : Área del arreglo [m^2]
 $G_{T,i}$: Radiación solar incidente en el arreglo [W/m^2].
 μ_{mp} : Coeficiente de eficiencia de temperatura del punto de máxima potencia
 $\eta_{mp,ref}$: Máxima eficiencia del punto de potencia de referencia
 \bar{T}_a : Temperatura ambiente promedio mensual [$^{\circ}C$]
 T_{ref} : Temperatura de la celda de referencia [$^{\circ}C$]
 G_T : Radiación solar incidente promedio mensual en el arreglo [W/m^2]
 $\tau\alpha$: Producto de la transmitancia-absorbancia efectiva
 U_L : Coeficiente U_L

Se supone que la potencia de salida instantánea de la celda y la temperatura ambiente mensual promedio por hora permanecen constantes durante la hora y es una función de la geometría y k_T . Aunque Z_i se puede encontrar utilizando la distribución a largo plazo de la radiación por hora, el proceso requiere mucho tiempo. Un ajuste empírico para Z_i es:

$$Z_i = \left(\frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_T}\right)^2 (a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3) \quad (31)$$

$$a_1 = R_b^2 + \rho(1 - \cos\beta)R_b + \frac{\rho^2(1 - \cos\beta)^2}{4} \quad (32)$$

$$a_2 = R_b(1 + \cos\beta - 2R_b)R_b + \rho(1 + \cos\beta - 2R_b)\frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (33)$$

$$a_3 = \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} - R_b\right)^2 \quad (34)$$

$$b_1 = -0.1551 + 0.9226\bar{k}_T \quad (35)$$

$$b_2 = 0.1456 + 0.0544 \ln \bar{k}_T \quad (36)$$

$$b_3 = \bar{k}_T(0.2769 - 0.318\bar{k}_T) \quad (37)$$

Donde:

- Z_i : Coeficiente Z_i
 \bar{I}_o : Irradiación solar extraterrestre promedio mensual [J/m^2]
 \bar{I}_T : Irradiación solar en una superficie inclinada promedio mensual [J/m^2]
 R_b : Relación entre la radiación del haz en un plano inclinado y la del plano de medición (generalmente horizontal)
 \bar{k}_T : Índice de claridad horaria promedio mensual.

La radiación crítica adimensional se define como la relación entre un nivel de radiación crítico y la radiación media mensual, donde el nivel crítico es aquel en el que la salida del conjunto es igual a la carga horaria media mensual para esa hora, $\frac{L_i}{A_c \bar{\eta}_i}$:

$$X_c = \frac{I_{TC,i}}{\bar{I}_{T,i}} = \frac{\bar{L}_i}{A_c \bar{\eta}_i \bar{I}_{T,i}} \quad (38)$$

Donde:

- X_c : Radiación crítica adimensional
 \bar{L}_i : Carga promedio mensual para la hora i [Wh]
 A_c : Área del arreglo [m^2]
 $\bar{\eta}_i$: Eficiencia de matriz promedio mensual para la hora i
 $\bar{I}_{T,i}$: Irradiación solar promedio mensual sobre una superficie [J/m^2]
 G_d : Radiación difusa [W/m^2]
 G_b : Radiación reflejada del suelo [W/m^2]

Utilizabilidad horaria media mensual: Podemos desarrollar una métrica estadística para la radiación, la cual llamaremos "utilizabilidad", definiéndose como la proporción de la radiación total que se recibe con una intensidad mayor al nivel crítico. Posteriormente, al multiplicar el promedio de radiación durante el período por esta proporción, podemos calcular la energía total utilizable.

$$\phi = \begin{cases} 0 & \text{if } X_c \geq X_m \\ \left(1 - \frac{X_c}{X_m}\right)^2 & \text{if } X_m = 2 \\ \left[|g| - \left[g^2 + (1 + 2g)\left(1 - \frac{X_c}{X_m}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (39)$$

$$g = \frac{X_m - 1}{2 - X_m} \quad (40)$$

$$X_m = 1.85 + 0.169 \frac{\bar{R}_h}{\bar{k}_T^2} - 0.0696 \frac{\cos(\beta)}{\bar{k}_T^2} - 0.981 \frac{\bar{k}_T}{\cos^2 \delta} \quad (41)$$

$$\bar{k}_T = \frac{\bar{I}}{\bar{I}_o} = \frac{r_t \bar{H}}{r_d \bar{H}_o} = \frac{r_t}{r_d} \bar{K}_T = (a + b \cos \omega) \bar{K}_T \quad (42)$$

Estimación de radiación horaria a partir de datos diarios

La relación entre la radiación total por hora y la radiación total diaria, en función de la duración del día y la hora en cuestión:

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (43)$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (44)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (45)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (46)$$

la proporción de radiación difusa horaria y radiación difusa diaria, en función del tiempo y la duración del día.

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} \quad (47)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (48)$$

Para cada hora o par de horas, el promedio mensual de radiación horaria incidente en el colector viene dado por:

$$\bar{I}_T = \bar{K}_T \bar{H}_o \left[\left(r_t - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} r_d \right) R_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} r_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \rho_g r_t \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \right] \quad (49)$$

La generación horaria promedio mensual que excede la carga se puede escribir como.

$$\bar{E}_{ex,i} = \bar{E}_i \phi_i \quad (50)$$

Donde:

- $\bar{E}_{ex,i}$: Generación horaria promedio mensual que excede la carga [Wh]
- \bar{E}_i : Generación horaria promedio mensual [Wh]
- ϕ_i : Fracción de la radiación incidente que excede este nivel crítico de radiación

La energía de la carga es

$$\bar{E}_{L,i} = \bar{E}_i (1 - \phi_i) \quad (51)$$

Donde:

- $\bar{E}_{L,i}$: Energía de la carga para la hora i [Wh]
- \bar{E}_i : Generación horaria promedio mensual [Wh]
- ϕ_i : Fracción de la radiación incidente que excede este nivel crítico de radiación

El exceso de energía diario promedio mensual y la energía para la carga se obtienen sumando todas las horas del día:

$$\bar{E}_L = \sum_{i=1}^{24} \bar{E}_{L,i} \quad (52)$$

$$\bar{E}_{ex} = \sum_{i=1}^{24} \bar{E}_{ex,i} \quad (53)$$

Donde:

- \bar{E}_{ex} : Exceso de energía diario promedio mensual [Wh].
- \bar{E}_L : Energía para la carga diario promedio mensual [Wh].

La fracción promedio mensual de la carga transportada por el sistema fotovoltaico sin almacenamiento es

$$f_o = \frac{\bar{E}_L}{\sum_{i=1}^{24} \bar{L}_i} = \frac{\bar{E}_L}{\bar{L}} \quad (54)$$

Donde:

f_o : Fracción promedio mensual de la carga transportada por el sistema fotovoltaico sin almacenamiento

\bar{L} : Carga promedio mensual [Wh]

\bar{E}_L : Energía para la carga diario promedio mensual [Wh].

E_{ex} Es la cantidad diaria promedio mensual de energía que no puede ser utilizada por la carga cuando se genera y debe almacenarse, desecharse o alimentarse a una red eléctrica. A partir de consideraciones físicas, es posible poner límites a Δfs . Para ello, es conveniente definir un término que sea el valor de Δfs que se encontraría si se pudiera almacenar todo el exceso de energía de un sistema sin almacenamiento. Esta energía vertida sin almacenamiento es:

$$d_o = \frac{\eta_b \bar{E}_{ex}}{\bar{L}} \quad (55)$$

Donde:

d_o : Energía vertida sin almacenamiento

\bar{L} : Carga promedio mensual [Wh].

η_b : Eficiencia de almacenamiento de la batería

Si d_o es mucho menor que $\frac{B_c}{L}$, la relación entre la capacidad de la batería y la carga diaria promedio, la batería nunca se cargará por completo y no se descargará energía. Por lo tanto, en el límite inferior, cuando d_o tiende a 0, Δfs tiende a 0. Si d_o es muy grande, es decir, si el exceso de energía que está disponible para almacenar es grande en comparación con la carga promedio, Δfs tiende a su límite superior. Este límite es $1 - f_o$, ya que la fracción de la carga suministrada por la energía solar no puede exceder la unidad. Además de este límite, existe otro límite superior de Δfs . Si d_o es grande, la matriz cubrirá todas las cargas durante el día y la batería solo se descargará durante la noche. En esta situación, Δfs puede estar limitado por la relación entre la capacidad de la batería y la carga, B_c/L . Por lo tanto, el límite superior de Δfs se puede expresar como:

$$\Delta f_{max} = \min \left[(1 - f_o), \frac{B_c}{\bar{L}} \right] \quad (56)$$

Donde:

- Δf_{max} : Límite superior de Δf_s
 B_c : Capacidad de la batería [Wh]
 \bar{L} : Carga promedio mensual [Wh]
 $1 - f_o$: Fracción de la carga suministrada por la energía

La contribución al sistema de batería:

$$\Delta f_s = \frac{d_o + \Delta f_{max} - [(d_o + \Delta f_{max})^2 - 4P d_o \Delta f_{max}]^{\frac{1}{2}}}{2P} \quad (57)$$

$$P = 1.315 - 0.1059 \frac{f_o \bar{L}}{B_c} - \frac{0.1847}{\bar{K}_T} \quad (58)$$

Donde:

- Δf_s : La contribución al sistema de batería
 d_o : Energía vertida sin almacenamiento
 Δf_{max} : límite superior de Δf_s

La correlación se desarrolló mediante el cálculo de valores de Δf_s para un rango de tipos de carga diurna, tres climas y capacidades de batería de 0 a 2 L. (Duffie et al., 2020)

2.2.1.6. Modelo Eléctrico

Para evaluar el rendimiento de las células solares y diseñar sistemas de energía basados en ellas, es esencial considerar las características eléctricas, específicamente la relación entre voltaje y corriente bajo distintos niveles de radiación y temperaturas. Existen múltiples modelos celulares que van desde simples hasta detallados, reflejando los procesos físicos que ocurren en las células. Para el diseño del sistema, el modelo debe permitir calcular la corriente, el voltaje y la potencia de los conjuntos de celdas en diversas condiciones operativas.

El modelo presentado para la relación corriente-voltaje de los convertidores fotovoltaicos y su dependencia de la radiación solar y la temperatura de la celda se basa en la información proporcionada por el fabricante. Hay otros modelos que requieren información adicional que generalmente no está disponible por parte del fabricante.

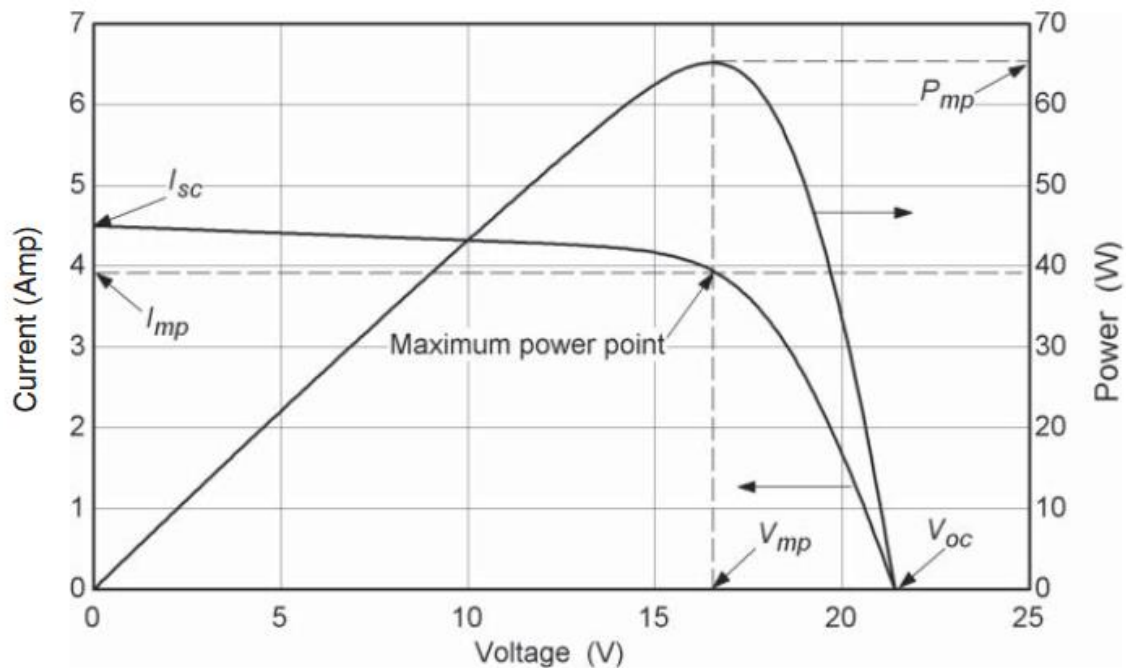


Figura 2.11. Curvas típicas I-V y P-V para un módulo fotovoltaico.

Fuente: (Duffie et al., 2020)

La curva característica corriente-voltaje (IV) de un módulo fotovoltaico típico se muestra en la figura.2.11. El eje de corriente (donde $V=0$) es la corriente de cortocircuito I_{sc} , y la intersección con el eje de tensión (donde $I=0$) es la tensión de circuito abierto V_{oc} . Para este módulo, la corriente disminuye lentamente a aproximadamente 15V y luego disminuye rápidamente a las condiciones de circuito abierto a aproximadamente 21,4V. A modo de comparación, una sola celda de silicio de 1 cm^2 con un nivel de radiación solar de $1000\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ tiene un voltaje de circuito abierto de aproximadamente de 0,6 V y una corriente de cortocircuito de aproximadamente 20 a 30 mA.(Duffie et al., 2020)

La potencia en función del voltaje también se muestra en la figura 2.11. La potencia máxima que se puede obtener corresponde al rectángulo de área máxima bajo la curva IV. En el punto de máxima potencia, la potencia P_{mp} , la corriente es I_{mp} y el voltaje es V_{mp} . Idealmente, las celdas siempre operarían en el punto de máxima potencia, pero en la práctica las celdas operan en un punto de la curva IV que coincide con la característica IV de la carga.

Las celdas se montan en módulos y se utilizan varios módulos en matrices. Los módulos individuales pueden tener celdas conectadas en combinaciones en serie y en paralelo para obtener la corriente y el voltaje deseados. También se pueden disponer conjuntos de módulos en serie y en paralelo. Para módulos o celdas conectadas en serie, los voltajes se suman, y cuando se conectan en paralelo, las corrientes se suman. Si las celdas son idénticas, al conectar 5 en serie incrementara todos los voltajes en un factor de 5 y conectar 5 en paralelo incrementara la corriente en un factor de 5. Si las celdas no son idénticas, se requerirá un análisis más detallado.

La figura 2.12. muestra un circuito equivalente que se puede utilizar para una celda individual, un módulo que consta de varias celdas o un matriz de que consta de críos módulos. A una temperatura y radiación solar fijas, la curva característica IV de este modelo viene dada por:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (59)$$

Y la potencia está dada por:

$$P = IV \quad (60)$$

Este circuito requiere que se conozcan 5 parámetros:

Donde:

- I_L : La corriente de la luz [A].
- I_o : La corriente de saturación inversa del diodo [A].
- R_s : La resistencia en serie [Ω].
- R_{sh} : La resistencia de derivación [Ω].
- a : Factor de idealidad modificado [-].

Los cinco parámetros pueden ser funciones de la temperatura de la celda y la radiación solar absorbida.

Factor de idealidad modificado(a):

está relacionado con constantes físicas y un parámetro n siendo.

$$a \equiv \frac{nkTN_s}{q} \quad (61)$$

Donde:

- n : Factor de idealidad (es igual a 1 para un diodo ideal y típicamente entre 1 y 2 para diodos reales)
- k : Constante de Boltzmann ($1,381 * 10^{-23}$ J/K)
- T : Temperatura de la celda [°C]
- q : Carga electrónica ($1,602 * 10^{-19}$ coulomb (1 C=1As))

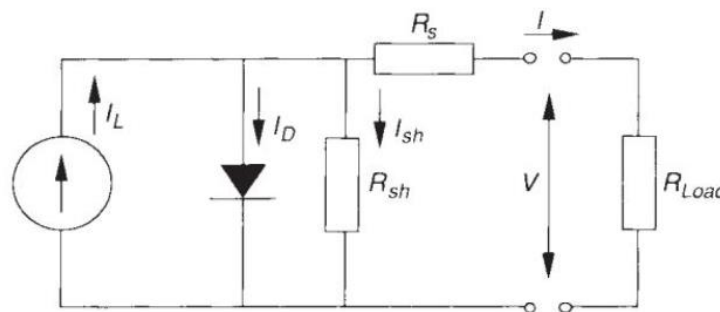


Figura 2.12. Circuito equivalente para un generador fotovoltaico.

Fuente: (Duffie et al., 2020)

Los cinco parámetros del modelo se obtienen utilizando mediciones de la corriente y características de voltaje de un módulo en las condiciones de referencia proporcionadas por el fabricante y otras características fotovoltaicas conocidas. Mediciones de las características eléctricas fotovoltaicas tradicionales. opcionalmente se realizan en una condición de referencia estándar: radiación incidente de 1000W/m², una temperatura celular de 25C, y una distribución espectral correspondiente a una masa de aire de 1,5. Las mediciones de pares IV en condiciones de referencia generalmente están disponibles del fabricante en condiciones de circuito abierto, condiciones de cortocircuito y condiciones de potencia máxima. Además, los fabricantes suelen proporcionar el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito, I_{sc}, el coeficiente de temperatura de la tensión de circuito abierto, V_{oc}, y la temperatura coeficiente de potencia máxima, P_{mp}. El resto de esta sección analiza un método para encontrar los cinco parámetros en condiciones de referencia y cómo varían los parámetros con condiciones de operación.

Dado que se deben determinar cinco parámetros, es necesario conocer cinco condiciones diferentes.

El método adoptado aquí es utilizar los tres puntos IV conocidos, la condición en el punto de máxima potencia donde la derivada de la potencia con respecto al voltaje es cero y el coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto.

En condiciones de cortocircuito, el voltaje es cero y la corriente es $I_{sc,ref}$:

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{I_{sc,ref} R_{s,ref}}{a_{ref}} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (62)$$

En condiciones de circuito abierto, la corriente es cero y el voltaje es V_{oc} , de modo que:

$$I_{L,ref} = I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}} \right) - 1 \right] + \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (63)$$

El par I-V medido en condiciones de máxima potencia se puede sustituir en la ecuación, lo que da como resultado.

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_{s,ref}}{a_{ref}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (64)$$

La cuarta condición, donde la derivada de la potencia con respecto al voltaje es igual a cero, da como resultado:

$$\frac{I_{L,ref}}{V_{mp,ref}} = \frac{\frac{I_{o,ref}}{a_{ref}} \exp \left(\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_{s,ref}}{a_{ref}} \right) + \frac{1}{R_{sh,ref}}}{1 + \frac{I_{o,ref} R_{s,ref}}{a_{ref}} \exp \left(\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_{s,ref}}{a_{ref}} \right) + \frac{R_{s,ref}}{R_{sh,ref}}} \quad (65)$$

La condición final garantiza que el modelo prediga correctamente el coeficiente de temperatura conocido del voltaje de circuito abierto, lo que da como resultado:

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = \mu_{v,oc} \approx \frac{V_{oc}(T_c) - V_{oc}(T_{c,ref})}{T_c - T_{c,ref}} \quad (66)$$

El valor elegido para la temperatura de la celda T_c no importa mucho, ya que elegir T_c entre 1 y 10 grados por encima o por debajo de T_{ref} no cambia significativamente el resultado. El voltaje de circuito abierto a la temperatura T_c se encuentra a partir de la Ecuación 65 con $I = 0$. Pero, dado que V_{oc} no se puede resolver explícitamente en esta

ecuación, se deben usar métodos numéricos. Además, es necesario obtener relaciones generales sobre cómo varían los parámetros a , I_L e I_o con las condiciones de operación.

De la teoría de los semiconductores (es decir, la definición de a), suponiendo que el factor de idealidad n no depende de la temperatura, tenemos

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (67)$$

La corriente luminosa (I_L) es casi una función lineal de la radiación solar incidente. Se observa que la corriente luminosa depende de la radiación solar absorbida efectiva (S), la temperatura de la celda (T_c) y el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito ($\mu_{I,sc}$). La corriente de luz I_L para cualquier condición de operación está relacionada con la corriente de luz en las condiciones de referencia por.

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} [I_{L,ref} + \mu_{I,sc}(T_c - T_{c,ref})] \quad (68)$$

Donde:

$\frac{S}{S_{ref}}$: Relación solar absorbida efectiva estimada.

Corriente de saturación inversa del diodo, I_o . La relación de su ecuación a la nueva temperatura de funcionamiento con respecto a la temperatura de referencia se produce.

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left(\frac{E_g}{kT}\Big|_{T_{c,ref}} - \frac{E_g}{kT}\Big|_{T_c}\right) \quad (69)$$

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - C(T - T_{c,ref}) \quad (70)$$

Donde:

E_g : Energía de banda prohibida del material [$E_{g,ref} = 1,12 \text{ eV} (1,794 \times 10^{-19} \text{ J})$] para silicio y [$E_{g,ref} = 1,35 \text{ eV} (2,163 \times 10^{-19} \text{ J})$] para silicio para arseniuro de galio]

C : [$C = 0,0002677$ para silicio y $C = 0,0003174$ para arseniuro de galio]

k : constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23} \text{ JK}$).

Todas las cantidades con el subíndice “ref” provienen de mediciones en condiciones de referencia.

Se ha encontrado que la resistencia en derivación R_{sh} es prácticamente independiente de la temperatura, pero varía con la radiación absorbida. La pendiente de la curva IV en condiciones de circuito abierto es aproximadamente igual al inverso negativo de la resistencia en derivación, lo que significa que dI/dV en $V=0V = 0V=0$ es aproximadamente igual a $-1/R_{sh}$. En niveles típicos de radiación no concentrada, muchas celdas modernas presentan una pendiente negativa muy pequeña en condiciones de circuito abierto, indicando una alta resistencia en derivación. Para las células con una pendiente significativa en niveles de radiación no concentrada, la pendiente disminuye (y por ende la resistencia en derivación aumenta) a medida que disminuye el nivel de radiación. La siguiente relación se utiliza para relacionar la resistencia en derivación en condiciones de referencia con las condiciones de funcionamiento:

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{S_{ref}}{S} \quad (71)$$

Se supone que la resistencia en serie es independiente tanto de la temperatura como de la radiación solar, acción para que:

$$R_s = R_{s,ref} \quad (72)$$

El modelo ya está completo. Las ecuaciones 61 a 65 deben resolverse simultáneamente para determinar los cinco parámetros en condiciones de referencia. Debido a la naturaleza altamente no lineal de estas ecuaciones, no se resuelven fácilmente a menos que se utilicen buenas estimaciones iniciales y límites variables. Para las celdas modernas, la resistencia en derivación debe ser alta, por lo que es razonable suponer que $R_{sh,ref}$ es de 100Ω . Una buena estimación inicial para a_{ref} es $\frac{1,5kT_{ref}N_s}{q}$. En condiciones de cortocircuito, los términos segundo y tercero de la ecuación 61 son pequeños, lo que lleva a $I_{sc,ref}$ como una buena estimación inicial para $I_{L,ref}$. Si se ignora el último término de la ecuación 63 y -1 , una buena suposición para $I_{o,ref}$ es $I_{sc,ref} \exp(-V_{oc,ref}/a_{ref,guess})$. Finalmente, se encuentra una buena estimación para $R_{s,ref}$ sustituyendo los valores de estimación anteriores en la Ecuación 58 a máxima potencia, pero suponiendo que R_{sh} es

muy grande (el último término es entonces insignificante), de modo que la ecuación puede resolverse para R_s , árbitro, supongo. Una vez que se encuentran los valores para los parámetros en la condición de referencia, se utilizan las ecuaciones 66 a 71 para encontrar los parámetros en cualquier condición operativa.

A veces es deseable encontrar el punto de máxima potencia para el modelo diferencial. Al aplicar la ecuación. con respecto a V y establecer el resultado igual a cero, se obtiene:

$$\frac{I_{mp}}{V_{mp}} = \frac{\frac{I_o}{a} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{a}\right) + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}} + \frac{I_{o,ref}R_{s,ref}}{a_{ref}} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{a}\right)} \quad (73)$$

También debe satisfacerse la ecuación general IV en el punto de máxima potencia:

$$I_{mp} = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{a}\right) - 1 \right] - \left[\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}} \right] \quad (74)$$

La solución simultánea de estas dos ecuaciones produce la corriente y el voltaje del punto de máxima potencia.

2.2.2. Principios dinámicos

Para el sistema de seguidor solar, se utilizó una reductora de velocidad empleando engranajes de material ABS impresos en 3D. En el diseño de este seguidor solar, se aplicaron principios dinámicos para garantizar un funcionamiento eficiente y preciso del sistema. Estos principios se centran en la cinemática y dinámica de los engranajes, así como en aspectos como la relación de transmisión, el ángulo de contacto y la geometría de los dientes.

Relación de reducción de velocidad: Esta relación de reducción de velocidad es dependiente del número de dientes en el piñón entre el número de dientes en el engrane mayor.

$$\frac{n_p}{n_G} = \frac{N_G}{N_P} \quad (75)$$

n_p : Velocidad angular de piñón [RPM]

n_G : Velocidad angular del engrane [RPM]

N_G : Número de dientes del engrane

N_p : Número de dientes del piñón

Donde:

Paso: Los pasos son las magnitudes que controlan la distancia entre dientes y el tamaño de estos.

Paso Circular:

$$p = \pi \cdot \frac{D_G}{N_G} = \pi \cdot \frac{D_P}{N_P} \quad (76)$$

Donde:

D_G : Diámetro de paso del engrane [pulg]

N_G : Número de dientes del engrane

D_p : Diámetro de paso del piñón [pulg]

N_p : Número de dientes del piñón

Paso Diametral:

$$P_d = \frac{D_G}{N_G} = \frac{D_P}{N_P} \quad (77)$$

Donde:

D_G : Diámetro de paso del engrane [pulg]

N_G : Número de dientes del engrane

D_p : Diámetro de paso del piñón [pulg]

N_p : Número de dientes del piñón

Relación entre el paso circular y el diametral:

$$P_d \cdot p = \pi \quad (78)$$

Módulo métrico:

$$m = \frac{D_G}{N_G} = \frac{D_P}{N_P} \quad (79)$$

Relación entre el módulo y el paso diametral:

$$m = \frac{25.4}{P_d} \quad (80)$$

Donde:

D_G : Diámetro de paso del engrane [pulg]

N_G : Número de dientes del engrane

Tabla.2.2

Módulos normalizados

Módulo(mm)	Pd equivalente	Pd normalizado más cercano(dientes/pulg)
0.3	84.667	80
0.4	63.5	64
0.5	50.8	48
0.8	31.75	32
1	25.4	24
1.25	20.32	20
1.5	16.933	16
2	12.7	12
2.5	10.16	10
3	8.466	8
4	6.35	6
5	5.08	5
6	4.233	4
8	3.175	3
10	2.54	2.5
12	2.117	2
16	1.587	1.5
20	1.27	1.25
25	1.016	1

Fuente: (Mott, 2004)

Ángulo de presión: Es el ángulo que forma la tangente a los círculos de paso y con la línea perpendicular a la superficie del diente en el engranaje

$$D_b = D \cdot \cos(\phi) \quad (81)$$

Donde:

D_B : Diámetro del círculo base [pulg]

D : Diámetro del círculo de paso [pulg]

Velocidad en la línea de paso:

$$v_t = R_p \cdot \omega_p = R_G \cdot \omega_G \quad (82)$$

Donde:

- R_p : Radio del piñón [pulg]
 ω_p : Velocidad angular del piñón [RPM]
 R_p : Radio del piñón [pulg]
 ω_p : Velocidad angular del piñón [RPM]

Relación de velocidades: Está definida como la relación de la velocidad angular del engrane de entrada con la del engrane de salida, para un solo par de engranes.

$$VR = \frac{\omega_p}{\omega_G} = \frac{n_p}{n_G} = \frac{R_p}{R_G} = \frac{D_G}{D_p} = \frac{N_G}{N_p} = \frac{\text{velocidad}_p}{\text{velocidad}_G} = \frac{\text{tamaño}_G}{\text{tamaño}_p} \quad (83)$$

Donde:

- R_p : Radio del piñón [pulg]
 ω_p : Velocidad angular del piñón [RPM]
 R_p : Radio del piñón [pulg]
 ω_p : Velocidad angular del piñón [RPM]

Valor del tren: Este término se refiere a la relación que existe entre la velocidad de entrada del primer engranaje del tren con la velocidad de salida del último engranaje del tren.

$$VR_1 = \frac{n_A}{n_B} \quad (84)$$

$$VR_2 = \frac{n_C}{n_D} \quad (85)$$

$$TV = VR_1 \cdot VR_2 = \frac{n_A}{n_B} \cdot \frac{n_C}{n_D} = \frac{n_A}{n_D} \quad (86)$$

También se puede expresar en función del número de dientes

$$TV = VR_1 \cdot VR_2 = \frac{N_B}{N_A} \cdot \frac{N_D}{N_C}$$

$$TV = \frac{\text{producto del número de dientes en los engranajes conducidos}}{\text{producto del número de dientes en los engranajes conductores}} \quad (87)$$

2.2.3. Principios estructurales

Relación par de torsión, potencia y velocidad de giro:

$$T = 63000 \frac{P}{n} \quad (88)$$

Donde:

- P : Potencia [HP]
 n : Velocidad de giro [RPM]

Engranajes de plástico:

Análisis de esfuerzo en engranajes de plástico:

$$\sigma = \frac{W_t \cdot P_d \cdot SF}{F \cdot Y} \quad (89)$$

Donde:

- W_t : Carga tangencial [lb]
 P_d : Paso diametral
 SF : Factor de seguridad
 F : Ancho de cara [pulg]
 Y : Factor de Lewis

Tabla.2.3.

Esfuerzo flexionante admisible aproximado en engranajes de plástico.

Material	Esfuerzo aproximado admisible de flexión, ksi(MPa)	
	Sin carga	Carga de vidrio
ABS	3000(21)	6000(41)
Acetal	5000(34)	7000(48)
Nylon	6000(41)	12000(83)
Policarbonato	6000(41)	9000(62)
Poliéster	3500(24)	8000(55)
Poliuretano	2500(17)	

Fuente: Plastics Garing Manchester, CT, ABA/PGT (1994).

Tabla.2.4.

Factor de Lewis para engranajes de plástico.

Número de dientes	Forma del diente		
	14 1/2°, Profundidad completa	20°, Profundidad completa	20° Corto
14	-	-	0.54
15	-	-	0.566
16	-	-	0.578
17	-	0.512	0.587
18	-	0.521	0.603
19	-	0.534	0.616
20	-	0.544	0.628
22	-	0.559	0.648

24	0.509	0.572	0.664
26	0.522	0.588	0.678
28	0.535	0.597	0.688
30	0.54	0.606	0.698
34	0.553	0.628	0.714
38	0.566	0.651	0.729
43	0.575	0.672	0.739
50	0.588	0.694	0.758
60	0.604	0.713	0.774
75	0.613	0.735	0.792
100	0.622	0.757	0.808
150	0.635	0.779	0.83
300	0.65	0.801	0.855
Rack	0.66	0.823	0.881

Fuente: DuPont Polymers, Wilmington, DE

2.2.4. Materiales y recursos.

Para el diseño y cálculo analítico de un redireccionador para energía fotovoltaica, se emplearon varias herramientas de software especializadas. ANSYS® se utilizó para modelar el comportamiento térmico de las celdas bajo condiciones especiales y para evaluar el comportamiento fluido-estructura. EES (Engineering Equation Solver) se empleó para realizar análisis energéticos y generar memorias de cálculo de distintos elementos, permitiendo evaluar el comportamiento térmico del redireccionador en diversas condiciones operativas. MATLAB se utilizó para modelar y simular el comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico, así como para realizar análisis de datos y optimización de parámetros. Además, Excel se empleó para algunos cálculos específicos, proporcionando un enfoque adicional para análisis de datos. Autodesk Inventor se utilizó para modelar los componentes del sistema, mientras que Fusion 360 se empleó para diseñar los engranajes que luego fueron impresos en 3D. La combinación de estas herramientas proporcionó un enfoque integral para el diseño y análisis del redireccionador.

2.3. Normas y procedimientos aplicables.

2.3.1. Metodología VDI 2221.

La metodología VDI 2221 es un enfoque estructurado y sistemático para el diseño de sistemas mecánicos que se centra en la identificación y análisis de requisitos, la

generación de conceptos de diseño, la evaluación de alternativas y la optimización del diseño final. Se basa en principios de ingeniería que guían el proceso desde la concepción hasta la implementación, fomentando la iteración y la mejora continua. Esta metodología proporciona un marco robusto para la resolución de problemas en el ámbito de la ingeniería mecánica, asegurando un enfoque metódico y eficiente en el desarrollo de proyectos en esta disciplina.



Capítulo III

3. Dimensionamiento y simulación

3.1. Cálculo analítico teórico preliminar

3.1.1. Análisis preliminar.

Tabla.3.1.

Lista de exigencias

Lista de exigencias		Pág. 1 de 1 Edición Rev. A
Proyecto	Diseño y evaluación estructural de un sistema móvil de captación y redireccionamiento de radiación solar	Fecha: Abril/2023
	UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA	Revisado: M.J.E.U
		Elaborado: M.J.E.U
Deseo/Exigencia	Descripción	Responsable
	Función principal:	
E(a)	a) Lograr captar y redireccionar óptimamente la radiación solar	M.J.E.U
	Geometría:	
E(b)	b) Dimensiones a escala prototipo	M.J.E.U
	Cinemática:	
E(c)	c)El sistema de ser capaz de seguir la luz solar y reflejarla a un foco donde se concentre la energía solar	M.J.E.U
	Energía:	
E(d)	d)Mediante energía eléctrica. Se trabajará con VDC de 12 o 24 V	M.J.E.U
	Fabricación:	
D(d,e)	d)Se procurará materiales ligeros	
E(f)	e) Se utilizará piezas impresas en 3d	M.J.E.U
	f) el diseño de los elementos que lo componen debe ser justificado	
	Montaje:	
E(g)	g) El equipo deber ser desmontable	M.J.E.U
	Transporte:	
E(h)	h) El transporte debe ser sencillo ya que se manejará el tamaño de un prototipo, también se podrá desmontar para su transporte	M.J.E.U

Fuente: Elaboración propia

Tabla.3.2.

Matriz morfológica

	Soluciones			
	1	2	3	4
Tipo de reflector				
Tipo de seguidor				
Tipo de transmisión				
Actuadores				

Fuente: Elaboración propia

Durante el desarrollo del proyecto de diseño y análisis estructural de un sistema móvil para capturar y redirigir radiación solar, se definieron las exigencias del sistema y se evaluaron alternativas técnicas clave. La Tabla 3.1 enumeró los requisitos fundamentales relacionados con funcionalidad, geometría, cinemática, energía, fabricación, montaje y transporte, acompañados de descripciones y asignación de responsabilidades. Por otro lado, la Tabla 3.2 presentó una matriz morfológica con diferentes opciones para componentes principales, como reflectores, seguidores, sistemas de transmisión y actuadores, facilitando la selección de soluciones viables alineadas con los objetivos del proyecto.

3.1.2. Diseño preliminar del sistema.

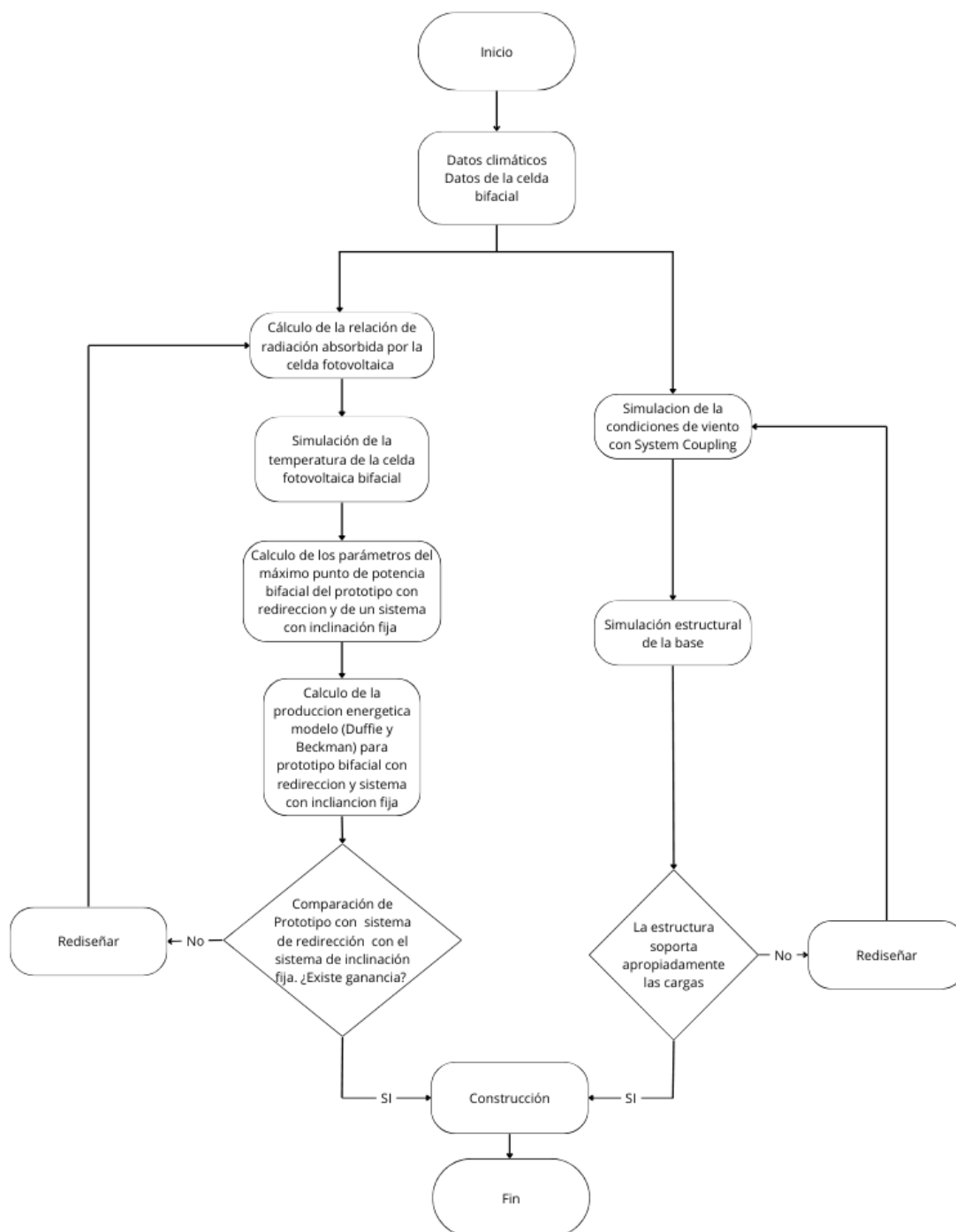


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso seguido para el diseño del prototipo planteado.

Fuente: Elaboración propia

El diagrama presentado en la figura 3.1. describe el flujo de trabajo desarrollado para el diseño, simulación y evaluación del sistema bifacial de captación y redirección de

radiación solar. El proceso se inicia con la recopilación de datos climáticos y parámetros específicos de la celda bifacial. Posteriormente, se aborda en dos etapas principales:

Análisis energético: Incluye el cálculo de la radiación absorbida, simulación térmica de la celda y evaluación del punto de máxima potencia. Además, se estima la producción energética comparando un prototipo con sistema de redirección frente a un sistema de inclinación fija, verificando si hay beneficios.

Análisis estructural: Considera simulaciones de viento mediante System Coupling y análisis de la base estructural, verificando si soporta las cargas previstas.

Si alguna de las evaluaciones no cumple con los criterios, se rediseña hasta alcanzar los parámetros óptimos antes de proceder a la construcción.

De acuerdo con las características previamente establecidas en la lista tabla 3.1. el prototipo debe ser desmontable, así como también de sencillo transporte siendo posible su cambio de lugar por una persona para ello se analizó la factibilidad de fabricar un panel fotovoltaico a escala prototipo, gracias a la propiedad de las celdas fotovoltaicas de producir energía en proporción a su área pueden fragmentarse en fracciones de igual tamaño las cuales producen el mismo voltaje, se determinó el uso de 36 celdas en serie para alcanzar el voltaje de trabajo.

En la figura 3.2 las celdas tienen las dimensiones de 166 mm*166 mm y se propuso el escalamiento de las celdas a un 1/6 de su tamaño para su fácil manipulación.

Con estas dimensiones producen los datos proporcionados por el fabricante,

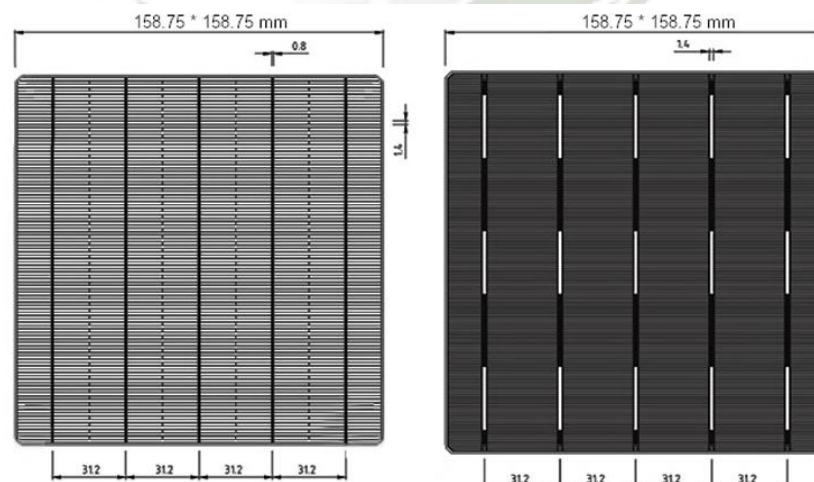


Figura 3.2. Esquema de la celda fotovoltaica a emplearse proporcionado por el fabricante

Fuente: Topsy Energy CO.,LTD.

Se escaló las propiedades eléctricas de la celda fotovoltaica de acuerdo al tamaño mostrado en figura 3.3. con sus propiedades de fábrica de acuerdo con lo mostrado en la figura 3.2., para poder estimar las dimensiones del panel a usar se propuso un esquema de la conexión en serie como la figura 3.4.

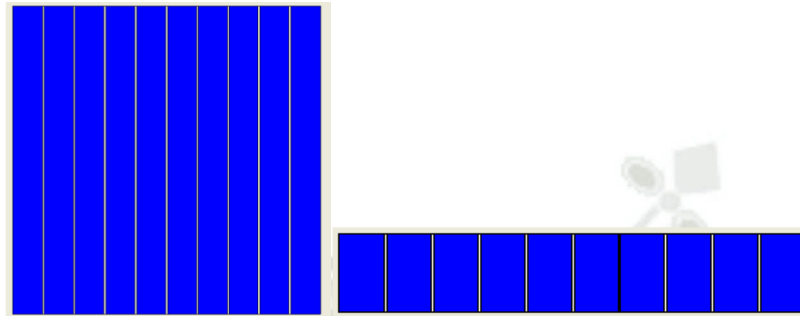


Figura 3.3. Configuración empleada para las celdas.

Nota. Esta figura representa las características de una de las celdas obtenidas de fábrica comparadas con una celda dividida en 1/6 de la original.

Características de la celda:

- Rango de eficiencia (%): 22,9
- Potencia nominal (W): 6,28
- Corriente de potencia máxima (A): 10,66
- Corriente de cortocircuito (A): 11,11
- Voltaje de potencia máxima (V): 0,589
- Voltaje de circuito abierto (V): 0,688

Características de la celda modificada:

- Rango de eficiencia (%): 22,9
- Potencia nominal (W): 1,046
- Corriente de potencia máxima (A): 1,7
- Corriente de cortocircuito (A): 1,85
- Voltaje de potencia máxima (V): 0,58
- Voltaje de circuito abierto (V): 0,688

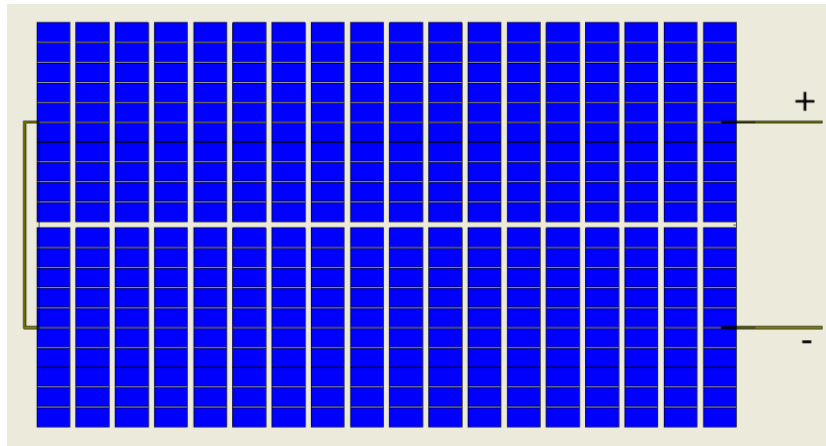


Figura 3.4. Configuración empleada para el panel.

Nota. Esta figura muestra un posible esquema de la conexión en serie de las celdas fotovoltaicas.

Se utilizará el diseño del segundo concentrador pseudo-parabólico traxle pero no se concentrará propiamente la energía solar ya que solo se busca redirigir la panel por lo que solo se usará un par de espejos y no dos pares como el concentrador anteriormente mencionado.

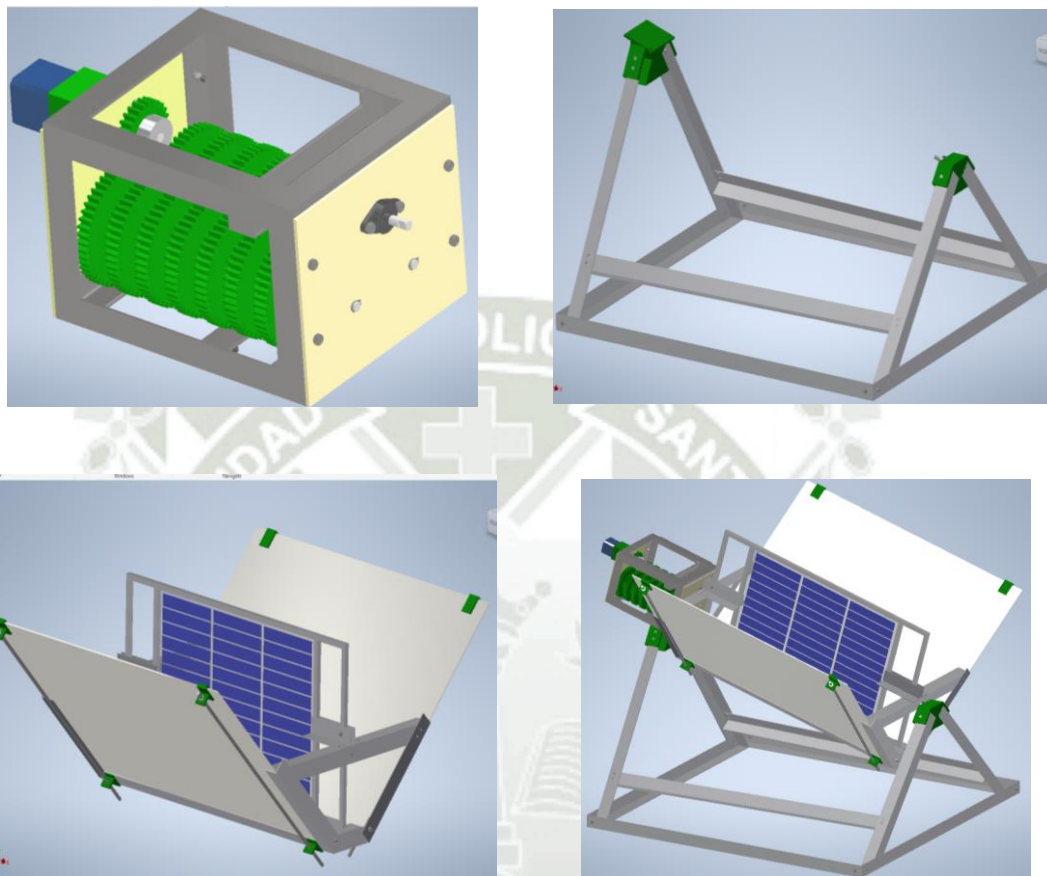
Otra consideración de diseño importante es que se usará el seguimiento de un solo eje con un eje paralelo al eje de la tierra ya que este tipo de seguidor funciona muy bien con el uso de espejos y el ángulo de inclinación del sistema de redirección será igual a la latitud de Arequipa.

La radiación será reflejada por espejos y estos tendrán mayor área que el panel bifacial para que el reflejo de la radiación sea dirigido a lo largo de todo el año ya que el ángulo de declinación que representa la trayectoria de sol en el cielo varía entre -23.45° a 23.45° a lo largo del año.

Se propuso un modelo para el prototipo y luego este será verificado mediante el proceso de la figura 3.1.

Tabla.3.3.

Ensamble del prototipo dividido por los sistemas principales



Nota. Este modelo se realizó con el software Autodesk Inventor y muestra el ensamble completo del prototipo planteado.

En la **Tabla 3.3** se detallan los componentes principales del prototipo, los cuales fueron calculados y diseñados de manera independiente, ya que cada uno cumple funciones específicas dentro del sistema. La estructura se encuentra soportada por ángulos de aluminio, mientras que las piezas de acople fueron fabricadas mediante impresión 3D, garantizando ligereza y flexibilidad en el ensamblaje del modelo.

El sistema de reflexión posee un eje de giro debido a que este rota respecto a ese eje para seguir el movimiento del sol.

3.1.3. Diseño y modelamiento general

Datos de entrada

Datos climáticos de Arequipa

Se extrajeron los datos de la estación meteorológica instalada en el techo del pabellón F. de la Universidad Católica de Santa María.

Tabla.3.4.

Datos climáticos y geográficos de ubicación planteada (Arequipa-Perú)

Latitud $\phi [^\circ]$	Longitud $L [^\circ]$	Temperatura ambiente promedio $T_{a,prom} [^\circ C]$	Temperatura ambiente máxima $T_{a,m\acute{a}x} [^\circ C]$	Velocidad del viento máxima $V_{max} \left[\frac{m}{s} \right]$	velocidad de viento promedio $V_{prom} \left[\frac{m}{s} \right]$	Radiación máxima $G_{max} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	Radiación promedio $G_{prom} \left[\frac{W}{m^2} \right]$
-16.39	-71.5	16.748	27.188	7.7	2	1276	715.61

Nota: Elaboración propia

Datos del panel fotovoltaico bifacial

Los datos de la celda bifacial fueron extraídos de su hoja técnica de Anexo F. y fue adaptada para las características de la celda de trabajo.

Tabla.3.5

Datos del panel bifacial conformado por las celdas adaptadas

	$A [m^2]$	$I_{sc} [V]$	$V_{oc} [V]$	$I_{mp} [A]$	$V_{mp} [V]$	$\mu_{V,oc} \left[\frac{\%}{K} \right]$	$\mu_{I,sc} \left[\frac{\%}{K} \right]$	$\mu_{mp} \left[\frac{\%}{K} \right]$
Cara delantera	0.187	1.8516	24.768	1.7766	21.204	-0.0036	0.0007	-0.0038
Cara posterior	0.187	1.33	24.4368	1.2582	21.1834	-0.0036	0.0007	-0.0038

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.1. Cálculo de la relación de radiación absorbida por la celda fotovoltaica

Se aplicaron las fórmulas de la sección 2.2.1.2 y se desarrolló una hoja de cálculo en el software EES (Engineering Equation Solver) para llevar a cabo los cálculos. El código utilizado se encuentra en el Anexo A, donde se muestra la programación completa para la relación de la radiación absorbida.

Descripción del Programa

El programa permite el análisis detallado de los parámetros de radiación solar en una superficie inclinada, incorporando características clave del EES como:

- Solución automática de sistemas de ecuaciones complejas.
- Representación gráfica de los resultados para una mejor interpretación.
- La capacidad de gestionar fórmulas termodinámicas avanzadas, facilitando el análisis de radiación solar.

VARIABLES DE ENTRADA PRINCIPALES DEL PROGRAMA

Datos de entrada:

- Número del día del año: $n = 75$
- Ángulo de zenit: $\theta_z = 13.97^\circ$
- Ángulo de incidencia: $\theta = 2.418^\circ$
- Inclinación de la superficie: $\beta = 16.39^\circ$
- Constante solar: $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$
- Reflectancia del suelo: $\rho_g = 0.2$
- Radiación de referencia: $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$

VARIABLES RELEVANTES:

- Radiación extraterrestre: G_o
- Índice de claridad: k_T
- Relación difusa: G_d
- Producto transmitancia-absorbancia:
 - Incidente: $\tau\alpha_b$
 - Normal: $\tau\alpha_n$
- Modificadores de incidencia:
 - $K_{\tau\alpha_b}$
 - $K_{\tau\alpha_g}$
 - $K_{\tau\alpha_d}$
- Relación entre la radiación absorbida y la de referencia: S/S_{ref}

Resolución:

El programa cuenta con un total de 31 ecuaciones y un número equivalente de variables, como se muestra en la figura 3.5. Estas ecuaciones y variables están organizadas automáticamente en 4 bloques, los cuales se resuelven de manera secuencial.

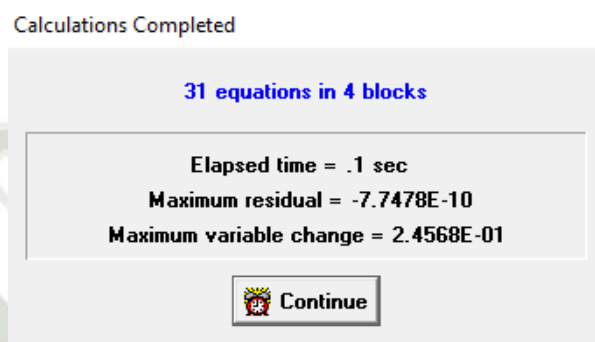


Figura 3.5. Número de ecuaciones y variables del programa del Anexo A.

Fuente: Elaboración propia

Resultados obtenidos

- Masa de aire (AM): 1.03
- Radiación total (G): 777.7 W/m^2
- Relación radiación absorbida (S/S_{ref}): 0.7543
- Radiación de haz (G_b): 403.1 W/m^2
- Producto transmitancia-absorbancia (TA_b): 0.9415
- Modificadores de incidencia (K_{TAd}): 0.9547
- Ángulo de zenit (θ_z): 13.97°

3.1.3.2. Simulación de temperatura**Descripción del Programa**

Para este análisis, se simuló el comportamiento térmico de una celda fotovoltaica bajo condiciones específicas, utilizando el software ANSYS®. Esta simulación evaluó las temperaturas a las que se someten las celdas fotovoltaicas, considerando características y dimensiones diferentes a las tradicionales. Se tuvieron en cuenta los efectos de la radiación, la convección y las propiedades térmicas de los materiales, aplicando un enfoque detallado de pre-proceso, simulación y post-proceso.

Consideraciones e hipótesis de la simulación

- La radiación máxima considerada fue de 1276 W/m^2 incidiendo de forma ortogonal sobre el panel.
- La capa delantera de vidrio reflejó un 7% de la radiación (89.32 W/m^2) y absorbió un 10% (127.6 W/m^2).
- La energía restante (1059 W/m^2) se aplicó como flujo de calor directo sobre las celdas fotovoltaicas.
- El coeficiente de convección se determinó mediante la fórmula $h=5.67+3.86V$, con un valor final de $13.39 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ basado en la velocidad media del viento. (Pavlovic et al., 2021)

Datos de entrada principales

Tabla.3.6.

Datos de las diferentes capas de la simulación térmica.

Capa	Nombre	Material	Espesor [m]	Ancho [m]	Altura [m]
1	Vidrio delantero	Vidrio	0.003	0.186	0.02766
2	EVA 1	EVA	0.0005	0.186	0.02766
3	Celda fotovoltaica	Silicio	0.00015	0.166	0.02766
4	EVA 2	EVA	0.0005	0.186	0.02766
5	Vidrio posterior	Vidrio	0.003	0.186	0.02766

Nota los datos fueron tomados de las características geométricas de los materiales seleccionados y que son típicamente usados para la composición de paneles fotovoltaicos y las medidas tomadas para el diseño

Pre-proceso y método de mallado:

Se modelaron las distintas capas y se aplicó un método de mallado específico para la cara de las celdas fotovoltaicas, que representó el plano de mayor interés. Las estadísticas del mallado se resumen en la Tabla 3.7:

Tabla.3.7.

Estadísticas del mallado aplicado a todas las capas (simulación térmica).

Nodos	77290
Elementos	31186

Nota. Los datos de esta tabla fueron proporcionados por el software ANSYS® de acuerdo con las propiedades establecidas del mallado

Propiedades de los materiales

Tabla.3.8.

Materiales utilizados (simulación térmica).

Nombre	Densidad $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Conductividad térmica	Calor específico a presión
		isotrópica $\lambda \left[\frac{W}{m^{\circ}C} \right]$	constante $C_p \left[\frac{J}{kg^{\circ}C} \right]$
Vidrio	3000	1.8	500
Celdas	2330	148	677
EVA	960	0.35	2090

Nota. EVA son las siglas de etileno vinil acetato. Fuente: de (Pavlovic et al., 2021)

Los materiales utilizados poseen las características colocadas en la tabla 3.8. y están colocadas en el orden indicado en la figura 3.6.

Podemos apreciar en la figura en qué planos fueron aplicadas los distintos flujos de calor.

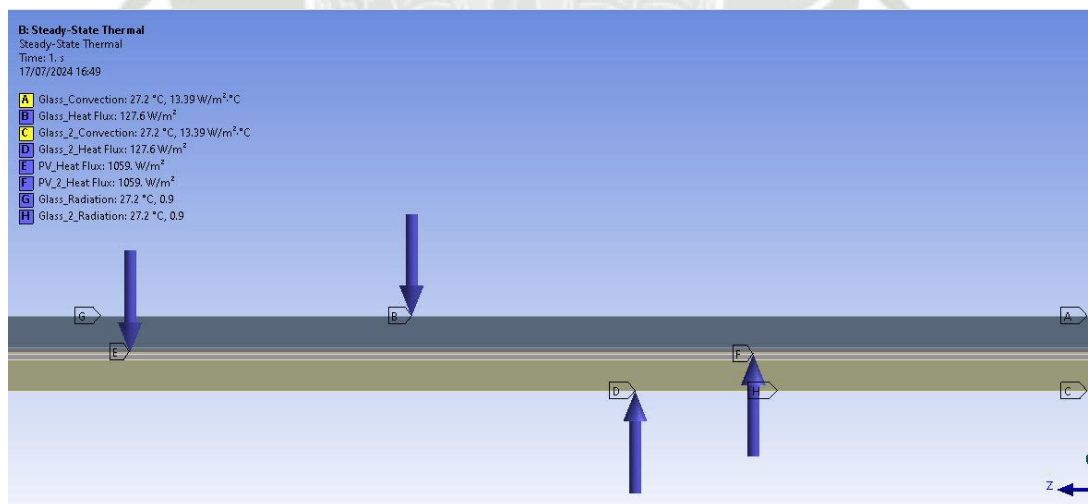


Figura 3.6. Cargas térmicas aplicadas a las distintas capas.

Fuente: Elaboración propia

Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación se discutieron en el capítulo 6.

3.1.3.3. *Cálculo de los valores eléctricos de referencia.*

Descripción del Programa

Para el cálculo de los valores eléctricos de referencia de una celda fotovoltaica bifacial, se optó por utilizar el programa Matlab. Este software permite resolver sistemas de ecuaciones no lineales mediante el uso del comando `fsolve`, que es ideal para encontrar soluciones numéricas a problemas complejos. Matlab es ampliamente utilizado en la simulación de procesos eléctricos y optimización de parámetros en sistemas fotovoltaicos. (Asghari Faryad et al., s. f.), .El código empleado está en el Anexo B.

La simulación de los parámetros eléctricos fue posible debido a las capacidades que ofrece Matlab, destacando las siguientes características:

- Permite la resolución de ecuaciones no lineales simultáneas, lo que facilita la obtención de parámetros eléctricos precisos sin necesidad de métodos de iteración manual.
- Ofrece herramientas avanzadas para la programación y personalización de algoritmos de solución.
- Presenta gráficos de alta calidad para la visualización de curvas características, como las curvas I-V y P-I.

Método de solución con fsolve

El comando `fsolve` en Matlab es una herramienta eficaz para resolver sistemas de ecuaciones no lineales. Se basa en métodos iterativos que ajustan las soluciones a partir de un conjunto de valores iniciales hasta alcanzar la convergencia deseada. El proceso depende de un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de interés y una función de error que `fsolve` minimiza para encontrar el resultado óptimo.

La función iterativa de `fsolve` se puede representar de manera general por la fórmula:

$$x_{n+1} = x_n - J^{-1}(x^n) \cdot F(x_n)$$

Donde J es la matriz jacobiana de la función F evaluada en x_n . Este enfoque permite resolver sistemas de ecuaciones simultáneas con alta precisión.

VARIABLES DE ENTRADA PRINCIPALES DEL PROGRAMA

Constantes y valores iniciales:

- Constante de Boltzmann: $k = 1.381 \times 10^{-23} [J/K]$.
- Carga del electrón: $q = 1.602 \times 10^{-19} [C]$
- Temperatura de referencia: $T_{cref} = 298.15 [K]$.
- Radiación de referencia: $G_{ref} = 1000 [W/m^2]$.
- Corriente de cortocircuito de referencia: $I_{scref} = 1.85166 [A]$
- Voltaje de circuito abierto de referencia.: $V_{ocref} = 24.768 [V]$
- Corriente en el punto de máxima potencia: $I_{mpref} = 1.7766 [A]$
- Voltaje en el punto de máxima potencia.: $V_{mpref} = 21.204 [V]$
- Número de celdas en serie: $N_s = 36$
- Coeficiente de temperatura de banda prohibida.: $C = 26.77 \times 10^{-5} [J/K]$
- Energía de banda prohibida de referencia.: $E_{gref} = 1.794 \times 10^{-19} [J]$
- Coeficiente de temperatura: $\alpha = 0.005$
- Temperatura operativa: $T_c = 308.2 [K]$.

VARIABLES DE SALIDA PRINCIPALES DEL PROGRAMA

Tabla.3.9.

Parámetros de referencia para la celda bifacial

	$R_{shref}[\Omega]$	a_{ref}	$I_{Lref}[a]$	$I_{oref}[a]$	$R_{sref}[\Omega]$
Cara delantera	3.38606e+09	0.99957	1.85142	3.21E-11	0.276924
Cara posterior	1.66870e+03	0.997782	1.33009	3.04E-11	0.12536

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El cálculo preciso de estos parámetros eléctricos es fundamental para entender el rendimiento de la celda fotovoltaica y optimizar su eficiencia en condiciones operativas reales. La comparación entre los resultados obtenidos para la cara delantera y la posterior muestra ligeras variaciones, lo que es esencial para evaluar y mejorar el diseño de celdas bifaciales.

3.1.3.4. Modelado eléctrico con Matlab-Simulink

Descripción del Programa

Para modelar el comportamiento eléctrico de una celda fotovoltaica bifacial, se utilizó el software Matlab-Simulink, que permite realizar simulaciones avanzadas de sistemas eléctricos con ecuaciones no lineales. El objetivo principal de esta simulación fue analizar el efecto de la temperatura y los flujos de radiación solar en la cara posterior, considerando variaciones del 10%, 5% y 2% de la radiación incidente en la cara frontal. Este enfoque permite evaluar cómo ambos factores afectan el rendimiento global de la celda. El modelo detallado se encuentra en el Anexo C.

Implementación del modelo eléctrico

El modelo eléctrico de la celda bifacial se construyó e implementó por etapas, utilizando como base el circuito equivalente representado en la Figura 3.7. Este circuito incluye:

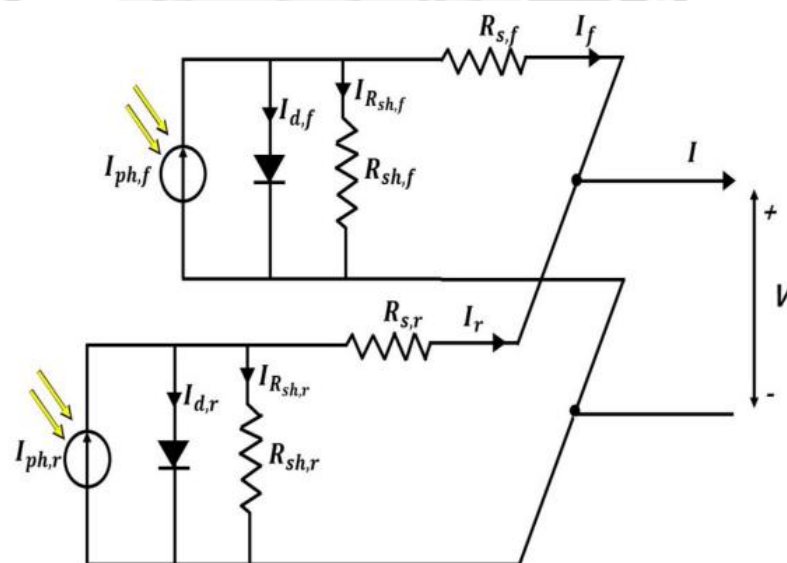


Figura 3.7. Circuito equivalente para una celda fotovoltaica bifacial.

Fuente: (Bhang et al., 2019)

- **Corriente fotogenerada (I_{ph}):** Representada por fuentes independientes para la cara frontal ($I_{ph,f}$) y la cara posterior ($I_{ph,r}$)
- **Pérdidas internas y de fuga:** Modeladas mediante resistencias en serie (R_s) y resistencias en paralelo (R_{sh}) para cada cara.

- **Recombinación de portadores:** Simulada mediante diodos independientes (I_d) para cada cara.

En Matlab-Simulink, estas características se implementaron utilizando bloques personalizados, como se aprecia en la figura 3.8. El modelo incluye:

1. **Cálculo de la corriente fotogenerada (I_L):** Utilizando la ecuación de generación de corriente proporcional a la radiación incidente.
2. **Cálculo de la corriente de saturación inversa (I_o):** Derivada de la ecuación que modela las propiedades del diodo.
3. **Integración en un modelo global:** Combinando los efectos de R_s , R_{sh} , y las contribuciones de ambas caras.

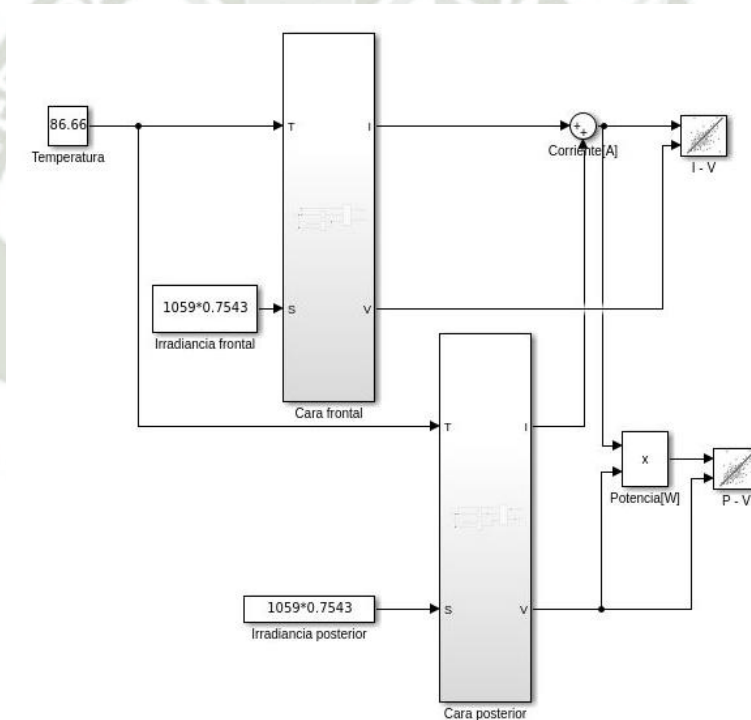


Figura 3.8. Modelado en el software Simulink del panel bifacial.

Fuente: Elaboración propia

Variables de entrada principales del programa

El programa requiere los siguientes datos de entrada para ejecutar las simulaciones:

1. **Temperatura:** Oscilando entre 76.27°C y 86.66°C , basada en resultados obtenidos mediante simulación térmica en ANSYS®.
2. **Flujos de radiación:**
 - **Cara frontal:** Irradiancia máxima de 798.8037 W/m^2 .
 - **Cara posterior:** Proporciones del 10%, 5%, y 2% de la radiación frontal.
3. **Parámetros iniciales:**
 - Área del panel ($A = 0.187\text{ m}^2$)
 - Valores iniciales de $I_L, I_O, R_S, Y R_{sh}$, calculados mediante fsolve.

VARIABLES DE SALIDA PRINCIPALES DEL PROGRAMA

El modelo genera los siguientes resultados:

1. **Curvas características I-V y P-V:** los resultados se plasmaron en la sección de resultados.
2. **Eficiencia de conversión:** determinar los valores de referencia se utilizó la figura 3.9. que muestra las características del máximo punto de potencia para las características de referencia de cada cara de la celda fotovoltaica bifacial.

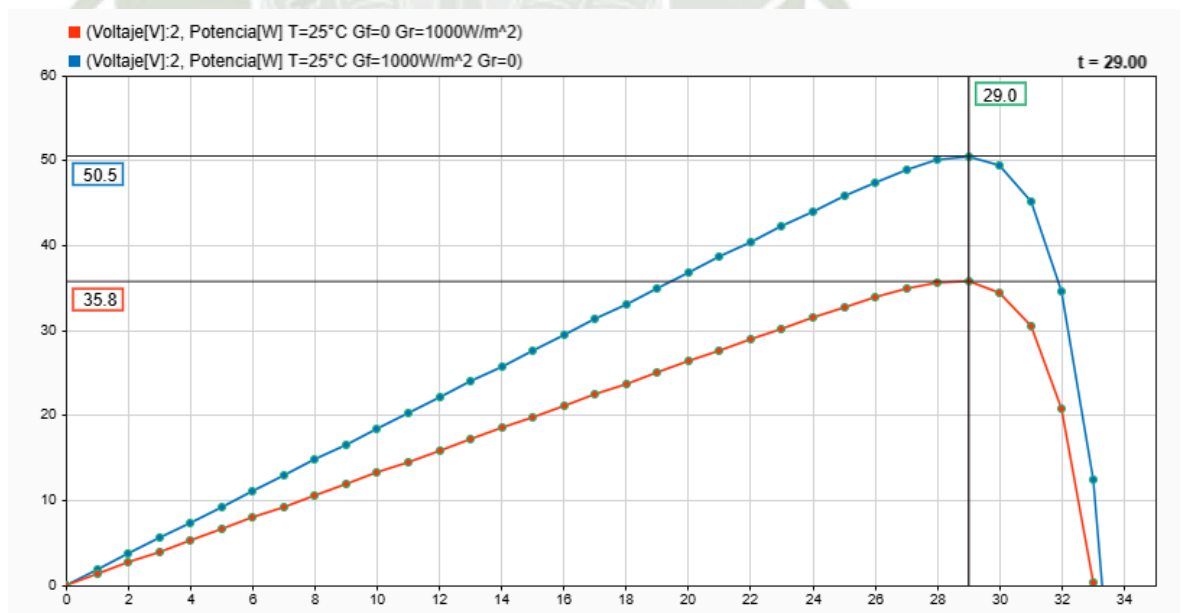


Figura 3.9. Gráfica P-V a las condiciones de referencia para ambas caras del panel fotovoltaico bifacial.

Fuente: Elaboración propia

- **Cara delantera:** Calculada con una potencia de salida de 50.5W.

$$\eta_{ref_front} = \frac{50.5[W]}{0.187[m^2] * 1000 \left[\frac{W}{m^2}\right]} = 27\%$$

- **Cara posterior:** Con una potencia de 35.8W.

$$\eta_{ref_rear} = \frac{35.8[W]}{0.187[m^2] * 1000 \left[\frac{W}{m^2}\right]} = 19.14\%$$

3.1.3.5. *Cálculo de la energía diaria usando EES*

El diseño se realizó utilizando el software EES para la memoria de cálculo, se procedió con el modelo descrito por (Duffie et al., 2020), se introdujeron las ecuaciones (15)-(20) para la dinámica solar debido a que se empleó un seguidor solar de un eje usando un eje similar al eje de la tierra, luego se utilizó las ecuaciones (24)-(57) dicho cálculo se encuentra en el Anexo D.

Cabe resaltar que estos cálculos son para una fecha en concreto, este procedimiento fue resuelto para el día 15/03/2024

Sistema fotovoltaico bifacial con redirección:

Variables de entrada:

- Número del día del año: $N = 75$
- Constante solar: $G_{sc} = 1367 W/m^2$
- Carga alimentada durante la operación del panel: $\bar{L}_l = 10 Wh$
- Ángulo de latitud: $\phi = -16.39[^\circ]$
- Radiación solar incidente a las condiciones de la temperatura nominal de funcionamiento de la celda: $G_{TNOCT} = 800 W/m^2$
- Temperatura nominal de funcionamiento de la celda: $T_{NOCT} = 46^\circ C$
- Temperatura ambiente a las condiciones de la temperatura nominal de funcionamiento de la celda: $T_{aNOCT} = 20^\circ C$
- Transmitancia-absorbancia: $\tau\alpha = 0.9$

- Eficiencia de referencia del panel en la cara frontal: $\eta_{mpref} = 0.27$
- Eficiencia de referencia del panel en la cara posterior: $\eta_{mprefrear} = 0.1914$
- Eficiencia de cualquier equipo de acondicionamiento de energía: $\eta_e = 0.9$
- Temperatura de referencia: $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$
- Número de paneles: $N_p = 1$
- Área del panel: $A_c = 0.187 \text{ m}^2$

Principales variables de salida:

- Temperatura ambiental promedio (T_{am}): Temperatura ambiente promedio en grados Celsius [$^{\circ}\text{C}$]
- Irradiación solar total (\bar{I}_T): Energía total recibida por unidad de área sobre una superficie inclinada [J].
- Radiación crítica adimensional ($X_{c,i}$): Relación de radiación crítica para cada hora del día [-].
- Eficiencia promedio mensual (η_i): Relación entre energía generada y energía recibida por los módulos fotovoltaicos [%].
- Energía eléctrica producida (\bar{E}_i): Energía generada por el sistema fotovoltaico promedio mensual por hora [Wh].
- Energía suministrada a la carga (\bar{L}_i): Energía que alimenta la carga conectada al sistema fotovoltaico [Wh].
- Utilizabilidad (ϕ_i): Fracción de energía útil aprovechada del sistema fotovoltaico [-].
- Exceso de energía promedio (\bar{E}_{exi}): Energía sobrante producida por el sistema no utilizada por la carga [Wh].
- Energía suministrada promedio diario (\bar{E}_{Li}): Energía entregada a la carga promedio mensual diario [Wh].

Resolución:

El programa cuenta con un total de 90 ecuaciones y un número equivalente de variables, como se muestra en la figura 3.21. Estas ecuaciones y variables están organizadas automáticamente en 12 bloques, los cuales se resuelven de manera secuencial.

3.1.3.6. Para un panel bifacial estático sin redireccionamiento

Cálculo de la energía diaria EES

VARIABLES DE ENTRADA:

- Número del día del año: $N = 75$
- Constante solar: $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$
- Carga alimentada durante la operación del panel: $\bar{L}_l = 10 \text{ Wh}$
- Ángulo de latitud: $\phi = -16.39[^\circ]$
- Radiación solar incidente a las condiciones de la temperatura nominal de funcionamiento de la celda: $G_{TNOCT} = 800 \text{ W/m}^2$
- Temperatura nominal de funcionamiento de la celda: $T_{NOCT} = 46^\circ\text{C}$
- Temperatura ambiente a las condiciones de la temperatura nominal de funcionamiento de la celda: $T_{aNOCT} = 20^\circ\text{C}$
- Transmitancia-absorbancia: $\tau\alpha = 0.9$
- Eficiencia de referencia del panel en la cara frontal: $\eta_{mpref} = 0.27$
- Eficiencia de referencia del panel en la cara posterior: $\eta_{mprefrear} = 0$
- Eficiencia de cualquier equipo de acondicionamiento de energía: $\eta_e = 0.9$
- Temperatura de referencia: $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$
- Número de paneles: $N_p = 1$
- Área del panel: $A_c = 0.187 \text{ m}^2$

RESOLUCIÓN:

El programa cuenta con un total de 90 ecuaciones y un número equivalente de variables, como se muestra en la figura 3.10. Estas ecuaciones y variables están organizadas automáticamente en 13 bloques, los cuales se resuelven de manera secuencial.

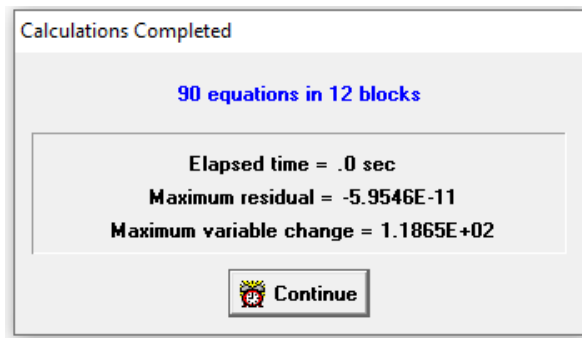


Figura 3.10. Número de ecuaciones y variables del programa del Anexo D.

Fuente: Elaboración propia

3.2. Evaluación y simulación.

3.2.1. Simulación computacional FEA

3.2.1.1. Simulación multi-física usando System Coupling

Para la determinación de las cargas a las cual el prototipo fue sometido se realizó una simulación multi-física para replicar las condiciones estáticas, así como también las condiciones debido al viento para esto se utilizó el software ANSYS®, se combinaron las herramientas Transient mechanical con Fluid flow CFX y se combinaron con la herramienta System Coupling.

Pre-proceso: El pre-proceso de una simulación System Coupling para evaluar el impacto del viento en una estructura se llevó a cabo en varias etapas esenciales. Primero, se adquirió y optimizó la geometría del modelo utilizando herramientas CAD, eliminando detalles innecesarios para simplificar el modelo. Luego, se definieron las propiedades de los materiales estructurales, considerando características como módulos elásticos y resistencia a la tracción.

A continuación, se establecieron las condiciones de contorno y las cargas aplicadas. Estas condiciones incluyeron restricciones de desplazamiento y la aplicación de cargas de viento calculadas. Se implementó el acoplamiento de sistemas para integrar la interacción fluido-estructura (FSI), coordinando los resultados del análisis de flujo de viento con la respuesta estructural.

Finalmente, se verificó exhaustivamente el modelo, revisando la geometría, las propiedades del material y las condiciones de contorno, y ejecutando análisis preliminares para asegurar la precisión de la simulación.

El primer paso es exportar la geometría de análisis, en la herramienta spaceClaim Reparamos y simplificamos la geometría para garantizar resultados mas fiables como se presenta acontinuacion en la figura 3.11 :

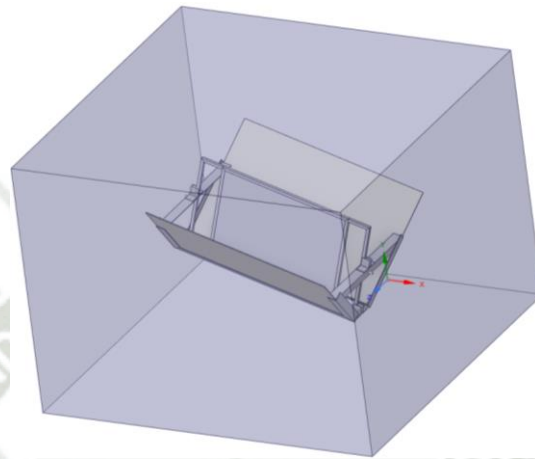


Figura 3.11. Geometría exportada del software Inventor y editada en SpaceClaim.

Fuente: Elaboración propia

- **Discretización del dominio de mechanical:** Ahora creamos el mallado para el solucionador mechanical, para realizar esto suprimimos la geometría “enclosure” que representa la parte fluida debido a que no debe ser mallada en este proceso, tal cual como se aprecia en la figura 3.12. las características de este mallado se encuentran en la tabla 3.13.

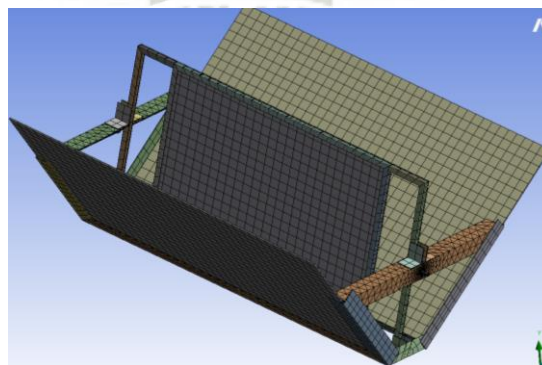


Figura 3.12. Mallado empleado para el solucionador Trasient Sturctural.

Fuente: Elaboración propia

Tabla.3.10.

Estadísticas del mallado empleado para el solucionador Trasient Sturctural.

Nodos	48744
Elementos	14814

Fuente: Elaboración propia

Se asignaron cuidadosamente las propiedades de los materiales a las zonas correspondientes de la estructura, incluyendo módulos elásticos, coeficientes de Poisson y resistencia a la tracción con los valores de la tabla 3.10. Se verificó la correcta identificación y adecuación de cada material como se puede apreciar en la figura 3.11.

Tabla.3.11.

Materiales usados en la simulación en mechanical.

Nombre	Densidad $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Módulo de Young $E [Pa]$	Razón de Poisson	Esfuerzo de tensión $\sigma_{ft} [Pa]$	Esfuerzo de compresión $\sigma_{fc} [Pa]$	Esfuerzo ultimo tensión $\sigma_{ut} [Pa]$
Acero inoxidable	7750	$1.93 \cdot 10^{11}$	0.31	$2.07 \cdot 10^8$	$2.07 \cdot 10^8$	$5.86 \cdot 10^8$
Aluminio	2770	$7.1 \cdot 10^{10}$	0.33	$2.8 \cdot 10^8$	$2.8 \cdot 10^8$	$3.1 \cdot 10^8$
Vidrio	2465	$6.9936 \cdot 10^{10}$	0.2149	-	-	$3.256 \cdot 10^7$

Fuente: Elaboración propia

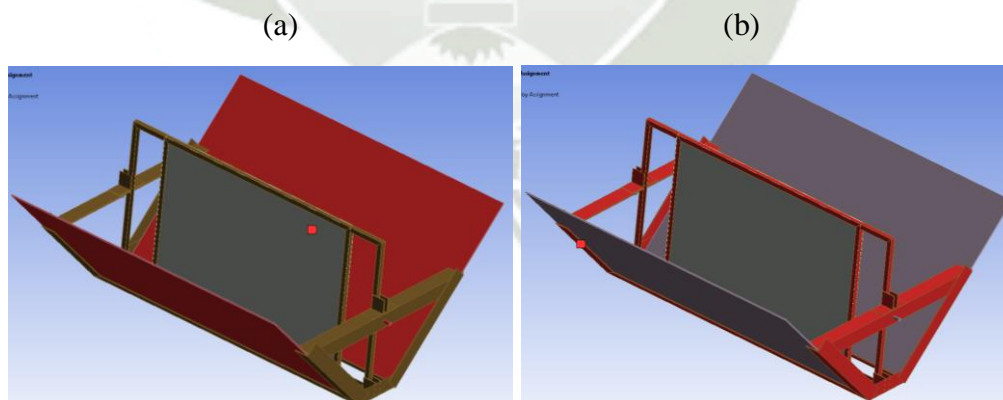


Figura 3.13. *Materiales aplicados a las zonas respectivas (a)Acero inoxidable (b)Aluminio*

Fuente: Elaboración propia

- **Establecimiento de las condiciones de contorno:** Se colocaron las condiciones de frontera como muestra la figura 3.27: Aplicando dos soportes cilíndricos en la

superficie de los ejes y un apoyo empotrado en la cada plana del eje superior finalmente el resto de la geometría fue usada para la interacción fluido-estructura.

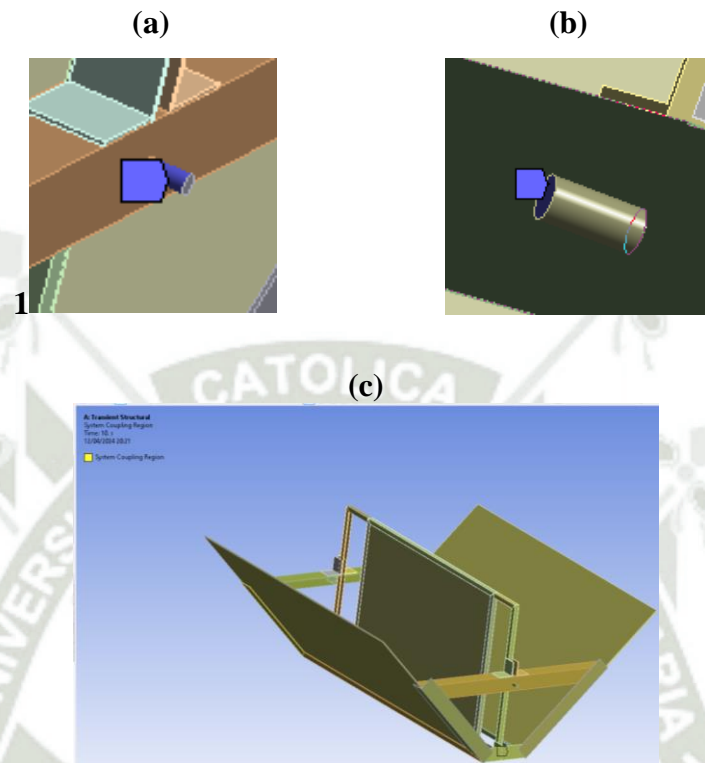


Figura 3.14. Condiciones de contorno aplicadas a él solucionador *Transient Sturctural* (a)Soporte cilíndrico, (b)Apoyo fijo y (c)System Coupling Región.

Fuente: Elaboración propia

- **Discretizacion del dominio de CFX:** Se continuó la configuración en el programa CFX, primero se creó el mallado en este paso se siguió el procedimiento opuesto al mallado anterior y se suprimió el resto de la geometría y se dejó el enclosure como se representa en la figura 3.15 y las características del mallado como número de nodos y elementos se encuentra en la tabla 3.12

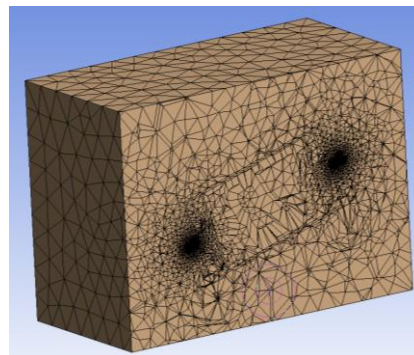


Figura 3.15. *Mallado empleado para el solucionador Fluid Flow CFX) vista sección (mallado interior en 2D).*

Fuente: Elaboración propia

Tabla.3.12.

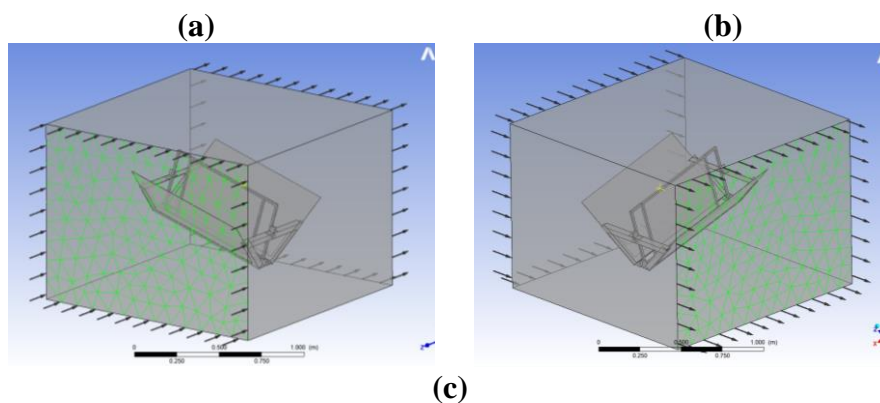
Estadísticas del mallado empleado para el solucionador Fluid Flow CFX.

Nodos	29550
Elementos	157671

Fuente: Elaboración propia

En la configuración de la parte fluida se utilizó con fluido aire a 25°C a una presión de 1 [atm] con un modelo de turbulencia laminar y es importante poner en la opción mesh deformation la opción “Region of motion specified”.

Aplicamos las condiciones de contorno empezando por el ingreso de aire con el nombre “Inlet” establecemos la velocidad de ingreso en 7 m/s. Luego establecemos la salida de aire con el nombre “Outlet” con una precisión relativa de 0 [Pa]. Por último, establecemos la condición de contorno donde habrá una transferencia de datos entre ambos solucionadores con el nombre de System Coupling y se le aplica a toda el área de contorno de nuestro modelo exportado, como se presenta en la figura 3.16:



(c)

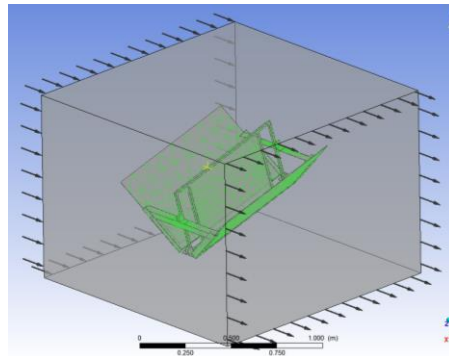


Figura 3.16. Condiciones de contorno aplicadas a él solucionador Fluid Flow CFX
(a)Inlet, (b)Outlet y (c)Walls.

Fuente: Elaboración propia

- **Configuración del análisis e inicialización:** Se estableció la duración del análisis en 1 con un paso de tiempo de 0.1s, también se inicializó el dominio con una presión relativa de 0 [Pa].

Solución:

La convergencia es un aspecto fundamental en las simulaciones numéricas con ANSYS®, ya que garantiza la precisión de los resultados al evaluar la estabilidad del modelo a través de la ecuación RMS. Mediante un enfoque iterativo que registra la magnitud calculada en cada paso y establece criterios de convergencia basados en la variación relativa, se logra determinar si se alcanza un estado estacionario aceptable. Al realizar múltiples corridas variando parámetros clave y monitorear la convergencia en cada caso, se obtienen resultados satisfactorios presentados en gráficos y estadísticas que muestran fluctuaciones mínimas en la magnitud calculada, confirmando la validez del proceso de simulación.

La figura 3.17 muestra que la simulación llegó a la convergencia:

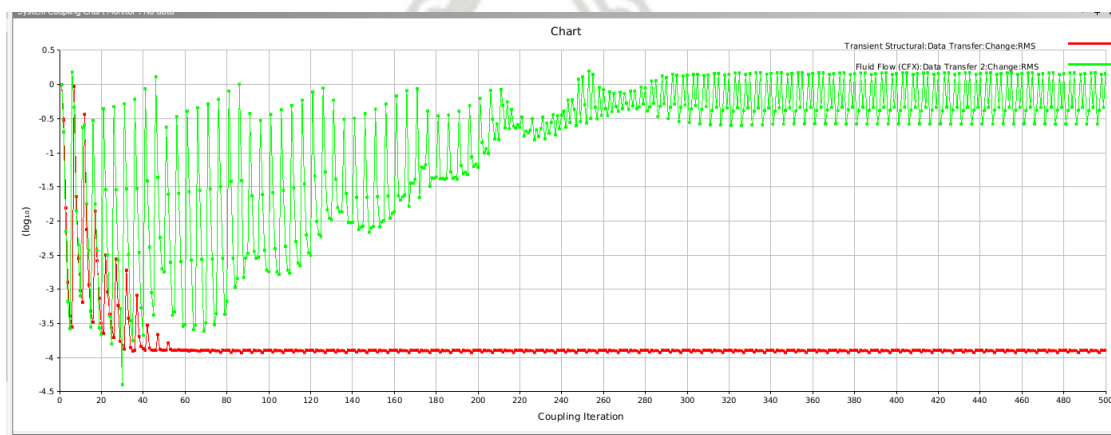


Figura 3.17. Convergencia de las ecuaciones de ambos solucionadores.

Fuente: Elaboración propia

Post-proceso: En la fase de postprocesamiento de esta investigación, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos a través de la simulación en ANSYS® con acoplamiento de sistemas (System Coupling). Esto implica la visualización detallada de los datos resultantes, incluidos desplazamientos, deformaciones, velocidades, presiones, y otros parámetros relevantes tanto para el análisis estructural como para la simulación de fluidos en CFX.

- **Comportamiento de fluido:** Se aplicaron distintos filtros para poder apreciar la interacción fluido sólido y poder analizar cómo afecta esto a nuestra estructura. En la en la figura 3.18 se aprecia un incremento de presión en la zona de impacto del aire, mientras en la figura 3.19 podemos ver vectores de velocidad del flujo del fluido.

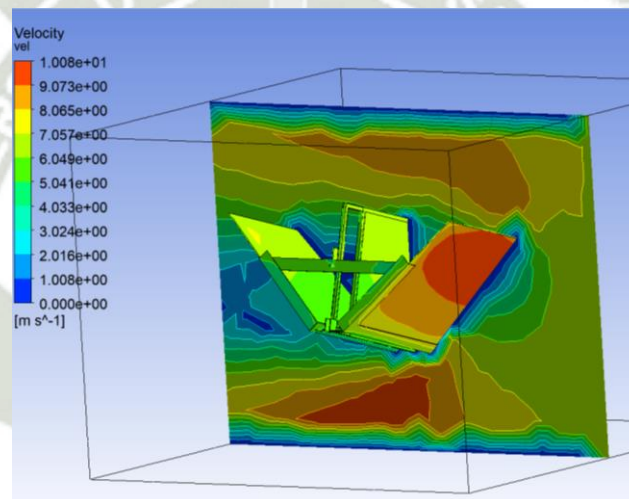


Figura 3.18. Contorno de velocidad aplicado a un plano y contorno de presiones aplicado a la superficie system Coupling.

Fuente: Elaboración propia

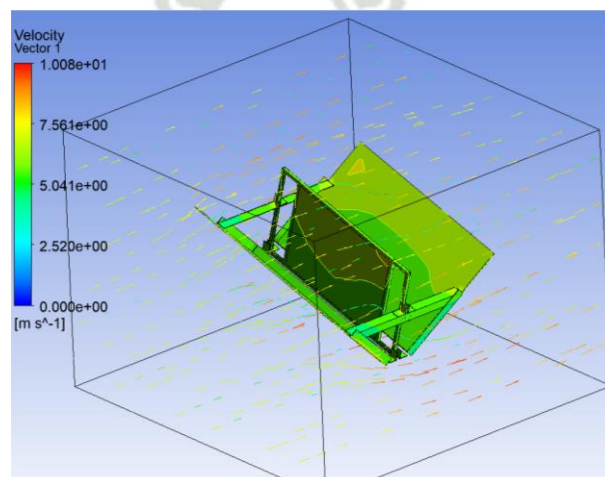


Figura 3.19. *Vectores de velocidad del flujo del fluido.*

Fuente: Elaboración propia

- **Esfuerzo resultante:** Para verificar la resistencia flujo de viento sometido se inspeccionó el esfuerzo resultante

De acuerdo al análisis se obtiene que debido a las cargas de viento el esfuerzo producido es de 6.5 [MPa] que es un valor mucho menor al esfuerzo de fluencia del acero inoxidable cuyo valor es de 235[MPa].

- **Deformación total:** Se analizó la deformación total para poder ubicar la deformación máxima y analizar si esta se encuentra en un rango permisible. La simulación nos arrojó un valor máximo de deformación es de 0.44828 [mm].
- **Momento resultante:** Se determinó el momento resultante aplicado en el punto pivote este análisis se realizó para hallar el torque aplicado a el sistema de engranajes.

De acuerdo al análisis se puede apreciar que se produce un momento resultante en el punto de análisis de 3 [N*M]. Se realizó este análisis para hallar el momento que soporta el primer engranaje de la caja reductora.

- **Reacciones en los apoyos:** Se determinó el momento resultante aplicado en el punto pivote este análisis se optó para hallar el torque aplicado al sistema de engranajes. Se determinaron las reacciones en los apoyos las cuales dieron el valor resultante de 13.7[N] y 13.68[N].

3.3. Diseño y modelamiento de componentes.

3.3.1. Cálculo de la estructura inferior

3.3.1.2. *Análisis de las fuerzas en los apoyos superiores.*

Se realizó un diagrama de cuerpo libre de la estructura que se representa en la figura 3.20

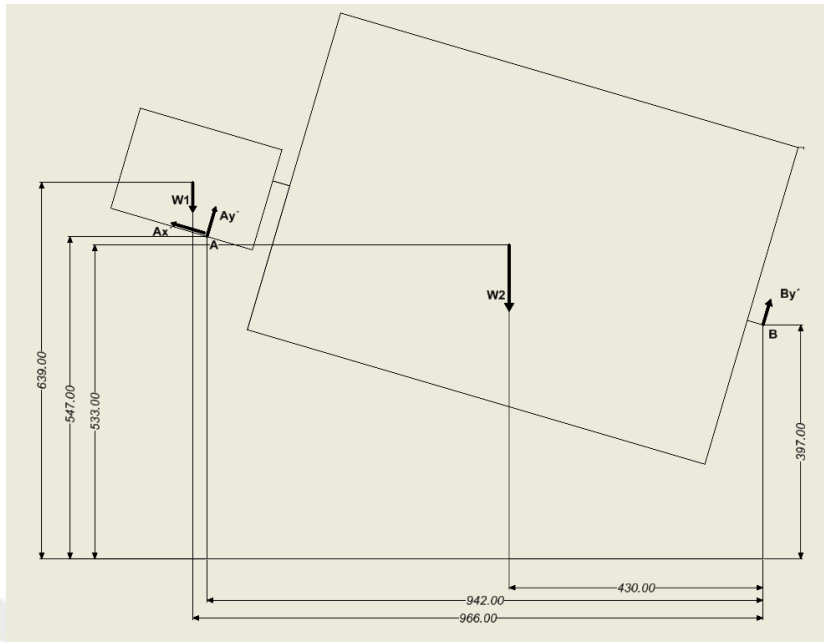


Figura 3.20. Diagrama de cuerpo libre de la estructura en el plano x-y.

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron sumatoria de fuerzas y momentos para hallar las reacciones en los apoyos.

$$\sum F_x = 0; -A_x' \cdot \cos(16.4^\circ) + A_y' \cdot \sin(16.4^\circ) + B_y' \cdot \sin(16.4^\circ) = 0$$

$$\sum F_y = 0; A_x' \cdot \sin(16.4^\circ) + A_y' \cdot \cos(16.4^\circ) - W_1 - W_2 + B_y' \cdot \cos(16.4^\circ) = 0$$

$$\sum M_A = 0; W_1 \cdot 24[mm] - W_2 \cdot 512[mm] + B_y' \cdot \cos(16.4^\circ) \cdot 966[mm] + B_y' \cdot \sin(16.4^\circ) \cdot 150[mm] = 0$$

De la simulación se obtuvieron fuerzas producidas por la acción del viento y se adicionaron a las fuerzas obtenidas por el análisis anterior.

$$F_{wA}' = 1.45[N]i - 4.6[N]j + 12.9[N]k$$

$$F_{wB}' = -3.756[N]i - 3.358[N]j + 12.72[N]k$$

La fuerza aplicada será:

$$F_A' = \overrightarrow{F_{wA}'} + \overrightarrow{A'}$$

$$F_B' = \overrightarrow{F_{wB}'} + \overrightarrow{B'}$$

A continuación, se realizó un diagrama de cuerpo libre del soporte 3D representado en la figura 3.21

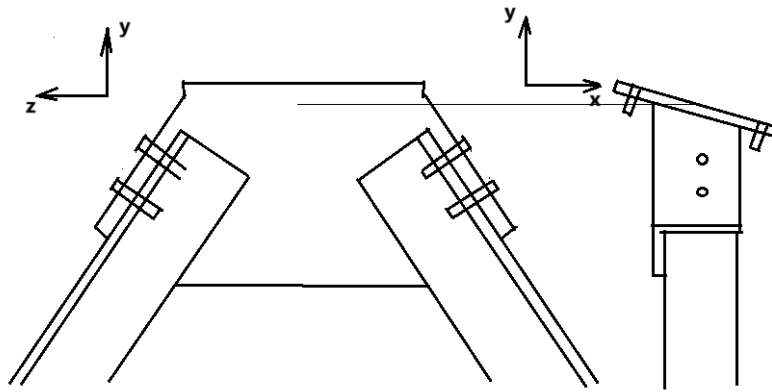


Figura 3.21. Diagrama de cuerpo libre del soporte 3D y las columnas.

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron sumatoria de fuerzas y momentos para hallar las reacciones en el soporte 3D superior.

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0; & \quad F_{ADY} + F_{AFY} = F_A'j \\ \sum F_z = 0; & \quad -F_{ADZ} + F_{AFZ} = -F_A'k \\ \sum M_o = 0; & \quad (43.455j - 73.675k)[mm] \times (-135i - 152.63j - 12.39k)[N] \\ & \quad + (-2 \cdot 73.675k)[mm] \times (F_{AFX}i + F_{AFY}j + F_{AFZ}k) - (1.1868i \\ & \quad + 1.55918k + 0.6987k)[N \cdot m] = 0 \end{aligned}$$

Se realizó un cambio de coordenadas para evaluar el elemento como columna, se cambió el eje Y por el eje Y', y el eje Z por el eje. Como se muestra en la figura 3.22:

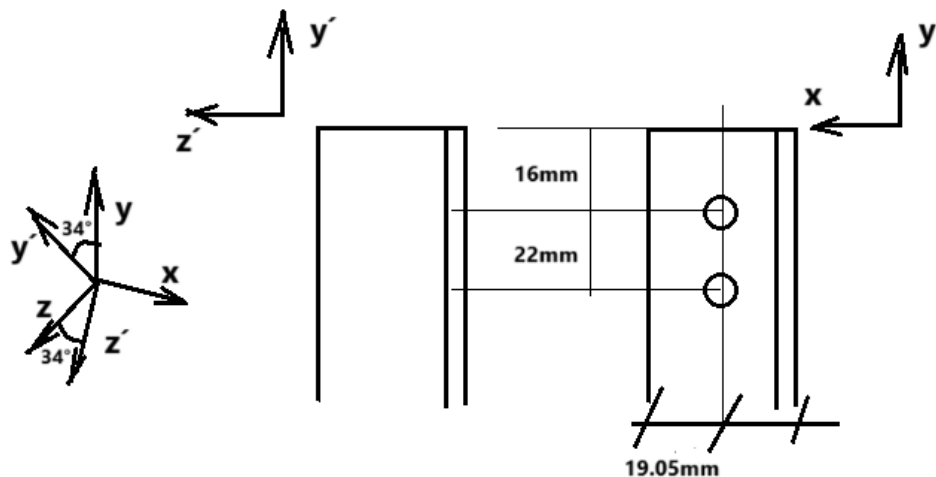


Figura 3.22. Esquema de las columnas y cambio de coordenadas.

Fuente: Elaboración propia

$$\begin{aligned} F_{AF'} = & (F_{AF}i + (F_{AFj} \cdot \cos(34^\circ) + F_{AF}k \cdot \sen(34^\circ)) \\ & + (-F_{AFj} \cdot \sen(34^\circ) + F_{AF}k \cdot \cos(34^\circ))k \end{aligned}$$

3.3.1.3. Cálculo del centroide y momento de inercia

Se planteó que la estructura inferior estaría construida por ángulos de aluminio con la sección mostrada en la figura 3.23, por ello se determinó su centroide y su momento de inercia para cálculos posteriores.

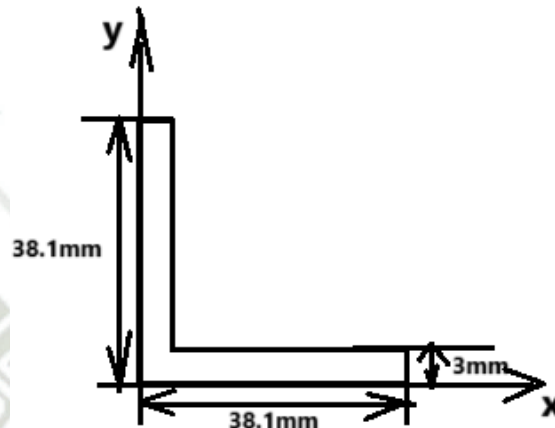


Figura 3.23. Esquema isométrico del interior de la caja reductora.

Fuente: Elaboración propia

$$\bar{x} = \frac{\sum \bar{x}A}{\sum A} \quad (90)$$

Donde:

$\sum \bar{x}A$: Sumatoria de los momentos de las áreas respecto al eje x [m^4]

$\sum A$: Sumatoria de las áreas de los elementos analizados [m^2]

3.3.1.4. Esfuerzo permisible para una columna hecha de aluminio.

Se halló la longitud equivalente y el radio de giro para poder determinar el esfuerzo permisible al que se someterán los elementos tipo columna.

Radio de giro de la columna

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (91)$$

Donde:

I_x : Momento de inercia [m^4]

A : Área [m^2]

$$\frac{L_{eq}}{r} \leq 66; \sigma_{perm} = \left[140 - 0.874 \left(\frac{L}{r} \right) \right] [MPa] \quad (92)$$

Donde:

L_{eq} : Longitud equivalente [m]

r : Radio de giro [m^2]

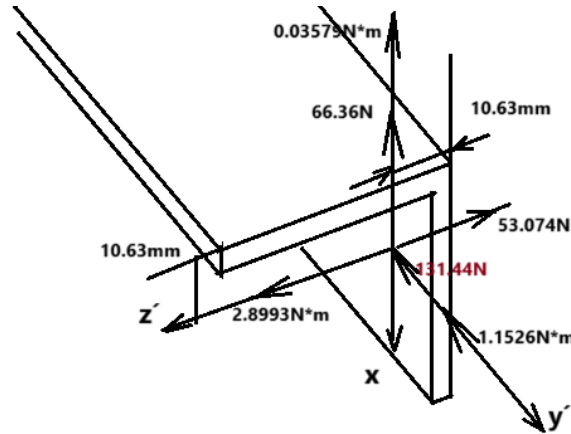


Figura 3.24. Diagrama de cuerpo libre de la sección transversal del elemento analizado.

Fuente: Elaboración propia

Luego se procedió a graficar todas las fuerzas a la cual sería sometido el ángulo estructural como se muestra en la figura 3.24 y se apreció que estaría sometido a esfuerzos combinados.

3.3.1.5. Esfuerzo normal

$$\sigma_A = \frac{P}{A} + \frac{M_z'x}{I} - \frac{M_xz}{I} \quad (93)$$

Donde:

I_x : Momento de inercia [m^4]

A : Área [m^2]

M_z' : Momento de flexión máximo aplicado al eje z' [$N \cdot m$]

M_x : Momento de flexión máximo aplicado al eje x [$N \cdot m$]

x : Distancia x al eje neutro [m]

z : Distancia z al eje neutro [m]

3.3.1.6. Esfuerzo cortante puro

Debido a que la sección utilizada fue ángulo de alas iguales se determinó el modelo matemático para el cálculo del esfuerzo cortante máximo y se realizó un cambio de coordenadas como se muestra en la figura 3.25:

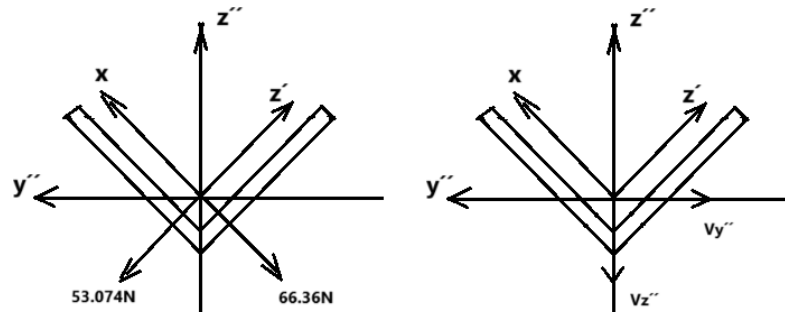


Figura 3.25. Vista de sección del ángulo para el análisis de esfuerzo cortante puro

Fuente: Elaboración propia

$$\tau_1 = \frac{6V_z''(a-y)y\cos(45^\circ)}{ta^3} \quad (94)$$

$$\tau_2 = \frac{3V_y''(a^2-y^2)\cos(45^\circ)}{2ta^3} \quad (95)$$

$$\tau_z' = \tau_1 - \tau_2 \quad \tau_x = \tau_1 + \tau_2 \quad (96)$$

Donde:

- V_z'' : Fuerza cortante en la dirección z'' [N]
- V_y'' : Fuerza cortante en la dirección y'' [N]
- t : Espesor de la sección del perfil [m]
- a' : Longitud total del ala de la sección [m]
- y : Distancia del borde al punto de análisis [m]

3.3.1.7. Esfuerzo cortante por torsión

$$a_1 = \frac{\text{Area}}{t} \quad (97)$$

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{3} \left(1 - 0.630 \cdot \frac{b_1}{a_1} \right) \quad (98)$$

$$\tau_{max} = \frac{T}{C_1 a_1 b_2^2} \quad (99)$$

Donde:

- a_1 : Relación entre el área de la sección transversal y el espesor [—]

- b_1 : Espesor de la sección transversal del material [mm]
 C_1 y C_2 : Coeficientes geométricos [-]
 T : Torque aplicado [$N \cdot mm$]

3.3.1.8. Esfuerzo combinado

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (100)$$

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \leq \sigma_{perm}^2 \quad (101)$$

Donde:

- σ_x y σ_y : Esfuerzos normales en las direcciones x y y [MPa]
 τ_{xy} : Esfuerzo cortante en el plano x-y [MPa]
 σ_1 y σ_2 : Esfuerzos máximos principales [MPa]
 σ_{perm} : Esfuerzo permisible del material [MPa]

3.3.2. Cálculo de la Estructura utilizando el Método de la Matriz de Rigidez

3.3.2.1. Idealización de la estructura

La estructura se representa mediante un modelo idealizado compuesto por nodos y elementos estructurales como se puede apreciar en la figura 3.26. donde se identifican las propiedades geométricas y mecánicas de cada elemento, las condiciones de frontera (apoyos) y las cargas aplicadas.

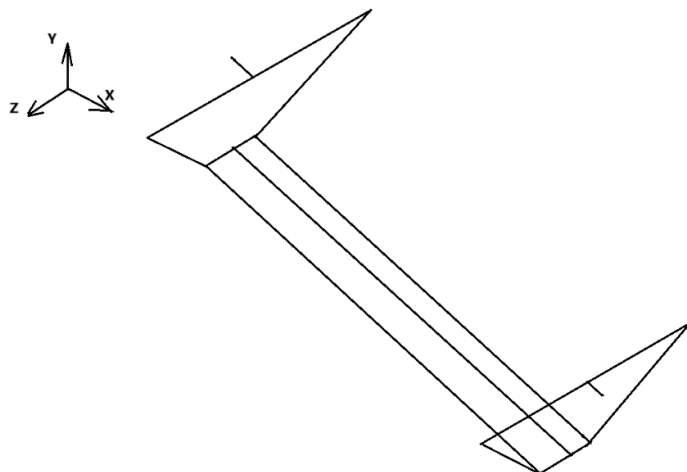


Figura 3.26. Estructura superior sistema de reflexión.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2. Definición de grados de libertad

Se asignaron los grados de libertad en los nodos, que corresponden a los desplazamientos y giros posibles. Los apoyos restringen ciertos grados de libertad, reduciendo el número total de incógnitas, los nodos se representan con sus respectivas ubicaciones en la figura 3.27.

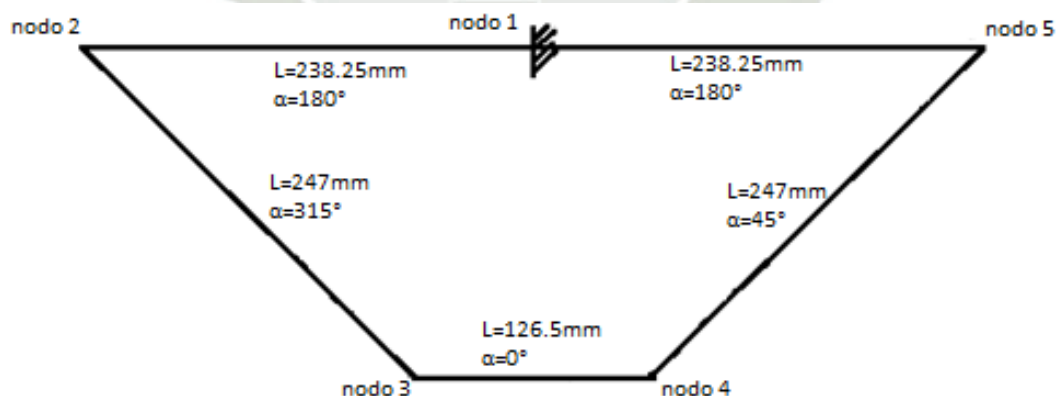


Figura 3.27. Nodos de la estructura analizada.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3. Determinación de las matrices de rigidez de los elementos

Se calculó la matriz de rigidez local para cada elemento de la estructura, que relaciona las fuerzas y desplazamientos nodales. Estas matrices dependen de las propiedades del material y la geometría de cada elemento

Ecuaciones

$$A = \frac{EA}{l}; B = \frac{12EI}{l^3}; C = \frac{6EI}{l^2}; D = \frac{4EI}{l}; E = \frac{2EI}{l};$$

$$F = \cos^2 \alpha \cdot A + \text{sen}^2 \alpha \cdot B; G = \text{cos} \alpha \cdot \text{sen} \alpha \cdot (A - B);$$

$$H = -\text{sen} \alpha \cdot C; I = \text{sen}^2 \alpha \cdot A + \text{cos}^2 \alpha \cdot B; J = \text{cos} \alpha \cdot C$$

$$K'_{ab} = \begin{bmatrix} F & G & H & -F & -G & H \\ G & I & J & -G & -I & J \\ H & J & D & -H & -J & E \\ -F & -G & -H & F & G & -H \\ -G & -I & -J & G & I & -J \\ H & J & E & -H & -J & D \end{bmatrix}$$

Donde:

- E : Módulo de elasticidad [GPa]
- A : Área [mm²]
- I : Momento de inercia de la sección transversal [mm⁴]
- l : Longitud del elemento [mm]
- α : Ángulo del elemento respecto al eje x [°]

3.3.2.4. Ensamblaje matriz de rigidez global K

Se ensamblaron las matrices de rigidez globales de cada elemento en una matriz de rigidez global para la estructura completa. Este proceso suma las contribuciones de los elementos conectados en cada nodo.

$$\begin{bmatrix} \text{MATRIZ } K \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ \varphi_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ \varphi_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ \varphi_4 \\ u_5 \\ v_5 \\ \varphi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Fx2 \\ Fy2 \\ M2 \\ Fx3 \\ Fy3 \\ M3 \\ Fx4 \\ Fy4 \\ M4 \\ Fx5 \\ Fy5 \\ M5 \end{bmatrix}$$

Donde:

- K : Matriz global de rigidez [KN/m]
 u y v : Desplazamientos nodales [mm]
 φ : Rotaciones nodales [rad]
 F_x y F_y : Fuerzas externas aplicadas [KN]
 M : Momentos externos aplicados [$KN \cdot m$]

3.3.2.5. Aplicación de las condiciones de frontera:

Se aplicaron las siguientes cargas determinadas mediante un diagrama de cuerpo libre aplicado a la estructura superior sometida al peso de los reflectores, del panel, de la carga de viento y del peso propio. Dando como resultado las cargas mostradas en la figura 3.28.

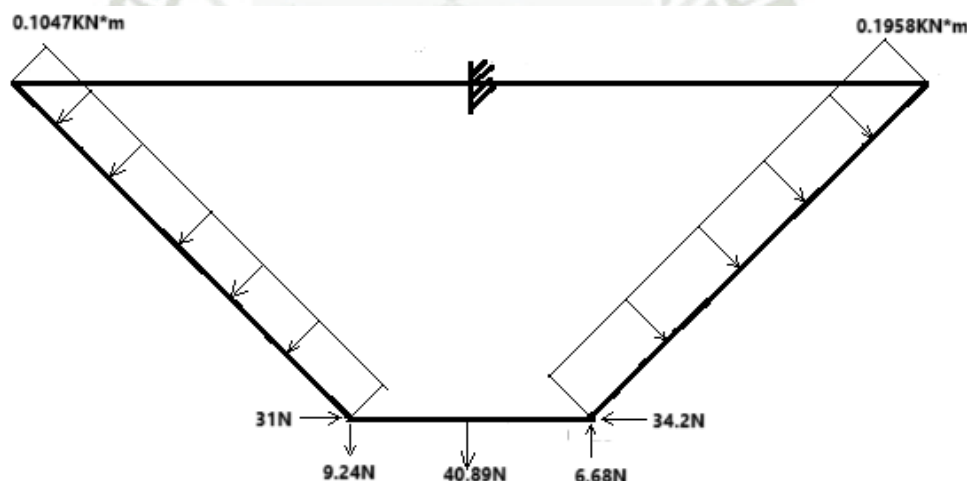


Figura 3.28. Cargas aplicadas a la estructura analizada.

Fuente: Elaboración propia

Datos de entrada:

$$\begin{matrix} Fx2 \\ Fy2 \\ M2 \\ Fx3 \\ Fy3 \\ M3 \\ Fx4 \\ Fy4 \\ M4 \\ Fx5 \\ Fy5 \\ M5 \end{matrix} = \begin{matrix} 9.143 \\ 9.413 \\ 0.5323 \\ 40.238 \\ 38.8279 \\ 0.1096 \\ -51.306 \\ 30.8675 \\ 0.3535 \\ -17.099 \\ 17.099 \\ -0.9954 \end{matrix} \begin{matrix} N \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \end{matrix}$$

3.3.2.6. Cálculo de fuerzas internas y reacciones

$$f'a = K'aa \times T^T \times d_a + K'ab \times T^T \times d_b \quad (102)$$

$$f'b = K'ba \times T^T \times d_a + K'bb \times T^T \times d_b \quad (103)$$

$$T = \begin{vmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & -0 & 1 \end{vmatrix} \quad (104)$$

$$\begin{matrix} Kaa' & X & T^T & X & da & + & Kab' & X & T^T & X & db \\ \begin{vmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & C \\ 0 & C & D \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} X \\ X \\ X \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} T^{-1} \\ T^{-1} \\ T^{-1} \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} X \\ X \\ X \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} u_a \\ v_a \\ \phi_a \end{vmatrix} & + & \begin{vmatrix} -A & 0 & 0 \\ 0 & -B & C \\ 0 & -C & D \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} X \\ X \\ X \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} T^{-1} \\ T^{-1} \\ T^{-1} \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} X \\ X \\ X \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} u_b \\ v_b \\ \phi_b \end{vmatrix} \\ Kba' & X & T^T & X & da & + & Kbb' & X & T^T & X & db \\ \begin{vmatrix} -A & 0 & 0 \\ 0 & -B & -C \\ 0 & C & D \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} X \\ X \\ X \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} T^{-1} \\ T^{-1} \\ T^{-1} \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} X \\ X \\ X \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} u_a \\ v_a \\ \phi_a \end{vmatrix} & + & \begin{vmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & -C \\ 0 & -C & D \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} X \\ X \\ X \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} T^{-1} \\ T^{-1} \\ T^{-1} \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} X \\ X \\ X \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} u_b \\ v_b \\ \phi_b \end{vmatrix} \end{matrix}$$

Donde:

$f'a$ y $f'b$: Vectores de fuerzas internas en el nodo a y b [KN]

$K'aa, K'ab, K'ba$ y $K'bb$: Submatrices de rigidez local [KN/m]

T : Matriz de transformación de coordenadas [mm⁴]

T^T : Matriz transpuesta de transformación de coordenadas [mm⁴]

d_a y d_b : Vectores de desplazamientos globales en los nodos a y b [m]

Cálculo de pernos.

Carga por perno

$$F_{porperno} = \frac{F_{res}}{n} \quad (105)$$

Donde:

F_{res} : Fuerza resultante en los pernos [N]

n : Número de pernos

Esfuerzo cortante permisible

El área transversal A de cada perno debe cumplir:

$$\tau = \frac{F_{porperno}}{A} \leq \tau_{perm}. \quad (106)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante promedio sobre la sección transversal del perno [MPa]

A : Área transversal del perno [m^2].

τ_{perm} : Esfuerzo cortante permisible del material [MPa]

Diámetro mínimo del perno

El área transversal de un perno está dada por su área transversal. Despejamos el diámetro d:

$$d = \frac{\sqrt{4 \cdot A}}{\pi}. \quad (107)$$

Donde:

d : Diámetro del perno necesario para que el área transversal soporte las fuerzas aplicadas [m]

A : Área transversal del perno [m^2].

3.3.3. Caja reductora

Debido a que requería una relación de transmisión muy alta se decidió el uso múltiples engranajes que hacían la función de engranaje loco tal cual como se muestra en la figura 3.29, puesto que una de las ventajas de este sistema es el alto torque que requiere para ser movido del lado donde se encuentra el sistema fotovoltaico

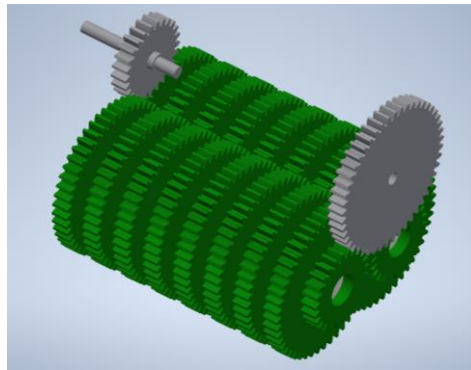


Figura 3.29. Esquema isométrico del interior de la caja reductora.

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.1. Cálculo de las fuerzas producidas por engranajes

Las fuerzas producidas por los engranajes fueron determinadas con el torque requerido para mover el sistema fotovoltaico.

También se realizó una memoria de cálculo en el software EES(Anexo C) donde se obtuvo las fuerzas resultantes en cada engranaje esto con el objetivo de obtener las cargas que soporta nuestro eje.

Se determinaron las cargas necesarias para mover el sistema y se tuvo en cuenta la fuerza necesaria que necesita cada engranaje para llevar al siguiente a la velocidad deseada para esto se utilizó el principio de impulso y cantidad de movimiento angular.

Principio de impulso y cantidad de movimiento angular.

$$I_G \omega_1 + \sum \int_{t_1}^{t_2} M_G dt = I_G \omega_2 \quad (108)$$

Donde:

I_G : Momento de inercia respecto al punto G [$kg \cdot m^2$]

ω_1 : Velocidad angular inicial [rad/s]

ω_2 : Velocidad angular final [rad/s]

$\sum \int_{t_1}^{t_2} M_G dt$: Impulso angular debido al momento resultante externo [$(kg \cdot m^2)/s$]

Engranaje 1

$$0 + T_o(2[s]) - \int_0^2 0.027Fdt = 0.0001077[kg \cdot m^2] \cdot n_o \dots (1)$$

Engranaje 2

$$0 + \int_0^2 0.048Fdt = 0.0001077[kg \cdot m^2] \cdot \frac{n_o}{1.952} \dots (2)$$

(1) En (2)

$$2T_o - 0.027 \cdot 2 \cdot F = \frac{(0.0010565)(0.048 \cdot 2 \cdot 1.952 \cdot F)}{0.0010565}$$

Diagrama de cuerpo libre engranajes

Para determinar la carga que iba a los ejes de la caja reductora, se realizó un diagrama de cuerpo libre de los engranajes más representativos.

Engranaje inicial

Este engranaje es el que se encuentra después del engranaje de alimentación del motor y se diferencia de los otros engranajes locos porque recibe la carga con un ángulo de 60° , su diagrama de cuerpo libre se representa en la figura 3.30:

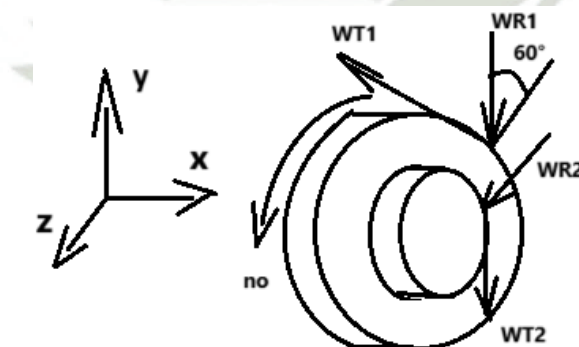


Figura 3.30. Diagrama de cuerpo libre del engranaje inicial del eje 2.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diagrama de cuerpo libre se elaboraron las ecuaciones de la sumatoria de fuerzas, de las cuales se extrajeron las siguientes ecuaciones:

$$\sum F_y = 0; R_{1y} + R_{2y} + W_{T1} \cdot \cos(60^\circ) = W_{T2} + W_{R1} \cdot \sen(60^\circ) + W_E \dots (1)$$

$$\sum F_z = 0; W_{R1} \cdot \cos(60^\circ) + W_{R2} + W_{T1} \cdot \sen(60^\circ) = R_{1z} + R_{2z} \dots (2)$$

$$-0.011(W_{T1} \cdot \text{sen}(60^\circ) + W_{R1} \cdot \text{cos}(60^\circ)) + 0.011 \cdot R_{1z} = 0 \dots (3)$$

$$0.011(W_{T1} \cdot \text{cos}(60^\circ) - W_{R1} \cdot \text{sen}(60^\circ)) + 0.011 \cdot R_{1y} - 0.009 \cdot W_E = 0 \dots (4)$$

Engranaje final

De la misma manera que el engranaje inicial, este engranaje requirió un diagrama de cuerpo libre diferente porque está sometido a una distinta distribución de carga como refleja la figura 3.31.

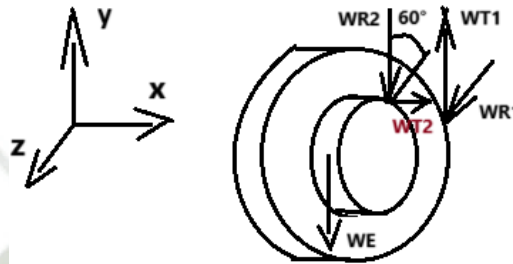


Figura 3.31. Diagrama de cuerpo libre del engranaje final del eje 2.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diagrama de cuerpo libre se elaboraron las ecuaciones de la sumatoria de fuerzas

$$\sum F_y = 0; R_{1y} + R_{2y} + W_{T1} = W_{R2} \cdot \text{sen}(60^\circ) + W_{T2} \cdot \text{cos}(60^\circ) + W_E \dots (1)$$

$$\sum F_z = 0; W_{R1} + W_{R2} \cdot \text{cos}(60^\circ) = R_{1z} + R_{2z} + W_{T2} \cdot \text{sen}(60^\circ) \dots (2)$$

$$-0.011 \cdot W_{R1} + 0.011 \cdot R_{1z} = 0 \dots (3)$$

$$0.011 \cdot W_{T1} + 0.011 \cdot R_{1y} - 0.009 \cdot W_E = 0 \dots (4)$$

Engranajes intermedios

Posterior al análisis del engranaje inicial y final, se determinó el diagrama de cuerpo libre de un engranaje intermedio como se muestra en la figura 3:32, el cual se repetirá para el resto de los engranajes.

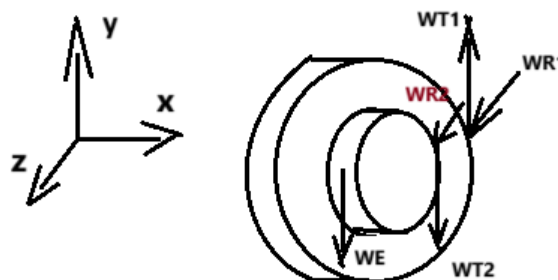


Figura 3.32. Diagrama de cuerpo libre de los engranajes intermedios del eje 2.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diagrama de cuerpo libre se elaboraron las ecuaciones de la sumatoria de fuerzas

$$\sum F_y = 0; R_{1y} + R_{2y} + W_{T1} = W_{T2} + W_E$$

$$\sum F_z = 0; W_{R1} + W_{R2} = R_{1z} + R_{2z} \dots (2)$$

$$-0.011 \cdot W_{R1} + 0.011 \cdot R_{1z} = 0 \dots (3)$$

$$0.011 \cdot W_{T1} + 0.011 \cdot R_{1y} - 0.009 \cdot W_E = 0 \dots (4)$$

Fuente: *Elaboración propia*

3.3.3.2. Cálculo del eje interno caja reductora

Se aplicaron sumatoria de fuerzas y momentos para poder determinar las reacciones, este cálculo se realizó primero para el plano X-Y

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0; & -0.08043 - 0.01856 - 0.07991 - 0.02013 - 0.07684 - 0.02612 \\ & - 0.06514 - 0.04895 + 0.02058 - 0.1359 + 0.1492 - 0.4674 \\ & + 0.7962 - 1.73 + 3.262 - 19.26 + R_{1y} + R_{2y} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_1 = 0; & -0.08043(0.016) - 0.01856(0.027) - 0.07991(0.045) \\ & - 0.02013(0.056) - 0.07684(0.074) - 0.02612(0.085) \\ & - 0.06514(0.103) - 0.04895(0.114) + 0.02058(0.132) \\ & - 0.1359(0.143) + 0.1492(0.161) - 0.4674(0.172) + 0.7962(0.19) \\ & - 1.73(0.201) + 3.262(0.219) - 19.26(0.23) = R_{2y}(0.252) \end{aligned}$$

A continuación se realizó un cálculo igual al anterior pero para el plano X-Z y se inició con la sumatoria de fuerzas y momentos.

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0; & -0.0006518 - 0.001582 - 0.003076 - 0.006029 - 0.01172 \\ & - 0.02297 - 0.04464 - 0.08753 - 0.1702 - 0.3335 - 0.6484 \\ & - 1.271 - 2.47 - 4.843 - 7.413 - 3.575 + R_{1z} + R_{2z} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_1 = 0; & -0.0006518(0.016) - 0.001582(0.027) - 0.003076(0.045) \\ & - 0.006029(0.056) - 0.01172(0.074) - 0.02297(0.085) \\ & - 0.04464(0.103) - 0.08753(0.114) - 0.1702(0.132) \\ & - 0.3335(0.143) - 0.6484(0.161) - 1.271(0.172) - 2.47(0.19) \\ & - 4.843(0.201) - 7.413(0.219) - 3.575(0.23) = R_{2z}(0.252) \end{aligned}$$

3.3.3.3. Cálculo eje 3

Con las cargas previamente determinadas, se realizó el diagrama de cuerpo libre del eje 3 como se muestra en la figura 3.33:

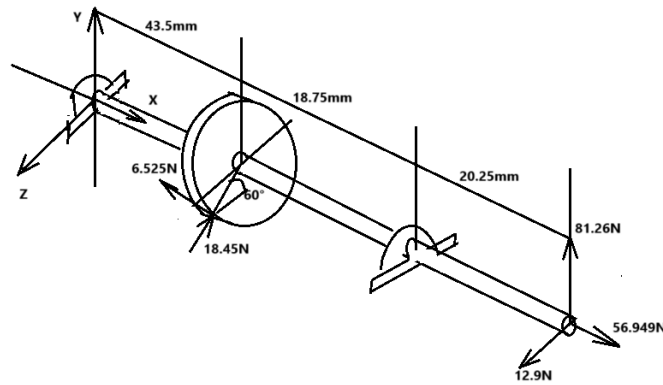


Figura 3.33. Diagrama de cuerpo libre del eje 3.

Fuente: Elaboración propia

De igual forma se realizó la sumatoria de fuerzas para el caso del eje 3.

$$R_{Az} + R_{Bz} = -16.474[N] \dots (1)$$

$$R_{Ay} + R_{By} = -100.5[N] \dots (2)$$

$$-0.0825 \cdot R_{Az} - 0.02025 \cdot R_{Bz} = 0.1394 \dots (3)$$

$$0.0825 \cdot R_{Ay} + 0.02025 \cdot R_{By} = -0.75036 \dots (4)$$

3.3.3.4. Cálculo eje 1

Por último, se repitió el proceso para el engranaje que alimenta la potencia de la caja reductora, el cual se ilustró con el siguiente diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura 3.34:

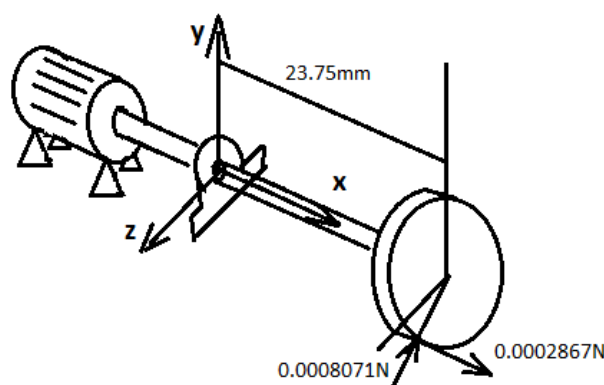


Figura 3.34. Diagrama de cuerpo libre del eje 1.

Fuente: Elaboración propia

$$M = \sqrt{(M_x^2 + M_z^2)}$$

(109)

$$c = \left(\frac{2}{\pi \tau_{perm}} \sqrt{M^2 + T^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (110)$$

Donde:

M	: Momento de resultante [N · m]
M_z	: Momento de flexión máximo aplicado al eje z [N · m]
M_x	: Momento de flexión máximo aplicado al eje x [N · m]
T	: Torque aplicado [N · mm]
τ_{perm}	: Esfuerzo cortante permisible [MPa].
c	: Radio mínimo del eje [m]

El cálculo nos determina que el diámetro mínimo debería ser de 1mm para el eje 1.

Resolución:

El programa cuenta con un total de 767 ecuaciones y un número equivalente de variables, como se muestra en la figura 3.35. Estas ecuaciones y variables están organizadas automáticamente en 170 bloques, los cuales se resuelven de manera secuencial.

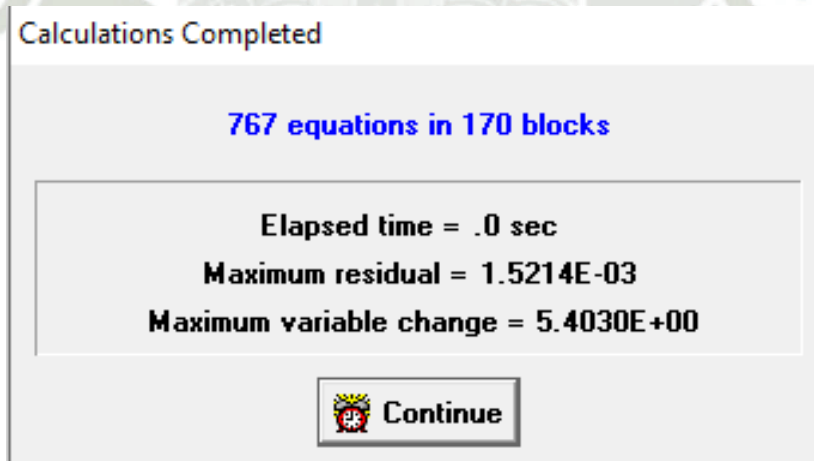


Figura 3.35. Número de ecuaciones y variables del programa del Anexo E.

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Selección de actuadores.

3.3.4.1. Selección del motor.

La elección del motor de destino a elegir entre un motor brushless o un motor NEMA 17 debido a que la potencia requerida es baja-

La selección del motor a pasos NEMA 17 sobre el motor brushless se basa en consideraciones específicas que atañen directamente a las necesidades y requerimientos del proyecto en cuestión. Aunque ambos tipos de motores poseen sus propias ventajas, tales como la eficiencia energética del motor brushless y la capacidad de programación del motor NEMA 17, el factor decisivo radica en la precisión y control que el motor NEMA 17 proporciona.

En un contexto donde la precisión del movimiento es esencial, como es el caso de un seguidor solar que debe ajustar su posición constantemente para maximizar la captación de energía solar, la capacidad de programación del motor NEMA 17 adquiere una relevancia crucial. La programabilidad permite ajustar con precisión los pasos del motor, garantizando movimientos exactos y reproducibles, incluso en condiciones variables como cambios de temperatura o desgaste del equipo. Este nivel de control fino no solo mejora la eficiencia del sistema al asegurar un seguimiento preciso del movimiento solar, sino que también permite adaptar el comportamiento del motor a cualquier cambio en el entorno operativo, optimizando así el rendimiento a largo plazo del seguidor solar.

Además, la versatilidad del motor NEMA 17 en términos de programabilidad facilita la integración con otros aspectos del sistema, como los algoritmos de control y los sensores de posición, permitiendo una coordinación eficaz entre los diferentes componentes del seguidor solar. Esta capacidad de integración sinérgica contribuye a una operación más fluida y confiable del sistema en su conjunto.

3.3.4.2. Selección de accesorios.

Se seleccionaron una variedad de accesorios para los distintos sistemas

Para la caja reductora:

Separadores: Es necesario que exista una distancia entre los engranajes por lo que será necesario la utilización de separadores se propone utilizar tuercas de 5/16” adaptadas para poder pasar por el eje de 8 [mm]

Rodamientos: los rodamientos fueron seleccionados de acuerdo con el diámetro de eje diseñado el cual dio un valor de 8mm para este diámetro se adquirió el rodamiento 608 RS con los siguientes datos

Anillos de retención: Los anillos de retención se utilizan para asegurar componentes, en el eje se colocarán anillos de retención Seeger exteriores de 7[mm] en los extremos para asegurarlo en su posición.

Acoples flexibles: Se utilizarán para transmitir la potencia del eje del motor a la caja reductora permitiendo cierto desalineamiento y variación angular.

Prisionero: Se utilizan en aplicaciones donde es necesario sujetar componentes de forma segura y desmontable, se utilizarán en los acoples rígidos que llevan los engranajes.

Capítulo IV

4. Construcción prototipo a nivel laboratorio

4.1 Selección de materiales.

Los criterios de selección que guiaron la elección de materiales, incluyendo propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, peso, costo y disponibilidad, fueron examinados. Posteriormente, se presentaron las alternativas de materiales consideradas, evaluando sus ventajas y limitaciones en función de los requisitos específicos del proyecto. Se destacaron las características clave de cada material y se justificó su idoneidad para aplicaciones particulares dentro del prototipo.

4.1.1. Panel fotovoltaico bifacial.

Como se vio previamente la composición típica de un panel fotovoltaico consta de: (vidrio, ethil vinil acetato, celdas fotovoltaicas), como se muestra en la figura 4.1:



Figura 4.1. Estructura interna de un panel fotovoltaico.

Fuente: (Kumar et al., 2020)

El prototipo deseado debe usar la tecnología bifacial, porque se buscó un panel bifacial con una potencia máxima de 40 W.

Debido a que los paneles fotovoltaicos bifaciales del mercado poseían potencias en torno a los 500-600 W y con áreas de alrededor 2 m², la alternativa que mantenía la mejor similitud para los ensayos requerido era el uso de celdas fotovoltaicas bifaciales, siguiendo este criterio para mantener una mayor fidelidad al modelo de un panel bifacial se decidió los materiales que componen la estructura típica de un panel fotovoltaico como son: EVA (Ethil vinil acetato), Tab Wire, Bus Wire, Flux pen.

Celdas fotovoltaicas bifaciales: Usar celdas bifaciales y laminar el panel en lugar de emplear un panel ya fabricado permite una mayor personalización y flexibilidad en el diseño del prototipo. Las celdas bifaciales optimizan la recolección de luz al captar energía tanto por el lado frontal como por el posterior, lo cual es especialmente beneficioso para maximizar la eficiencia energética. Esto facilita la integración en sistemas de seguimiento solar y en estructuras con diferentes ángulos de incidencia, adaptándose mejor a las condiciones específicas de la investigación.

Tab Wire (Cable de Interconexión): El tab wire es un material conductor, generalmente una cinta metálica delgada y plana, utilizado para conectar eléctricamente las celdas solares en un panel fotovoltaico.

Se consideró utilizar alambre de cobre bañado de estaño de manera manual pero finalmente se usó tab wire en lugar de alambre de cobre cubierto de estaño hecho manualmente porque el tab wire ofrece una mayor uniformidad y consistencia en las conexiones, reduciendo errores humanos y asegurando una mejor calidad de ensamblaje. Además, el tab wire es más fácil de manejar y soldar, lo que agilizó el proceso de fabricación y mejoró la fiabilidad del panel fotovoltaico.

Bus Wire (Cable de Bus): El bus wire es un material conductor, generalmente una cinta metálica más ancha que el tab wire, utilizado para conectar múltiples filas de celdas solares en un panel fotovoltaico. Sus características incluyen una alta conductividad eléctrica y una forma que facilita la conexión eficiente de las celdas a los puntos de salida del panel. Normalmente se usa por su capacidad para soportar mayores corrientes eléctricas y minimizar la resistencia en las conexiones.

EVA (Etileno Vinil Acetato): El EVA (etileno-vinil-acetato) es un material laminador utilizado en la fabricación de paneles fotovoltaicos para encapsular las celdas solares. Este material se caracteriza por su alta flexibilidad, resistencia al impacto y excelente adherencia, lo que asegura una protección efectiva de las celdas contra la humedad, el polvo y otros agentes externos. Además, el EVA tiene propiedades ópticas que maximizan la transmisión de luz hacia las celdas solares. Su flexibilidad también facilita la manipulación y ajuste de las celdas durante el proceso de laminado, permitiendo una mayor precisión en el diseño y la integración de nuevas tecnologías. Además, el EVA es económico y accesible, lo que facilita la realización de múltiples iteraciones y pruebas en el desarrollo del prototipo.

4.1.2. Estructura:

Ángulos de aluminio: El ángulo de aluminio es un material estructural ideal para armar la estructura de soporte de paneles fotovoltaicos. Se destaca por su ligereza, resistencia a la corrosión y alta durabilidad, proporcionando una base sólida y estable.

En el ambiente exterior, el aluminio ofrece una excelente resistencia a la corrosión, asegurando una larga vida útil y bajo mantenimiento, incluso en condiciones climáticas adversas. Además, su ligereza facilita el transporte y la instalación, reduciendo costos logísticos y de montaje. El aluminio también es económico debido a su amplia disponibilidad y procesos de fabricación eficientes, lo que lo convierte en una opción costo-efectiva para estructuras de soporte en sistemas fotovoltaicos.

4.1.3. Sistema de transmisión:

Engranajes impresos de ABS: Los engranajes de ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) se utilizaron en el sistema de transmisión del seguidor solar debido a su alta resistencia al impacto, durabilidad y ligereza. El ABS demostró ser adecuado para soportar cargas moderadas y resistir el desgaste, lo que lo convirtió en una opción eficaz para aplicaciones mecánicas en el prototipo.

4.2 Selección de procesos de manufactura.

Procesos Usados para la Fabricación del Panel

Para la fabricación del panel fotovoltaico bifacial, se llevaron a cabo varios procesos específicos. Primero, se utilizó corte láser para obtener las celdas fotovoltaicas con precisión. Posteriormente, las celdas se soldaron utilizando tab wire y bus wire, con el apoyo de un cautín, asegurando conexiones eléctricas efectivas entre las celdas. Finalmente, se realizó el laminado del panel de manera experimental, aplicando técnicas para encapsular y proteger las celdas, optimizando su rendimiento y durabilidad.

Procesos Usados para el Armado de la Estructura

Para el armado de la estructura del prototipo, se emplearon diversos procesos de manufactura. El corte de los materiales se realizó con esmeril de mano, obteniendo las piezas en las dimensiones requeridas. A continuación, se taladraron agujeros para facilitar

el ensamblaje y la integración de los componentes. Los acoples se fabricaron mediante torneado, garantizando ajustes precisos y conexiones robustas. Finalmente, se soldaron perfiles para estructurar y montar el prototipo de manera estable. Estos procesos aseguraron la correcta construcción y funcionalidad del prototipo para la investigación.

4.2.1 Corte laser:

El uso de corte para celdas fotovoltaicas en un prototipo de laboratorio ofrece varias ventajas técnicas y operativas. Permite personalizar el tamaño de las celdas según las necesidades del diseño, optimizando el espacio disponible y reduciendo el desperdicio de material. Además, brinda flexibilidad en el diseño del prototipo, permitiendo configuraciones personalizadas para mejorar el rendimiento y eficiencia energética. Asimismo, reduce los costos al evitar la compra de celdas personalizadas y facilita la integración en diferentes estructuras, optimizando el presupuesto.

4.2.2 Torneado:

Se usó el torno para colocar un acople de aluminio en un engranaje impreso en 3D. El aluminio, conocido por su resistencia mecánica y ligereza, resultó ideal para aplicaciones que requerían durabilidad y eficiencia en el manejo de cargas. Al tornear el acople, se logró un ajuste exacto con el engranaje, obteniendo una conexión sólida y confiable. Este proceso también eliminó imperfecciones superficiales, distribuyó uniformemente las cargas y previno puntos de tensión.

4.3 Adquisición de actuadores y accesorios.

Actuadores y Accesorios Mecánicos

Para la fabricación del prototipo de paneles fotovoltaicos bifaciales con seguidor solar, se adquirieron diversos actuadores y accesorios mecánicos. Se utilizó un motor NEMA 17 para proporcionar el movimiento necesario al seguidor solar, permitiendo un ajuste preciso en la orientación de los paneles. La caja de transmisión incorporó varios componentes, incluyendo separadores, seguros seeger, acoples y prisioneros, todos ellos cruciales para garantizar un funcionamiento fluido y estable del sistema. Además, la estructura de aluminio fue asegurada con pernos y remaches, proporcionando una base estable y duradera para el prototipo. La caja electrónica controló todos estos componentes

mecánicos, asegurando una integración adecuada y un funcionamiento óptimo del sistema.

Actuadores y Accesorios Eléctricos

En cuanto a la parte eléctrica del prototipo, se emplearon varios componentes clave. Se utilizó un controlador de carga que no sólo reguló el flujo de energía, sino que también compartió datos sobre la carga producida, permitiendo un seguimiento detallado del rendimiento del sistema. Para almacenar el exceso de energía generada por los paneles solares de acuerdo con cálculos previos, se instaló una batería, garantizando una fuente de energía continua. Además, se añadió un reflector LED que actuó como la carga previamente definida en los cálculos, asegurando que el sistema pudiera manejar las demandas de energía esperadas. Todos los componentes eléctricos fueron conectados con cables del calibre adecuado, asegurando conexiones seguras y fiables, y permitiendo que el sistema eléctrico funcione sin problemas.

4.3.1. Motor NEMA.

Se utilizó un motor nema debido a que proporciona un mayor control y precisión para el movimiento deseado

4.3.2. Controlador PWM.

Se utilizó de manera experimental este tipo de controlador para observar el rendimiento obtenido además que esta marca en particular ofrecía un control de la producción energética mediante una aplicación con facilidad de controlar los datos directamente desde el teléfono móvil

4.3.3. Batería.

Se utilizó una batería marca King Millenium de las siguientes características:

- 12 volt
- 40Ah

4.3.4. Carga.

Se escogió un reflector LED como carga su consumo de potencia de 10 W y trabaja con un voltaje de 12V.

4.4 Ensamblaje general del sistema prototipo.

4.4.1 Fabricación del panel bifacial:

El proceso de fabricación del panel fotovoltaico comenzó con el corte de las celdas fotovoltaicas utilizando tecnología láser, ajustándolas a las medidas especificadas para optimizar el espacio disponible y lograr el voltaje deseado. Posteriormente, se cortaron trozos de tab wire para conectar las celdas. El siguiente paso fue la soldadura inicial, en la cual se unieron las cintas de tab wire a la cara delantera de cada celda fotovoltaica de manera individual. Una vez completada esta fase, las celdas se agruparon en conjuntos de tres, según la configuración planificada. Para alcanzar el diseño de 36 celdas en serie, cada columna se compuso de 12 celdas interconectadas en serie, asegurando que la última celda de cada columna tuviera las únicas cintas de tab wire en la parte posterior.

A continuación, se construyó una mesa de encapsulación diseñada en madera, específicamente adaptada a las dimensiones del panel fotovoltaico, dejando un margen adecuado. Antes de iniciar el proceso de encapsulación, se cortaron láminas de EVA (etilvinilacetato) del tamaño requerido. En el proceso de encapsulado, primero se colocó el vidrio posterior en el fondo de la mesa de encapsulación. Luego se añadió una capa de EVA en el interior de la mesa y se conectó una aspiradora a su parte inferior para facilitar la extracción de aire durante el sellado. Seguidamente, se colocaron las celdas sobre la capa de EVA, se soldaron los tab wires con el bus wire para interconectar todas las celdas en serie, y se verificó que el voltaje estuviera entre 9V y 16V. Posteriormente, se añadió una segunda capa de EVA sobre las celdas.

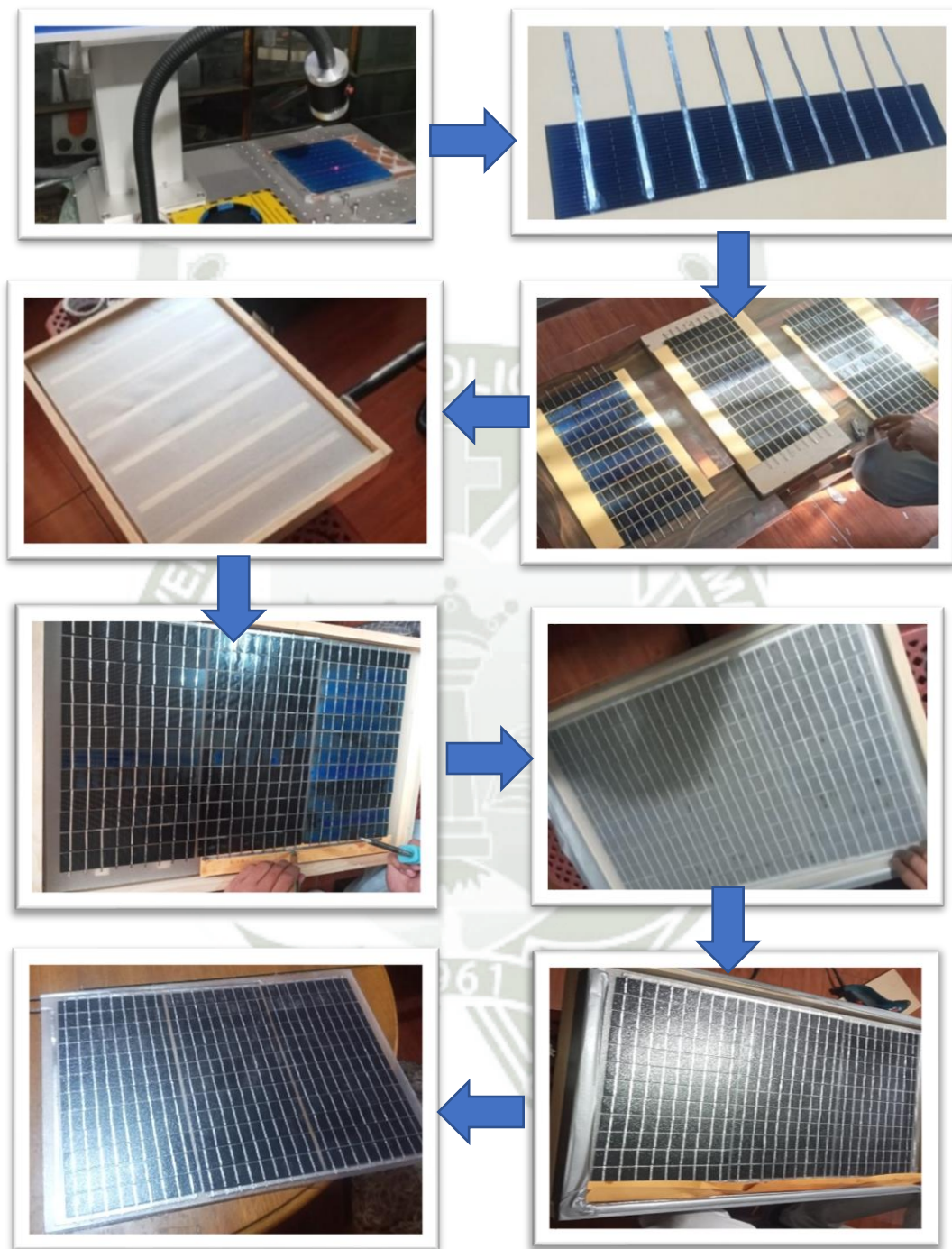
Para sellar el vacío, se utilizó cinta adhesiva duct tape. A partir de ahí, se inició la encapsulación empleando una pistola de calor. Este proceso, que tuvo una duración aproximada de una hora, comenzó activando la aspiradora y calentando desde el centro del panel hacia los bordes con movimientos circulares, asegurándose de eliminar burbujas. Cuando el EVA se volvió transparente, se continuó desplazando la pistola de manera uniforme.

Tras el encapsulado, el panel fue retirado de la mesa y se procedió a colocarle un marco de aluminio y el vidrio frontal. Finalmente, se soldó el diodo de protección y se completaron las conexiones eléctricas del panel.

Tabla.4.1.

Tabla del proceso seguido para la laminación del panel fotovoltaico bifacial.

Cuadro ilustrativo del proceso de laminación



Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Estructura:

El montaje de la estructura de aluminio inició con la planificación detallada de las dimensiones, la ubicación de los perfiles y los puntos de unión, se preparó los materiales

necesarios como perfiles, pernos, remaches y herramientas. Los perfiles se cortaron según las medidas especificadas y se alisaron los bordes para evitar asperezas. Una vez preparados, se colocaron y se alinearon con abrazaderas o dispositivos de sujeción para garantizar precisión durante el ensamblaje. Se perforaron los agujeros en los puntos de unión y se fijaron los perfiles utilizando pernos, arandelas, tuercas y remaches, dependiendo de la resistencia requerida en cada conexión. Posteriormente, se verificó la estabilidad de la estructura, realizando los ajustes necesarios para corregir cualquier desalineación o irregularidad. Todo este proceso se refleja en la figura 4.2



Figura 4.2. (a) *Parte superior de la estructura*, (b) *Base de la estructura ensamblada* y (c) *Estructura terminada*.

Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Sistema de transmisión:

El diseño empleado fue por medio de engranajes y aplicando una reductora de velocidad

El ensamblaje de la caja reductora con engranajes de impresión 3D, un eje de 8 mm, seegers y rodamientos implicó una serie de pasos meticulosos para garantizar su correcto funcionamiento y durabilidad. En primer lugar, se procedió a colocar los rodamientos en el interior de cada engranaje, lo que proporcionaba soporte y reducía la fricción durante la rotación. A continuación, los engranajes con los rodamientos incorporados se montaron en el eje de 8 [mm]. Posteriormente, se aseguraron con seegers en los extremos del eje para garantizar que permanecieran en su lugar de manera segura.

Se fabricó un acople de aluminio para unir el engranaje final y el piñón, utilizando pernos M5 para asegurarlos. Luego, los engranajes con sus acoples respectivos fueron unidos al eje de salida y entrada, respectivamente, y se sujetaron firmemente mediante prisioneros. Este proceso de ensamblaje garantizó una conexión sólida y confiable entre los componentes, asegurando el correcto funcionamiento del sistema en su conjunto.

Fabricación de la caja: la caja fue fabricada con ángulo de 1" x 1" x 2mm

Se cortaron los ángulos de la medida establecida y procedió a soldar la caja

4.4.4 Conexiones eléctricas:

Para las conexiones eléctricas se siguió el orden recomendado por el manual del controlador de carga.

Durante la instalación de su controlador PWM, siga el siguiente orden de conexión:

- Conecte el cable positivo de la batería, seguido del cable negativo de la batería.
- Asegúrese de que sus paneles solares estén completamente cubiertos para evitar descargas eléctricas.
- Conecte el positivo del cable de salida del panel solar seguido del cable de salida negativo del panel solar.
- Conecte el cableado de carga de CC a la salida de carga de CC (si corresponde).
- Descargue la aplicación PVChargePro y active la función Bluetooth en el teléfono móvil. Pruebas.

- La función de la aplicación con el controlador.

Dicho proceso se refleja en la figura 4.3:

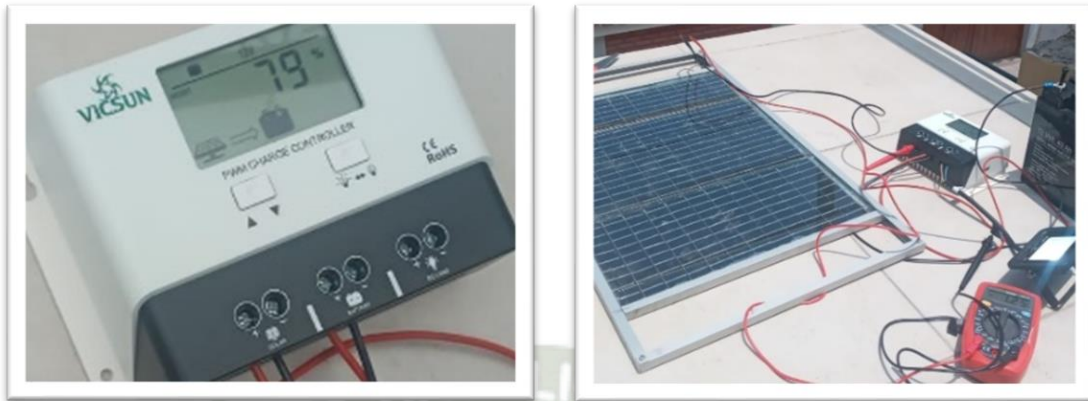


Figura 4.3. Pruebas de conexión eléctrica sin el sistema de movimiento.

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4. Prototipo ensamblado.

Fuente: Elaboración propia

4.4.5 Costos:

Para la fabricación del prototipo se incurrió en los siguientes gastos asociados tanto de compra de materiales que se encuentran en la tabla 4.2 así como también de servicios en la tabla 4.3, estos gastos representan la cantidad monetaria que se destinó para su fabricación.

Tabla.4.2.

Costos de compra de materiales para la fabricación del prototipo.

Componente	Cantidad	Unidad	Base Imponible S/.	IGV S/.	Precio Total S/.
Batería 12V 40AH KING	1	Unidad	288.14	51.86	340.00
Controlador 30A PWM 12/24 AUTO APP Tierra	1	Unidad	271.19	48.81	320.00
Chumacera 8[mm] Soporte de Pared para CNC	1	Unidad	12.71	2.29	15.00
Soporte rodamiento lineal 8[mm] con brida KP08 X2	2	Unidad	22.03	3.97	26.00
Acople flexible de aluminio de 8x8 D19 L25 X2	2	Unidad	16.95	3.05	20.00
Motor de pasos STP-43D1034	1	Unidad	24.58	4.42	29.00
Reflector 12-24DC Opalux con cableado	1	Unidad	78.81	14.19	93.00
Plancha Brillante Acero Inoxidable 2400 [mm] X 1200 [mm]x1.5 [mm] 430	1	Unidad	275.42	49.58	325.00
Celdas fotovoltaicas bifaciales	1	Caja de 100 unidades	955.31	171.96	1127.27
Rodamiento 608 2RS X 20	3	Caja de 10 unidades	33.90	6.10	40.00
Tab wire, bus wire, EVA	1	Pack de rollos (tab wire 20[m] – bus wire 1[m] – Eva 1.5[m]x0.5[m])	490.30	88.25	578.55
Perno métrico M5 x 30	50	Unidad	12.71	2.29	15.00
Tuerca métrica M5	50	Unidad	10.59	1.91	12.50
Arandela métrica M5	50	Unidad	9.75	1.75	11.50
Seguro Seeger exterior 8[mm]	4	Unidad	1.27	0.23	1.50
Remache de aluminio 1/8[pulg] x 4[mm]	28	Unidad	1.27	0.23	1.50
Angulo de acero A-36 1[pulg]x1[pulg]x2[m]	1	Unidad	16.95	3.05	20.00
Platina de acero A-36 1[pulg]x1/8[pulg]x0.5[m]	1	Unidad	6.78	1.22	8.00
Aspiradora industrial	1	Unidad	201.09	36.20	237.29
pistola de calor	1	Unidad	316.00	56.88	372.88
Mesa de encapsulación	1	Unidad	152.54	27.46	180.00
Vidrio incoloro 560[mm]x400[mm]x4[mm]	1	Unidad	23.72	4.27	27.99
Cautín 20[W]	1	Unidad	11.02	1.98	13.00
Varilla roscada de 1.5 [m]	3	Unidad	73.47	13.23	86.70
Tuerca hexagonal 5/16[pulg]	4	Unidad	6.61	1.19	7.80
Angulo de 1 1/2[pulg]x6[m]	2	Varilla	129.66	23.34	153.00
Piezas Espejos 795[mm]x625[mm] 3[mm]	2	Unidad	47.44	8.54	55.98

Piezas vidrio incoloro 560[mm]x400[mm]x3[mm]	2	Unidad	21.18	3.81	24.99
Barra redonda de aluminio 1000[mm]x8[mm]	1	Unidad	13.56	2.44	16.00
Varilla ángulo 1 ½[pulg]x6[m]	1	Varilla	122.88	22.12	145.00
Varilla perfil U ½[pulg]x6[m] color mate	1	Varilla	21.18	3.81	24.99
Arduino Mega 2560 R3	1	Unidad	97.46	17.54	115.00
Protoboard de 630+200 Ptos en blister breadborad X2	1	Unidad	23.73	4.27	28.00
Aplicador de flux portátil recargable	1	Unidad	11.02	1.98	13.00
Flux para soldar x 100ml	1	Unidad	16.95	3.05	20.00
Lead Free Mechanic "LEF-100"	1	Unidad	5.08	0.92	6.00
Cable c./conectores pi/hem. Set de 40, long15cms. - Calbe c./conectores pin/pin set de 40, lon15cms.	1	Pack	5.08	0.92	6.00
CNC Shield V3.0 para arduino	1	Unidad	18.64	3.36	22.00
Converso DC-DC Step Down con Voltímetro	1	Unidad	23.73	4.27	28.00
Estaño para soldar 63SN/37Pb 1mm 100GR	1	Unidad	21.19	3.81	25.00
Driver de motor de pasos bipolar cn DRV8825	1	Unidad	15.25	2.75	18.00
Adaptador Switching 12v 1.5amp pulg 2.5mm	1	Unidad	16.10	2.90	19.00
			3923.24	706.2	4629.44

Nota. Estos costos de materiales fueron realizados la fecha 19/01/2024

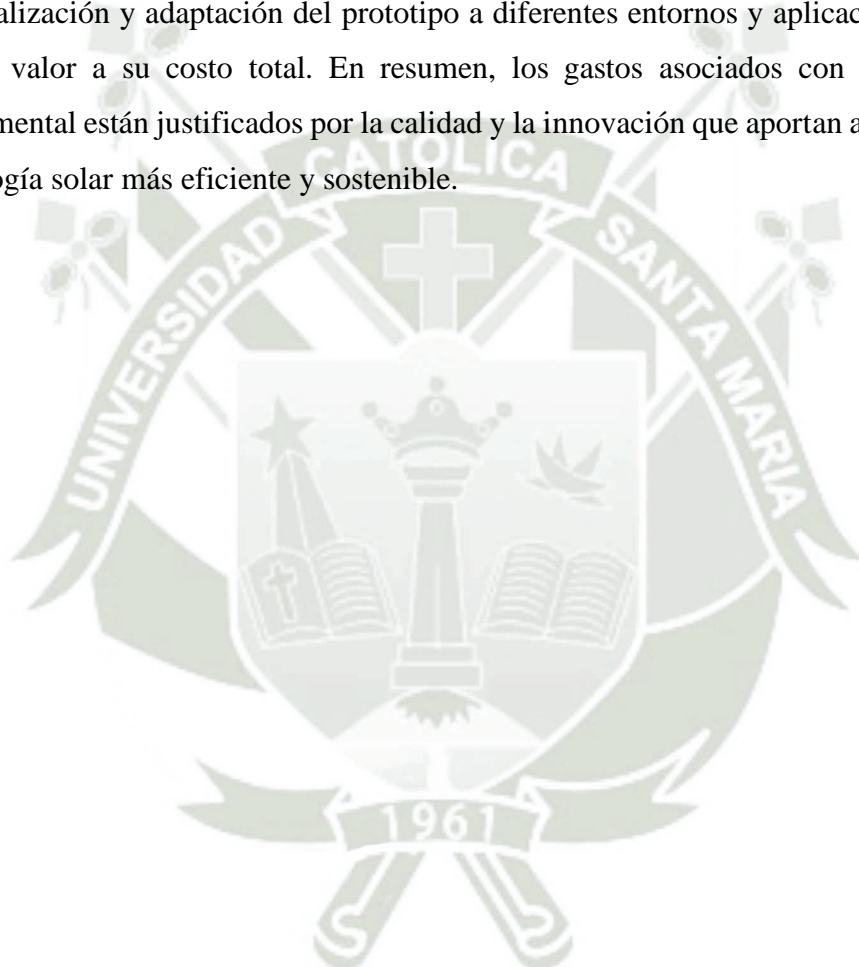
Tabla.4.2.

Costos de compra de materiales para la fabricación del prototipo.

Nota. Estos costos de servicios fueron realizados la fecha 19/01/2024

Descripción	Cantidad	Unit S/.	Precio Total
Corte de perfiles de aluminio	34	3	102
Corte laser de plancha de acero inoxidable	2	7.1	14.2
Corte laser de acrílico	2	27.5	55
Corte laser de celdas	1	300	300
Corte de perfil de ángulo de acero	17	2	34
Soldadura de ángulos de acero	1	100	100
Torneado de acoples de aluminio	4	100	400
Torneado del eje para ranura seeger	4	25	100
Taladrado de agujeros en el aluminio	120	2	240
Taladrado de agujeros en el acero	12	3	36
Impresión 3D	1	600	600
			1981.2

El valor total del prototipo (S/. 6610.64) refleja una inversión significativa en tecnología y materiales de alta calidad. Si bien el precio inicial puede ser más alto que el de algunos sistemas comerciales, la inversión en este prototipo experimental se justifica por su potencial para experimentar con la tecnología emergente de paneles bifaciales cabe resaltar que con los gastos realizados es posible la laminación de más paneles bifaciales pudiendo así efectuarse más investigación con estos. Además, la capacidad de personalización y adaptación del prototipo a diferentes entornos y aplicaciones también agrega valor a su costo total. En resumen, los gastos asociados con este prototipo experimental están justificados por la calidad y la innovación que aportan al desarrollo de tecnología solar más eficiente y sostenible.



Capítulo V

5. Estudio experimental

5.1 . Condiciones de operación

Durante la experimentación del prototipo de redirección de un sistema solar fotovoltaico con paneles bifaciales, se establecieron diversas condiciones de operación para evaluar su desempeño en diferentes escenarios. Estas condiciones incluyeron la redirección de la luz solar tanto en el lado frontal como en el lado posterior de los paneles, lo que permitió analizar el impacto de la orientación óptima de los paneles para maximizar la captación de energía solar. Además, se evaluó el rendimiento del sistema bajo la condición de panel en posición fija, lo que proporcionó una referencia para comparar los resultados obtenidos con y sin redirección. Esta variedad de condiciones de operación proporcionó información crucial sobre la eficacia del prototipo en distintas configuraciones y contribuyó a una comprensión más completa de su funcionamiento en condiciones del mundo real.

5.2 . Adquisición de datos.

La adquisición de datos se realizó mediante el uso de controlador de carga el cual poseía comunicación vía Bluetooth con un teléfono móvil y transfería los datos en tiempo real los cuales fueron recopilados para su estudio y se ordenaron por día. Los datos se encuentran en el Anexo G.

Capítulo VI

6. Resultados

6.1. Resultados obtenidos.

6.1.1. Resultados simulación temperatura

Los resultados de la simulación de temperatura nos permitieron visualizar que la mayor temperatura se encontraba en el centro de la celda y el dato de mayor temperatura alcanzada fue el utilizado en el resto de los cálculos para evaluar la operación más crítica. La figura 6.1 presenta este perfil, con temperaturas que varían de 76.27°C a 86.66°C en el escenario más crítico.

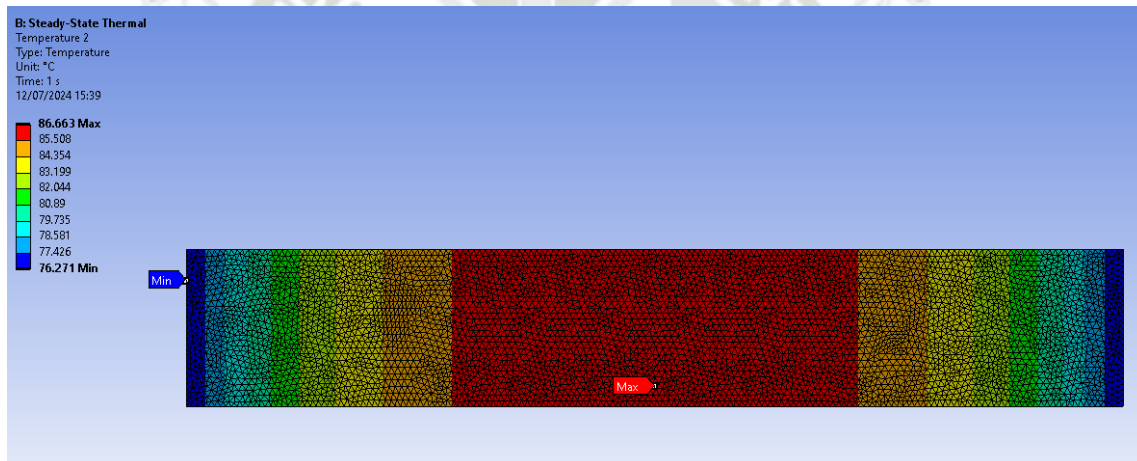


Figura 6.1. Filtro de temperatura a las caras de celda fotovoltaica bifacial.

Nota. La siguiente figura muestra el perfil de temperaturas para el escenario más crítico teniendo en este caso una temperatura que va de 76.27°C hasta 86.66°C .

Análisis y conclusiones

El análisis permitió observar que la temperatura máxima alcanzada en condiciones de radiación máxima fue de 86.66°C , un dato crucial para evaluar la eficiencia y estabilidad térmica de las celdas. La figura 6.2 muestra un gráfico creado mediante Ansys® del incremento de temperatura en las celdas fotovoltaicas analizadas en función de las

variables de radiación aplicadas a la celda, donde podemos apreciar que el crecimiento en el grafico con eje múltiple es lineal.

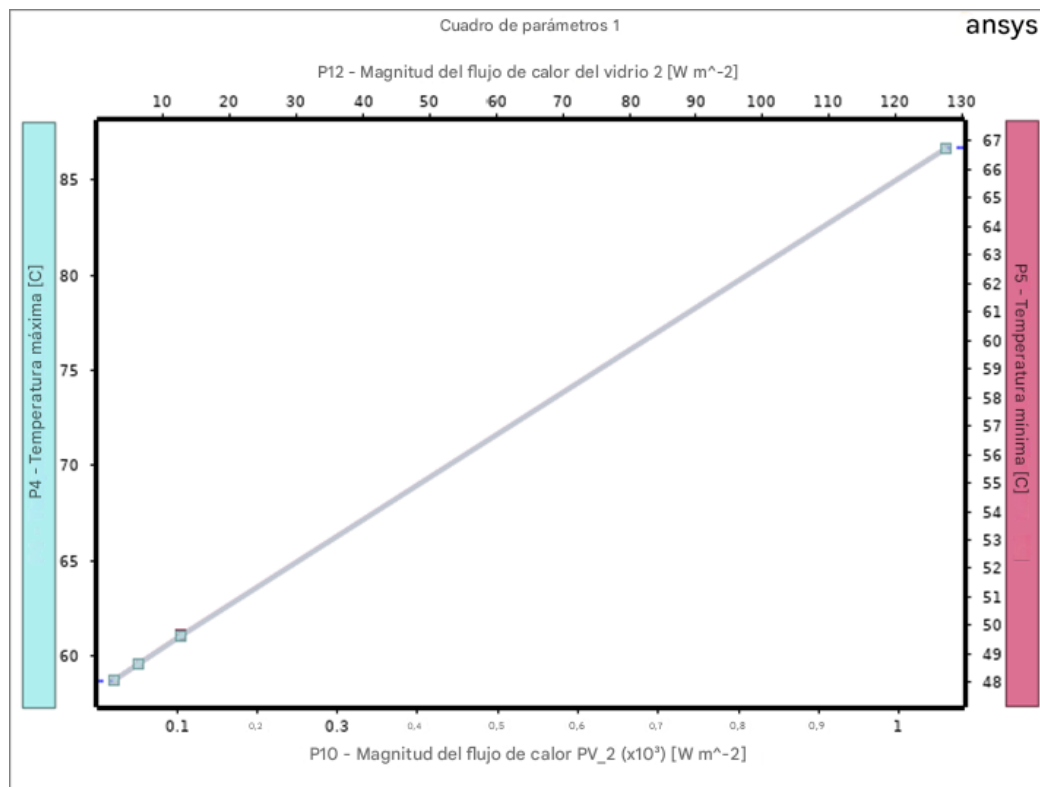


Figura 6.2. Carta paramétrica de los datos de la variación de radiación a la cara posterior.

Nota. Esta figura muestra la gráfica realizada por el software ANSYS®

6.1.2. Resultados simulación eléctrica Matlab Simulink

El propósito del modelamiento mediante Matlab Simulink fue la posibilidad de graficar las curvas I-V y P-V, estas gráficas muestran el comportamiento eléctrico del panel bajo diferentes condiciones de radiación. Los resultados destacan cómo varían la corriente y la potencia en función del voltaje aplicado como se muestra en la figura 6.3.

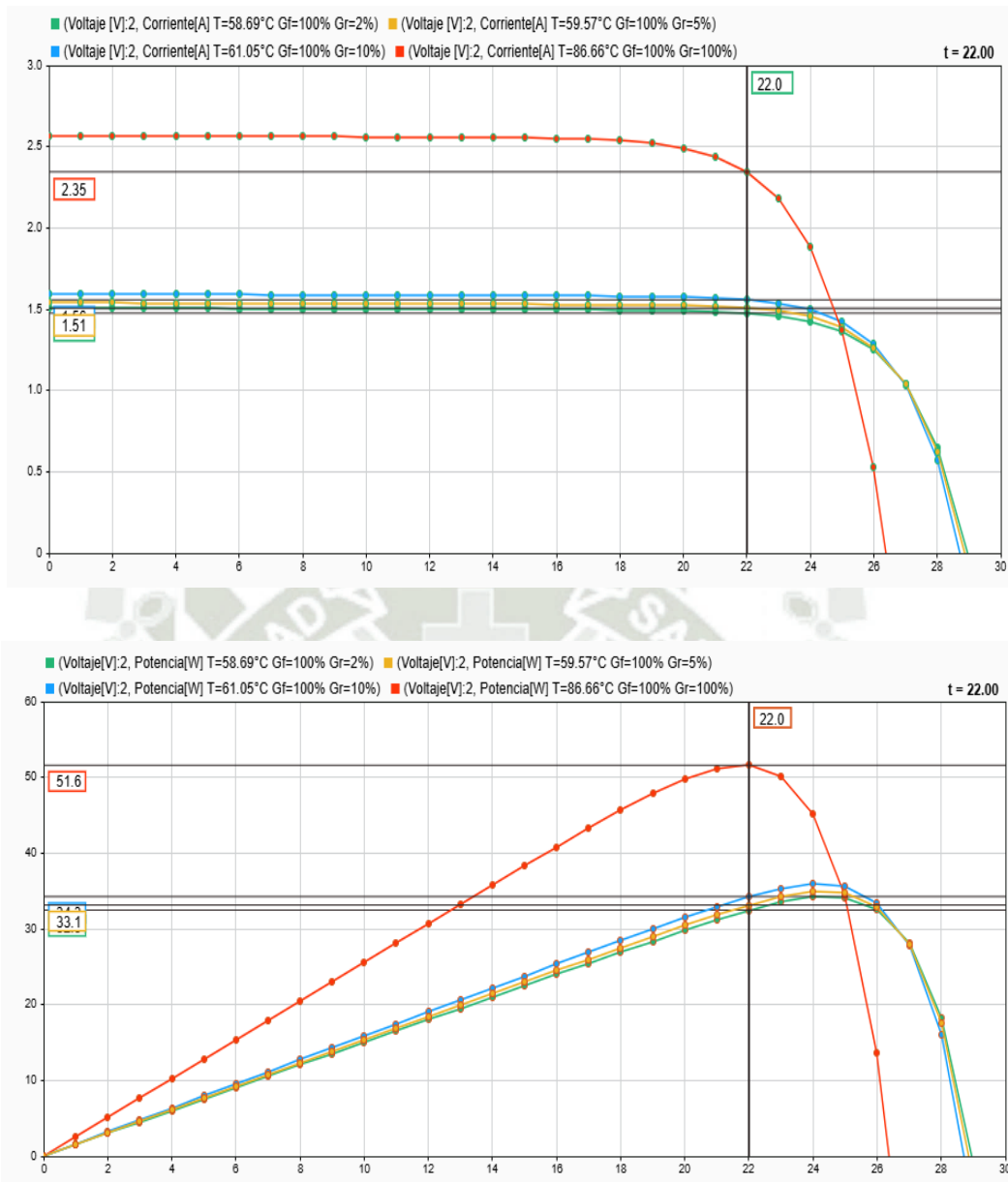


Figura 6.3. (a) Gráficas de I-V y (b) P-V para distintos flujos de radiación aplicados a la cara posterior del panel fotovoltaico bifacial.

Fuente: Elaboración propia

1. **Ganancia relativa:** Al redirigir radiación hacia la cara posterior, se observó un aumento del 35.85% en la eficiencia general del panel en comparación con un panel sin redirección.

$$\eta_{bifacial\ con\ redirección} = \frac{P}{A_r * G} = \frac{51.6[W]}{0.187[m^2] * 798.8037 \left[\frac{W}{m^2}\right]} = 34.64\%$$

$$Ganancia = \frac{\eta_{con\ redireccion} - \eta_{sin\ redireccion}}{P_{con\ redireccion}} \cdot 100 = \frac{51.6 - 33.1}{51.6} \cdot 100 = 35.85\%$$

Análisis y conclusiones

El análisis nos permitió visualizar gráficamente cual es la magnitud de la ganancia bifacial de acuerdo al modelo matemático, esto se aprecia en la figura 6.3(b), así como también el voltaje de trabajo esto es un punto importante al trabajar con un controlador PWM porque el voltaje de trabajo se adaptará al de la carga del sistema, este análisis revela una eficiencia global del panel fotovoltaico bifacial de 34.64% y una ganancia en comparativa a los sistemas sin redirección ni seguidor solar de 35.85%. Por lo tanto, se cumplió la condición de la existencia de ganancia bifacial y por ello continuó con el procedimiento verificando la resistencia estructural.

6.1.3. Resultados del cálculo de la estructura inferior.

Principales variables de salida

- Centroide de la columna (\bar{x}, \bar{y}) : $\bar{x} = \bar{y} = 10.63[mm]$.
- Momento de inercia (I_x, I_y) : $I_x = I_y = 30,786.5[mm^4]$.
- Radio de giro (r) : $r = 11.84 [mm]$.
- Esbeltez (L/r) : $L/r = 53.21$.
- Esfuerzo permisible (σ_{perm}) : $\sigma_{perm} = 93.23MPa$.
- Esfuerzos normales $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C)$:
 - $\sigma_A = 10.128MPa$
 - $\sigma_B = 21.34MPa$
 - $\sigma_C = 21.538MPa$.
- Esfuerzo cortante puro (τ_{max}) : $\tau_{max} = 0.631MPa$.
- Esfuerzo cortante por torsión $(\tau_{torsión})$: $\tau_{torsión} = 4.728MPa$.
- Esfuerzos principales (σ_1, σ_2) :
 - $\sigma_1 = 22.797MPa$
 - $\sigma_2 = -1.259MPa$.

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \leq \sigma_{perm}^2$$

$$(22.797)^2 - (22.797)(-1.259) + (-1.259)^2 \leq (93.23)^2$$

$$549.98 \leq 8691.83 \text{ OK!}$$

Análisis y conclusiones

Los resultados de la parte estructural en la parte inferior muestran que el esfuerzo permisible supera al que es sometido nuestra estructura y por lo tanto la estructura soportará las cargas sometidas.

6.1.4. Resultados del cálculo de la estructura mediante la matriz de rigidez

- Deformaciones nodales (u, v, ϕ):

u_2	=	$2.35037E - 05$	mm
v_2		0.045446906	mm
ϕ_2		-0.000160647	mm
u_3		-0.002202125	mm
v_3		0.044000901	mm
ϕ_3		$2.96104E - 05$	mm
u_4		-0.002602502	mm
v_4		0.043014644	mm
ϕ_4		$-4.68115E - 05$	mm
u_5		-0.000323063	mm
v_5		0.040307973	mm
ϕ_5		0.000130141	mm

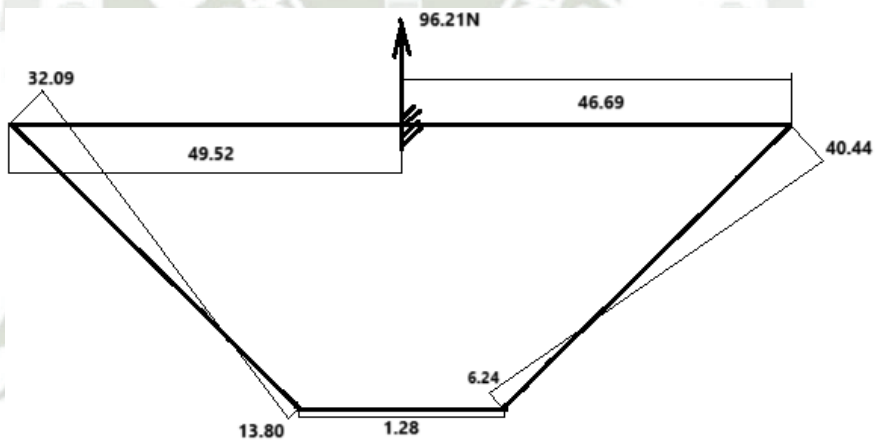
- Reacciones en nodos (F_x, F_y, M):

$f_{12}' =$ <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>$F_{x1} =$</td><td>1.49 N</td></tr> <tr><td>$F_{y1} =$</td><td>49.52 N</td></tr> <tr><td>$M1 =$</td><td>7.33 N*m</td></tr> <tr><td>$F_{x2} =$</td><td>-1.49 N</td></tr> <tr><td>$F_{y2} =$</td><td>-49.52 N</td></tr> <tr><td>$M2 =$</td><td>-4.47 N*m</td></tr> </table>	$F_{x1} =$	1.49 N	$F_{y1} =$	49.52 N	$M1 =$	7.33 N*m	$F_{x2} =$	-1.49 N	$F_{y2} =$	-49.52 N	$M2 =$	-4.47 N*m	$f_{23}' =$ <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>$F_{x2} =$</td><td>33.77 N</td></tr> <tr><td>$F_{y2} =$</td><td>-32.09 N</td></tr> <tr><td>$M2 =$</td><td>-4.47 N*m</td></tr> <tr><td>$F_{x3} =$</td><td>-33.77 N</td></tr> <tr><td>$F_{y3} =$</td><td>13.81 N</td></tr> <tr><td>$M3 =$</td><td>1.20 N*m</td></tr> </table>	$F_{x2} =$	33.77 N	$F_{y2} =$	-32.09 N	$M2 =$	-4.47 N*m	$F_{x3} =$	-33.77 N	$F_{y3} =$	13.81 N	$M3 =$	1.20 N*m
$F_{x1} =$	1.49 N																								
$F_{y1} =$	49.52 N																								
$M1 =$	7.33 N*m																								
$F_{x2} =$	-1.49 N																								
$F_{y2} =$	-49.52 N																								
$M2 =$	-4.47 N*m																								
$F_{x2} =$	33.77 N																								
$F_{y2} =$	-32.09 N																								
$M2 =$	-4.47 N*m																								
$F_{x3} =$	-33.77 N																								
$F_{y3} =$	13.81 N																								
$M3 =$	1.20 N*m																								

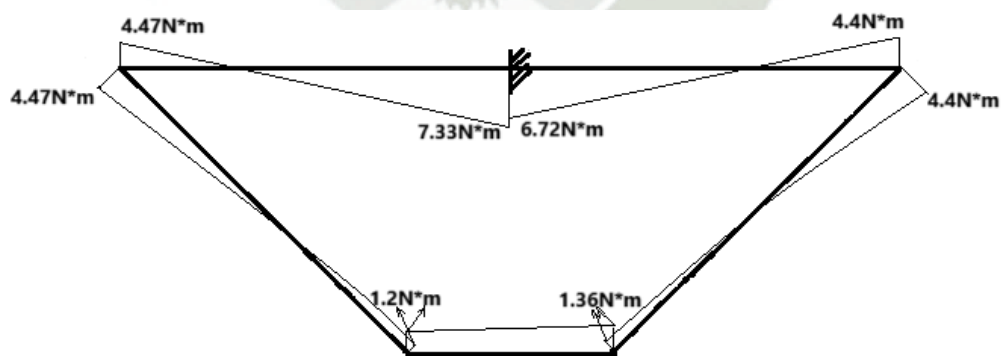
	$F_{x3} = 47.89 \text{ N}$		$F_{x4} = 18.51 \text{ N}$
	$F_{y3} = -1.28 \text{ N}$		$F_{y4} = 6.24 \text{ N}$
$f_{34}' =$	$M_3 = 1.20 \text{ N}\cdot\text{m}$	$f_{45}' =$	$M_4 = 1.36 \text{ N}\cdot\text{m}$
	$F_{x4} = -47.89 \text{ N}$		$F_{x5} = -18.51 \text{ N}$
	$F_{y4} = 1.28 \text{ N}$		$F_{y5} = -40.44 \text{ N}$
	$M_4 = 1.36 \text{ N}\cdot\text{m}$		$M_5 = -4.40 \text{ N}\cdot\text{m}$

	$F_{x5} = 20.52 \text{ N}$
	$F_{y5} = -46.69 \text{ N}$
$f_{51}' =$	$M_5 = -4.40 \text{ N}\cdot\text{m}$
	$F_{x1}' = -20.52 \text{ N}$
	$F_{y1}' = 46.69 \text{ N}$
	$M_1' = 6.72 \text{ N}\cdot\text{m}$

(a)



(b)



(c)

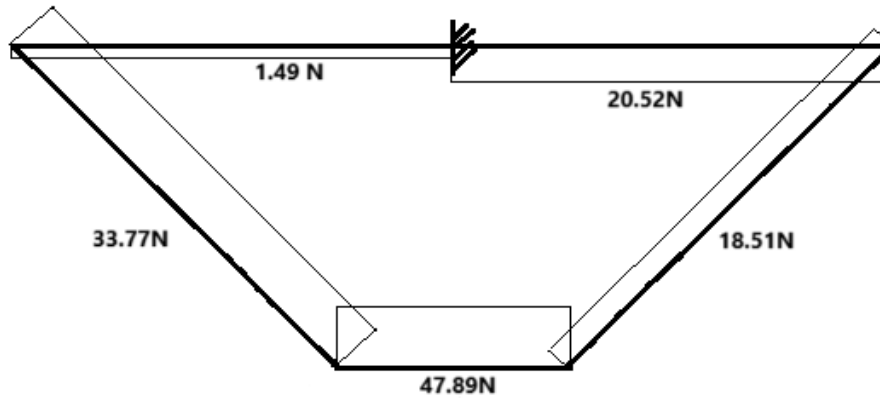


Figura 6.4. (a) Diagrama de fuerza cortante de la estructura, (b) Diagrama de momento flector de la estructura y (c) Fuerzas axiales en la estructura.

Fuente: Elaboración propia

Analizando el elemento entre los nodos 2 y 5.

- Esfuerzo normal (σ_A):
 - $\sigma_A = 0.10023 [MPa]$
- Esfuerzo cortante puro (τ_{max}): $\tau_{max} = 0.63129 [MPa]$
- Esfuerzos principales (σ_1, σ_2):
 - $\sigma_1 = 0.68339 [MPa]$
 - $\sigma_2 = 0.68339 [MPa]$.

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \leq \sigma_{perm}$$

$$(0.68339)^2 - (0.68339)(-0.58316) + (-0.58316)^2 \leq (93.23)^2$$

$$1.20562 \leq 8691.83 \text{ OK!}$$

Análisis y conclusiones

Los resultados de la parte estructural en la parte móvil mostrados en la figura 6.4 fueron analizados mediante el método de elementos finitos nos muestra que el esfuerzo permisible es mucho mayor al sometido y por lo tanto podemos concluir que la estructura resistirá las cargas.

6.1.5. Resultados cálculo de pernos

- Esfuerzo en pernos (τ_{perno}): $\tau_{perno} = 3.75 MPa$.

Selección estándar del perno

El diámetro calculado es $d \approx 0.884[\text{mm}]$. Sin embargo, en la práctica se usan pernos comerciales con diámetros estándar. El diámetro más cercano sería:

- M5 $d \approx 0.884[\text{mm}]$. o superior, dependiendo de los factores de seguridad.
- Diámetro del perno sugerido: $d = 5[\text{mm}]$.
- Material: Resistencia cortante permisible para SAE 1020 $\tau_{perm} = 120[\text{MPa}]$.

6.1.6. Resultados del cálculo de engranajes y ejes

Principales variables de salida: Caja reductora

- Velocidad del tren (n_f, n_i):
 - Velocidad inicial (n_i): 60 [RPM]
 - Velocidad final (n_f): 0.000694444 [RPM]
- Relación de transmisión (TV): $TV=86,400$
- Relación de velocidad (VR): $VR=1.952$.
- Paso diametral (P_d): $P_d = 12.7$
- Módulo (m): $m=2$
- Número de dientes (N_{dp}, N_{dG}):
 - Piñón (N_{dp}): 25 dientes
 - Engranaje (N_{dG}): 49 dientes.
- Diámetro de los engranajes (D_p, D_G):
 - Piñón (D_p): 1.969 [pulg].
 - Engranaje (D_G): 3.842 [pulg].
- Torque (T, T_o):
 - Torque aplicado (T): 26.55 [lb · pulg]
 - Torque resultante (T_o): 13.6 [lb · pulg]
- Fuerza tangencial (W_t): $W_t = 13.99$ [lb].
- Valor: Fuerza radial (W_r): $W_r = 5.092$ [lb]
- Fuerza total (W): $W = 14.83$ [lb].
- Ancho de cara (F): $F = 0.17$ [pulg].

Principales variables de salida: Cálculo de ejes de la caja reductora (Con valores)

- Diagrama de momentos flectores (Plano X-Y y X-Z):

Representación gráfica elaborada con Excel para los ejes:

- Diagrama de momento flector del eje 2 (X-Y).

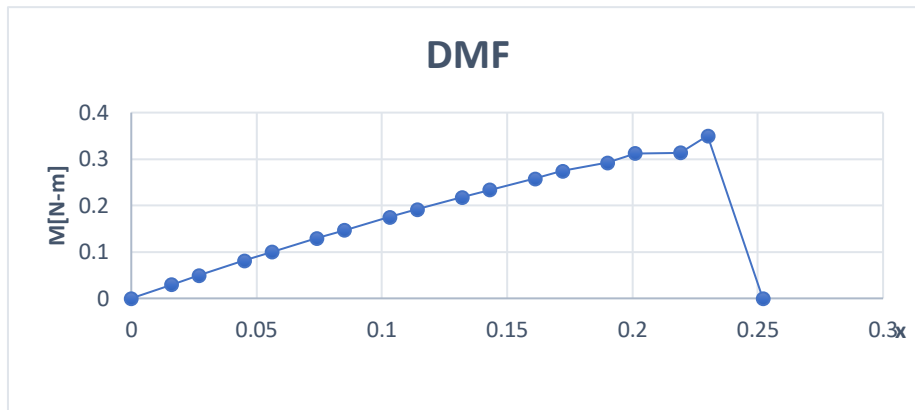


Figura 6.5. Diagrama de momento flector del eje 2 en el plano x-y.

Fuente elaboración propia

- Diagrama de momento flector del eje 2 (X-Z).

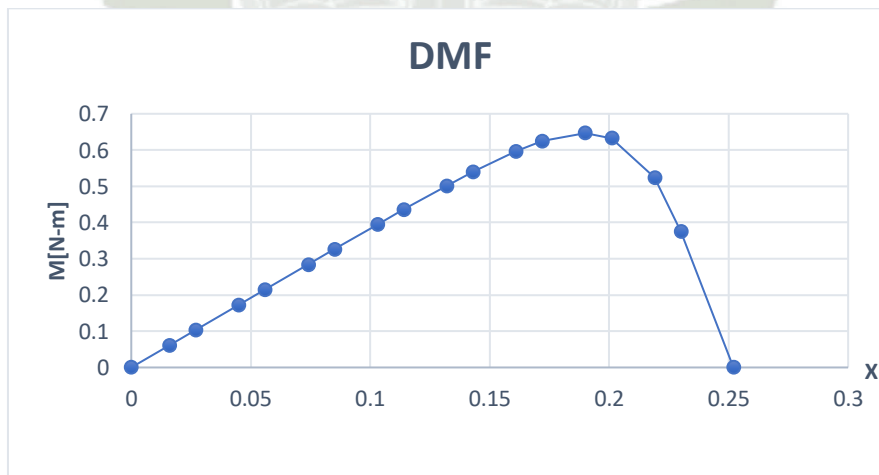


Figura 6.6. Diagrama de momento flector del eje 2 en el plano x-z.

Fuente elaboración propia

- Diagrama de momento flector del eje 3 (X-Y).

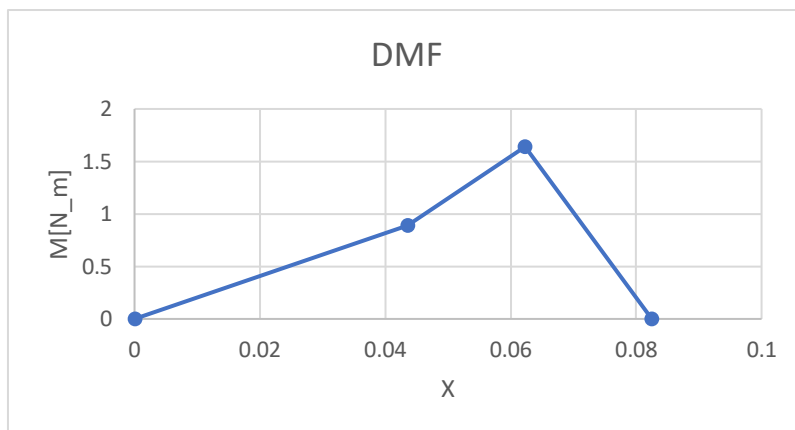


Figura 6.7. Diagrama de momento flector del eje 3 en el plano x-y.

Fuente: Elaboración propia

- Diagrama de momento flector del eje 3 (X-Z).

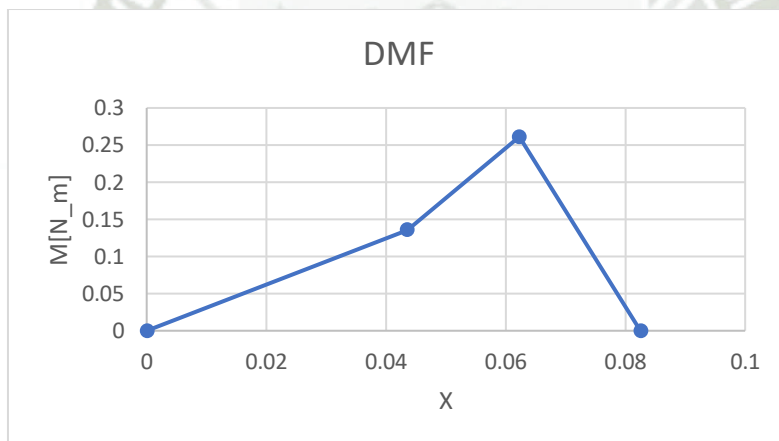


Figura 6.8. Diagrama de momento flector del eje 3 en el plano x-z.

Fuente: Elaboración propia

- Diagrama Reacciones y momentos en los ejes (R_x, R_y, M_x, M_y, M_z):
 - Para el eje 2: $M_y = 0.2922 [N \cdot m]$, $M_z = 0.6465 [N \cdot m]$
 - Para el eje 3: $M_y = 1.64 [N \cdot m]$, $M_z = 0.2612 [N \cdot m]$, $T = 0.3132 [N \cdot m]$

- Para el eje 1: $M_y = 1.5481 \times 10^{-5} [N \cdot m]$, $M_z = 1.3196 \times 10^{-5} [N \cdot m]$, $T = 7.7409 \times 10^{-6} [N \cdot m]$
- Diámetros mínimos requeridos (d):
 - Eje 2: $d = 4.165 [mm] \approx 5 [mm]$.
 - Eje 3: $d = 5.56 [mm] \approx 6 [mm]$.
 - Eje 1: $d = 0.130 [mm] \approx 1 [mm]$.

6.1.7. Resultados simulación producción energética

Para un panel bifacial con redirección y seguimiento solar tenemos la siguiente distribución de energía a lo largo del día, representada en la figura 6.9

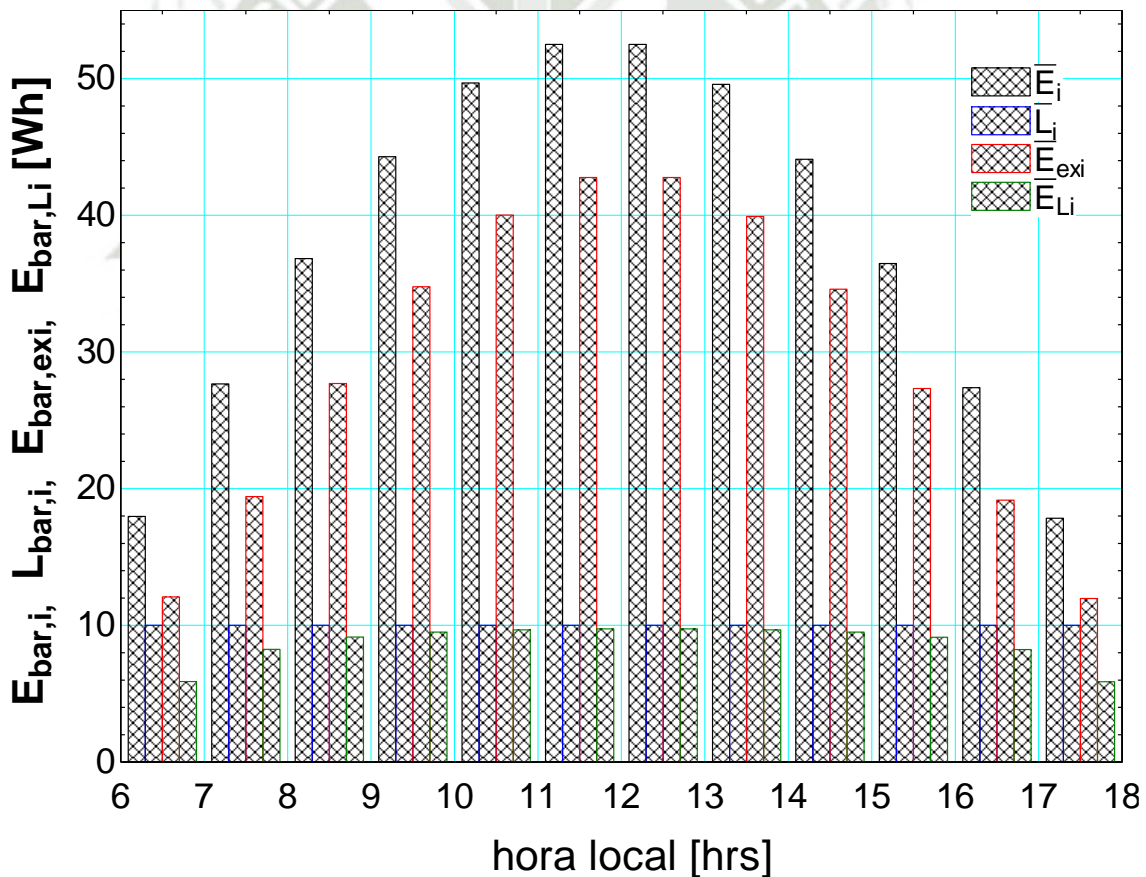


Figura 6.9. Gráfica de la energía producida, la carga alimentada, energía proporcionada a la carga y la cantidad de energía que supera la carga para el sistema fotovoltaico bifacial con seguidor solar y redirección de radiación.

Fuente: Elaboración propia

- Energía eléctrica producida (\bar{E}): Energía generada por el sistema fotovoltaico promedio mensual por día $\bar{E} = 456.8[Wh]$.
- Energía suministrada a la carga (\bar{L}_i): Energía que alimenta la carga conectada al sistema fotovoltaico $\bar{L} = 104.3[Wh]$.
- Energía que excede la suministrada a la carga (\bar{E}_{ex}): Energía que alimenta la carga conectada al sistema fotovoltaico $\bar{E}_{ex} = 352.4[Wh]$.

Para un panel bifacial estático sin redireccionamiento solar tenemos la siguiente distribución de energía a lo largo del día, representada en la figura 6.10

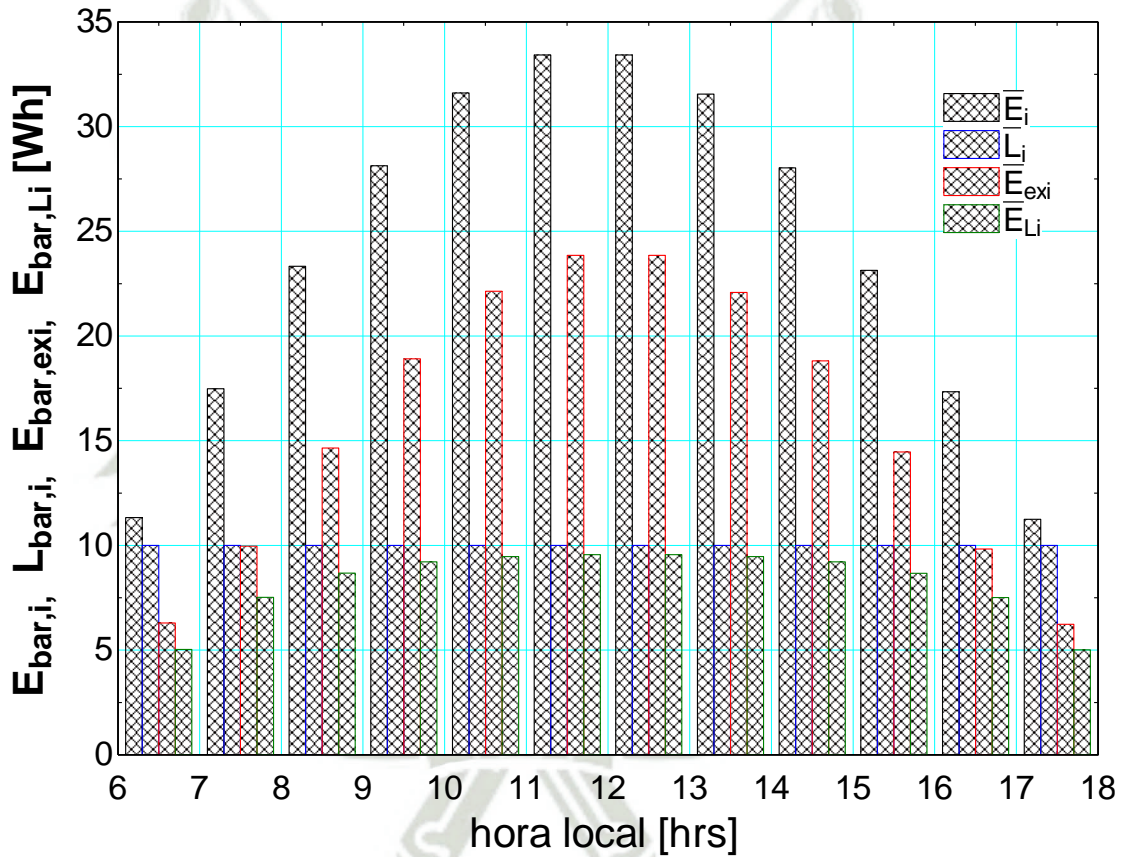


Figura 6.10. Gráfica de la energía producida, la carga alimentada, energía proporcionada a la carga y la cantidad de energía que supera la carga para el sistema fotovoltaico bifacial estático y sin redirección de radiación.

Fuente: Elaboración propia

- Energía eléctrica producida (\bar{E}): Energía generada por el sistema fotovoltaico promedio mensual por día $\bar{E} = 290[Wh]$.
- Energía suministrada a la carga (\bar{L}_i): Energía que alimenta la carga conectada al sistema fotovoltaico $\bar{L} = 98.92[Wh]$.

- Energía que excede la suministrada a la carga (\bar{E}_{ex}): Energía que alimenta la carga conectada al sistema fotovoltaico $\bar{E}_{ex} = 191.1 [Wh]$.

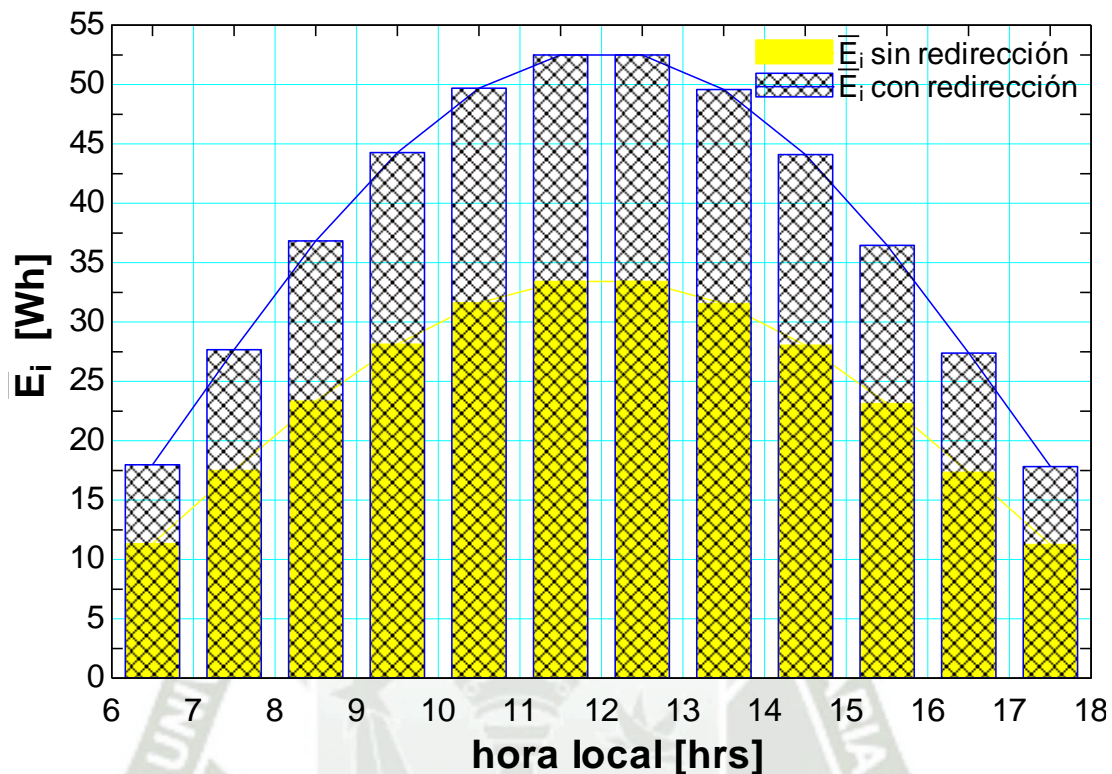


Figura 6.11. Gráfica de la energía producida al día por el sistema con redirección vs el sistema sin redirección.

Fuente: elaboración propia

Posteriormente se determinó el total de la energía producida al día la cual estaba determinada por la suma de todos los puntos colocados en la figura 6.11. primero para el sistema con redirección en color azul y luego para sistema sin redirección en color amarillo y determinaremos la ganancia de energía diaria que aporta el sistema con redirección.

$$Ganancia = \frac{\bar{E}_{T,prototipo} - \bar{E}_{T,fijo}}{\bar{E}_{T,prototipo}} \cdot 100 = \frac{456.8 - 290}{456.8} \cdot 100 = 36.51\%$$

Análisis y conclusiones

Los resultados de la gráfica de la energía producida al día por el sistema con redirección vs el sistema sin redirección, muestran que existe una ganancia bifacial considerable.

Comparación teórica-experimental.

Los resultados reales obtenidos de la aplicación PVChargePro fueron tabulados y graficados, se evaluó los datos obtenidos de 3 días representativos, los días (10/03/24 y 11/03/24) el sistema estuvo con seguidor y redirección de la radiación solar y el día (08/03/24) estático y sin redirección. Obteniendo los siguientes datos experimentales mostrados en la figura 6.12 y en la figura 6.13.

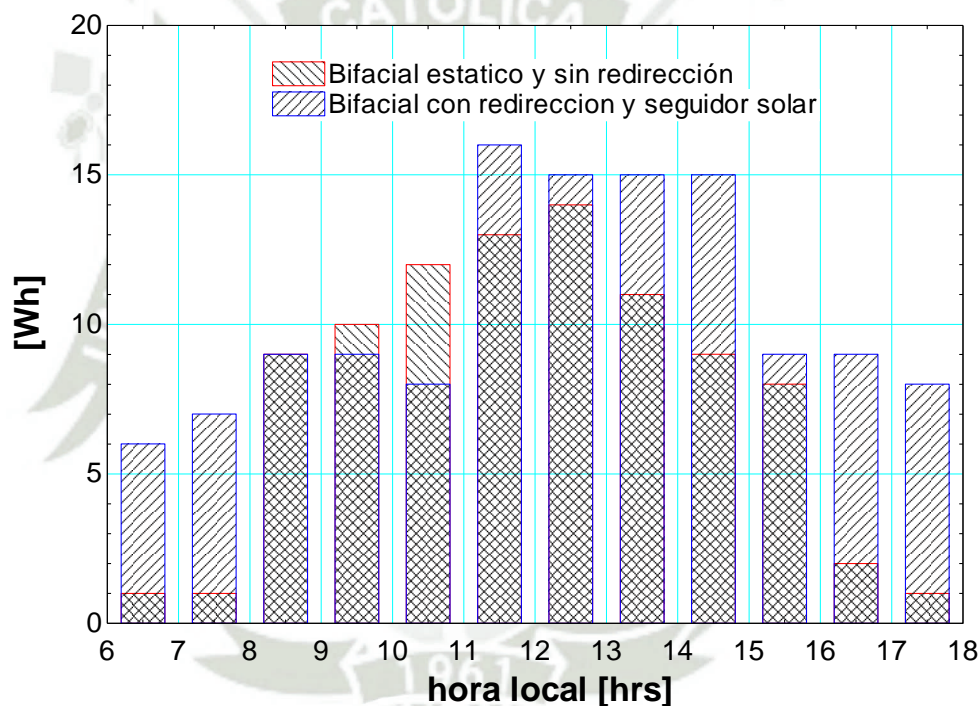


Figura 6.12. Gráfica generada de los datos adquiridos el día (10/03/2024) vs día (08/03/2024).

Fuente: Elaboración propia

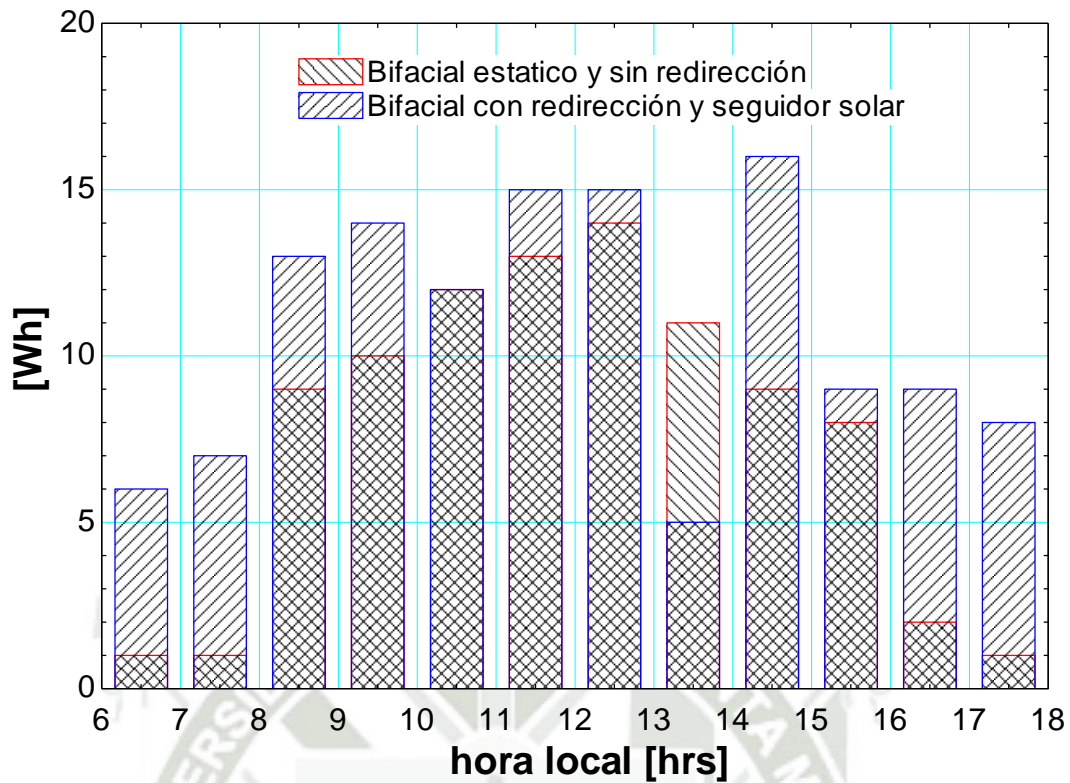


Figura 6.13. Gráfica generada de los datos adquiridos el día (11/03/2024) vs día (08/03/2024).

Fuente: Elaboración propia

6.2. Resultados finales.

Se analizaron los resultados de la ganancia calculada con los datos medidos.

$$G_{real\ 1} = \frac{\bar{E}_{T,prototipo} - \bar{E}_{T,fijo}}{\bar{E}_{T,prototipo}} \cdot 100\% = \frac{126 - 91}{126} \cdot 100 = 27.7777\%$$

$$G_{real\ 2} = \frac{\bar{E}_{T,prototipo} - \bar{E}_{T,fijo}}{\bar{E}_{T,prototipo}} \cdot 100\% = \frac{129 - 91}{129} \cdot 100 = 29.4573\%$$

$$G_{calculado} = \frac{\bar{E}_{T,prototipo} - \bar{E}_{T,fijo}}{\bar{E}_{T,prototipo}} \cdot 100 = \frac{456.8 - 290}{456.8} \cdot 100 = 36.51\%$$

$$E_{a1} = G_{calculado} - G_{real\ 1} = 36.51 - 27.7777 = 8.7333\%$$

$$E_{r1} = \frac{E_a}{G_{calculado}} \cdot 100\% = \frac{7.5023}{36.51} \cdot 100 = 23.91\%$$

$$E_{a2} = G_{calculado} - G_{real\ 2} = 36.51 - 29.4573 = 7.0527\%$$

$$E_{r2} = \frac{E_a}{G_{calculado}} \cdot 100\% = \frac{2.892}{36.51} \cdot 100 = 19.3\%$$

Donde:

$G_{calculado}$: Ganancia de energía calculada con el modelo matemático

$G_{real 1}$: Ganancia de energía de la primera comparación de datos

$G_{real 2}$: Ganancia de energía de la segunda comparación de datos

E_{a1} : Error absoluto de la primera comparación de datos

E_{a2} : Error absoluto de la segunda comparación de datos

E_{r1} : Error relativo porcentual de la primera comparación de datos

E_{r2} : Error relativo porcentual de la segunda comparación de datos

En el análisis de los resultados obtenidos, se utilizaron varios modelos para aproximar la ganancia bifacial en un escenario particular. Inicialmente, se observó un error relativo porcentual del 23.91% al comparar los datos medidos con los calculados. Este error, aunque significativo, se encuentra cerca del valor aceptable, que generalmente se considera inferior al 10% en este tipo de estudios. Esta discrepancia sugiere la necesidad de revisar y ajustar los modelos utilizados para mejorar la precisión en la estimación de la ganancia energética, garantizando que las predicciones se alineen mejor con las condiciones reales del sistema bifacial.

En una segunda evaluación realizada en un día diferente, el error relativo porcentual se redujo a 19.3%, logrando una mejora. Con estos resultados logramos aproximarnos más, pero en la fabricación del prototipo entran muchos factores físicos que pueden afectar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos como son las microgrietas y la existencia de pequeñas decoloraciones o burbujas.

Conclusiones

- El desarrollo de un modelo teórico robusto permitió analizar detalladamente los fenómenos físicos involucrados en la captación de radiación solar, logrando un error relativo porcentual inicial del 19.3%, considerado aceptable dentro de los parámetros establecidos. Este modelo fue validado mediante el cálculo de la relación de radiación absorbida por las celdas bifaciales, obteniendo mejoras en la eficiencia energética del sistema en un rango de 27% a 35%. La metodología iterativa aplicada garantizó la confiabilidad y utilidad práctica del diseño, consolidándolo como una herramienta clave para optimizar sistemas bifaciales futuros.
- El modelado estructural y térmico, llevado a cabo con EES, Ansys y MATLAB-Simulink, permitió simular los esfuerzos mecánicos, térmicos y energéticos de manera integral. Las simulaciones estructurales determinaron un esfuerzo máximo de 6.5 MPa y una deformación máxima de 0.44828 mm, dentro de los límites permisibles de los materiales seleccionados. Adicionalmente, el análisis térmico reveló que las temperaturas de las celdas bifaciales oscilan entre 76.27°C y 86.66°C bajo radiación máxima, enfatizando la necesidad de implementar estrategias de disipación de calor para garantizar la estabilidad del sistema. Por otro lado, las simulaciones en MATLAB-Simulink permitieron evaluar las eficiencias del sistema bajo distintas condiciones térmicas y compararlas con referencias. Finalmente, utilizando el modelo de Duffie y Beckman en EES, se estimó la producción diaria promedio de energía, confirmando que el diseño con redirección ofrece ventajas significativas sobre un sistema sin redirección en términos de captación y gestión energética.
- La construcción del prototipo a escala laboratorio fue exitosa gracias a una selección precisa de materiales como aluminio y acero inoxidable, que garantizan ligereza, durabilidad y resistencia estructural. Las celdas bifaciales fueron encapsuladas mediante técnicas optimizadas, maximizando la captación de radiación solar. La caja reductora, diseñada para seguir la trayectoria solar en tiempo real, y el sistema de control electrónico integraron todos los componentes

en un sistema funcional, asegurando un desempeño adecuado en condiciones operativas reales.

El ensamblaje estructural fue meticuloso, incorporando ángulos de aluminio y sistemas de redirección con láminas de acero inoxidable brillante para mejorar la refracción especular. Además, el prototipo se conectó exitosamente a un sistema de almacenamiento y carga que incluyó una batería de 12V 40Ah, un controlador PWM y un motor Nema 17, demostrando una integración eficiente y funcional.

El prototipo experimental, con un costo total de S/. 6610.64, representa una inversión estratégica en tecnología avanzada y materiales de alta calidad. Aunque su costo inicial puede parecer elevado frente a sistemas comerciales, su diseño personalizable y adaptable lo convierte en una plataforma versátil para investigaciones futuras. La implementación de tecnología emergente en paneles bifaciales y el éxito en la construcción refuerzan su valor como una solución innovadora para optimizar el aprovechamiento de la energía solar.

- Los resultados experimentales validaron la precisión del modelo teórico y la efectividad del prototipo. Se concluyó que el sistema con redirección logra ganancias energéticas superiores en comparación con un diseño de inclinación fija. Además, el modelo teórico permitió estimar con precisión la producción energética diaria promedio mensual, tanto para la carga como para el almacenamiento en batería.

El análisis de ganancia bifacial confirmó una mejora significativa en la eficiencia del sistema, mientras que las simulaciones estructurales y térmicas reafirmaron la seguridad y confiabilidad del diseño. Estos hallazgos respaldan la viabilidad del prototipo como una solución innovadora y eficiente para aplicaciones en captación de energía solar.

Recomendaciones

- Continuar con la optimización del modelo teórico para reducir el error relativo porcentual por debajo del 19.3%, refinando las ecuaciones utilizadas e incorporando datos experimentales adicionales para validar el modelo bajo diferentes escenarios climáticos.
- Realizar estudios comparativos en otras ubicaciones geográficas para evaluar cómo las condiciones de radiación solar y reflectancia del suelo afectan la eficiencia del sistema bifacial.
- Ampliar la metodología iterativa aplicada, incorporando técnicas avanzadas de optimización para mejorar la precisión de las predicciones energéticas.
- Complementar las simulaciones estructurales y térmicas con un análisis modal para identificar modos de falla y frecuencias naturales, asegurando una mejor resistencia del sistema ante vibraciones y cargas dinámicas.
- Profundizar en el análisis térmico utilizando ANSYS® para evaluar la distribución de temperatura en las celdas bifaciales. Este análisis permitirá diseñar sistemas de disipación más eficientes y prever posibles fallos por sobrecalentamiento.
- Explorar mejoras en el modelo de simulación implementado en MATLAB-Simulink, integrando variables adicionales como la degradación de materiales a largo plazo y las condiciones ambientales extremas.
- Evaluar la posibilidad de optimizar la caja reductora mediante el uso de opciones comerciales, como cajas de engranajes helicoidales o planetarios, que ofrezcan mayor eficiencia, durabilidad y confiabilidad en el sistema de seguimiento solar.
- Incorporar finales de carrera al sistema de seguimiento para mejorar la precisión y evitar des calibraciones durante el funcionamiento del prototipo.

- Considerar la utilización de motores de muy baja potencia, como motores brushless, para mejorar la eficiencia energética del sistema de seguimiento y reducir el consumo eléctrico.
- Investigar nuevos materiales y procesos de fabricación para optimizar la durabilidad y el costo del sistema, explorando alternativas como compuestos ligeros o materiales reciclables.
- Realizar pruebas exhaustivas bajo diferentes condiciones climáticas y operativas para validar la viabilidad del sistema en escenarios reales, evaluando su resistencia, durabilidad y eficiencia energética.
- Implementar estudios adicionales que permitan comparar los resultados del prototipo con datos obtenidos de sistemas bifaciales comerciales, identificando áreas de mejora en el diseño y rendimiento.
- Continuar con investigaciones orientadas a adaptar el diseño a distintas aplicaciones y entornos, explorando potenciales ajustes en la inclinación, materiales reflectantes y configuraciones estructurales.
- Mantener un enfoque en la investigación y desarrollo continuo, aprovechando los resultados obtenidos como base para innovar y ampliar las aplicaciones del sistema en diversos contextos.
- Explorar colaboraciones con instituciones académicas o industriales para validar y optimizar el diseño a mayor escala, evaluando su potencial para implementaciones comerciales.
- Actualizar el prototipo de acuerdo con las últimas tecnologías emergentes en paneles bifaciales, sistemas de seguimiento y almacenamiento energético, garantizando su competitividad en el mercado.

Referencias bibliográficas

- Aghaei, M., Ebadi, H., De Oliveira, A. K. V., Vaezi, S., Eskandari, A., & Castañón, J. M. (2020). New concepts and applications of solar PV systems. In *Photovoltaic Solar Energy Conversion: Technologies, Applications and Environmental Impacts* (pp. 349–390). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00011-9>
- Aghaei, M., Kumar, N. M., Eskandari, A., Ahmed, H., De Oliveira, A. K. V., & Chopra, S. S. (2020). Solar PV systems design and monitoring. In *Photovoltaic Solar Energy Conversion: Technologies, Applications and Environmental Impacts* (pp. 117–145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00005-3>
- Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. In *Applied System Innovation* (Vol. 5, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>
- Asghari Faryad, H., Choi, J.-K., & Mohammadi, Z. (n.d.). Photovoltaic Generator Characteristics Modeling Using MATLAB/SIMULINK. In *International Journal of Current Trends in Engineering & Technology*.
- Bhang, B. G., Lee, W., Kim, G. G., Choi, J. H., Park, S. Y., & Ahn, H. K. (2019). Power Performance of Bifacial c-Si PV Modules with Different Shading Ratios. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(5), 1413–1420. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2928461>
- Chen, C. J. (2011). Physics of Solar Energy. In *Physics of Solar Energy*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118172841.fmatter>
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, Nate. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*.
- Gerra, D. D., & Iakovleva, E. V. (2019). Sun tracking system for photovoltaic batteries in climatic conditions of the Republic of Cuba. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 643(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012155>

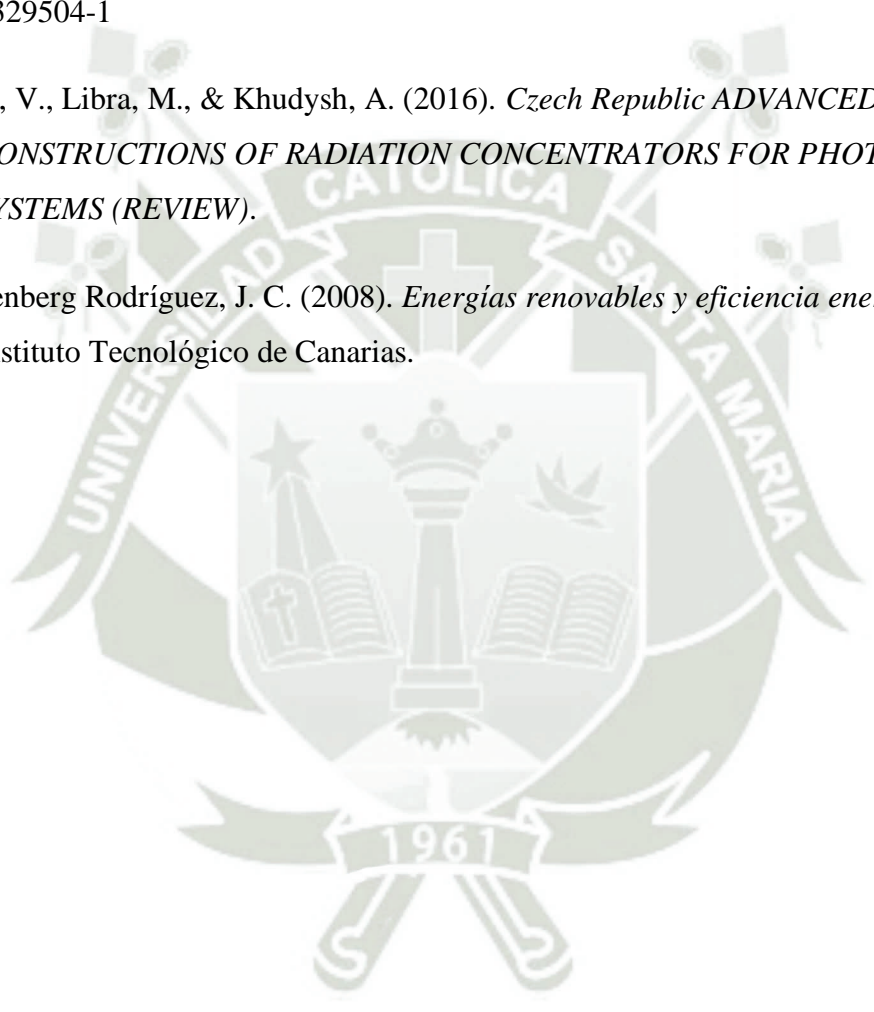
- Hidalgo Osorio, W. A., Vásquez Carrera, P. J., Carrillo Velarde, G. G., & Vásquez Carrera, F. G. (2021). Energías Renovables. In *Energías Renovables*. Ciencia Digital Editorial. <https://doi.org/10.33262/cde.7>
- Jarabo, F., Celestino, F., Dominguez, P., Elortegui, N., José, E., Gonzalez, F., Juan, J., Hernandez, M., Dominguez, M. P., Sanz, M., De, M., Peña, L. A., Toche, A. A., Francisco, P., & Friedrich, J. (n.d.). *El Libro de las Energías Renovable*.
- Kopecek, R., & Libal, J. (2021). Bifacial photovoltaics 2021: Status, opportunities and challenges. In *Energies* (Vol. 14, Issue 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en14082076>
- Kumar, N. M., Chopra, S. S., De Oliveira, A. K. V., Ahmed, H., Vaezi, S., Madukanya, U. E., & Castañón, J. M. (2020). Solar PV module technologies. In *Photovoltaic Solar Energy Conversion: Technologies, Applications and Environmental Impacts* (pp. 51–78). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00003-X>
- Lynn, R. (2010). In Italy, north-south differences in IQ predict differences in income, education, infant mortality, stature, and literacy. *Intelligence*, 38(1), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2009.07.004>
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2010). *Decreto Supremo N° 0064-2010-EM. Aprueban Política Energética Nacional del Perú 2010-2040*. 7. <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/178093-0064-2010-em>
- Mott, R. L. (2004). *Machine elements in mechanical design*. Pearson/Prentice Hall.
- Mouhib, E., Micheli, L., Almonacid, F. M., & Fernández, E. F. (2022). Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics and Aquavoltaics. In *Energies* (Vol. 15, Issue 23). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15238777>
- Paul A.Lynn. (2010). *Electricity from Sunlight* (Wiley, Ed.; 1st edition).
- Pavlovic, A., Fragassa, C., Bertoldi, M., & Mikhnych, V. (2021). Thermal Behavior of Monocrystalline Silicon Solar Cells: A Numerical and Experimental Investigation

on the Module Encapsulation Materials. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 7(3), 1847–1855. <https://doi.org/10.22055/jacm.2021.37852.3101>

Pérez Guadalupe, José L. (2016). Aprueban el Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) correspondiente al período 2016-2025. *El Peruano*, 574047–574048. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/aprueban-el-plan-nacional-de-electrificacion-rural-pner-co-resolucion-ministerial-no-579-2015-memdm-1329504-1>

Poulek, V., Libra, M., & Khudysh, A. (2016). *Czech Republic ADVANCED CONSTRUCTIONS OF RADIATION CONCENTRATORS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS (REVIEW)*.

Schallenberg Rodríguez, J. C. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Instituto Tecnológico de Canarias.



ANEXOS

Anexo A: Programa en el software EES para la relación de la radiación absorbida.

```
"DATOS DE ENTRADA"
n=75 "Numero del día del año"
theta_z=13.97[deg] "Angulo de zenit"
theta=2.418[deg] "Angulo de incidencia"
R_b=cos(theta)/cos(theta_z) "Ecuación 25: Relación de radiación de haz en una superficie
inclinada a ese en superficie horizontal"
beta=16.39[deg]
G_sc=1367[W/m^2]
rho_g=0.2 "Refractancia del suelo"
G_ref=1000[W/m^2] "Radiación de referencia"
"
"ECUACIONES"
G_o=G_sc*(1+0.033*cos(360*n/365))*cos(theta_z) "Radiación extraterrestre"
715.61=G_b*0.9256+G_d*0.854+(G_b+G_d)*0.029
k_T=(G_b+G_d)/G_o "Ecuación 12: Indice de claridad"
G_d/(G_d+G_b)=0.9511-0.1604*k_T+4.388*k_t^2-16.638*k_T^3+12.336*k_T^4 "Ecuación 13"
K=4[m^-1] "Coeficiente de extincion"
L=0.004[m] "Espesor del vidrio"
theta_i=1[deg] "Angulo de incidencia"
theta_r=arcsin(sin(theta_i)/1.526) "Angulo de refracción"
TA_b=exp(-((K*L)/cos(theta_r)))*(1-(1/2)*(((sin(theta_r-
theta_i)^2)/(sin(theta_r+theta_i)^2))+((tan(theta_r-theta_i)^2)/(tan(theta_r+theta_i)^2))))
"Ecuación 10: Producto transmitancia-absorbancia incidente"
TA_n=exp(-((K*L)/1))*(1-(((1.526-1)/(1.526+1)))^2) "Ecuación 10: Producto transmitancia-
absorbancia normal"
K_TAb=TA_b/TA_n "Ecuación 11: Modificador del ángulo de incidencia"
theta_eg=90-0.5788*beta+0.002693*(beta^2)
theta_ed=59.7-0.1388*beta+0.001497*(beta^2)
theta_egr=arcsin(sin(theta_eg)/1.526)
theta_edr=arcsin(sin(theta_ed)/1.526)
TA_g=exp(-((K*L)/cos(theta_egr)))*(1-(1/2)*(((sin(theta_egr-
theta_eg)^2)/(sin(theta_egr+theta_eg)^2))+((tan(theta_egr-
theta_eg)^2)/(tan(theta_egr+theta_eg)^2)))) "Ecuación 10: Producto transmitancia-absorbancia
reflejada del suelo"
TA_d=exp(-((K*L)/cos(theta_edr)))*(1-(1/2)*(((sin(theta_edr-
theta_ed)^2)/(sin(theta_edr+theta_ed)^2))+((tan(theta_edr-
theta_ed)^2)/(tan(theta_edr+theta_ed)^2)))) "Ecuación 10: Producto transmitancia-absorbancia
incidente isotrópica difusa"
K_TAg=TA_g/TA_n "Ecuación 11: Modificador del ángulo de incidencia para la radiación
reflejada del suelo"
K_TAd=TA_d/TA_n "Ecuación 11: Modificador del ángulo de incidencia para la radiación
isotrópica difusa"
AM=1/cos(theta_z) "Masa de aire"
M=0.935823*AM^0+(0.054289*AM^1)+(-0.008677*AM^2)+(0.000527*AM^3)+(-0.000011*AM^4)
"Ecuación 10: Modificador de la masa de aire"
G=G_b+G_d "Radiación total"
S_Sref=M*((G_b/G_ref)*R_b*K_TAb+(G_d/G_ref)*K_TAd*((1+cos(beta))/2)+(G/G_ref)*rho_g*K
_TAg*((1-cos(beta))/2)) "Ecuación 8: Relación entre la radiación absorbida y la radiación en
absorbida en condiciones de referencia"
```

Anexo B: Código usado en Matlab para la curva I-V y P-I.

```
% Constantes y valores iniciales
k = 1.381e-23; % Constante de Boltzmann [J/K]
q = 1.602e-19; % Carga del electrón [C]
Tc_ref = 298.15; % Temperatura de referencia [K]
Gref = 1000; % Radiación de referencia [W/m^2]
Isc_ref = 1.85166; % Corriente de cortocircuito de referencia [A]
Voc_ref = 24.768; % Voltaje de circuito abierto de referencia [V]
Imp_ref = 1.7766; % Corriente en el punto de máxima potencia [A]
Vmp_ref = 21.204; % Voltaje en el punto de máxima potencia [V]
Ns = 36; % Número de celdas en serie
C = 26.77e-5; % Coeficiente de temperatura de la banda prohibida [J/K]
Eg_ref = 1.794e-19; % Energía de banda prohibida de referencia [J]
alpha = 0.005; % Coeficiente de temperatura
Tc = 308.2; % Temperatura operativa [K]

% Valores iniciales estimados
Rsh_ref_guess=100;
aref_guess=1.5*k*Tc_ref*Ns/q;
IL_ref_guess=Isc_ref;
IO_ref_guess=Isc_ref*exp(-Voc_ref/aref_guess);
Rs_ref_guess=(aref_guess*log((IL_ref_guess-Imp_ref)/IO_ref_guess)-
Vmp_ref)/Imp_ref;

F=@(M)[4.5-M(3)+M(4)*(exp(4.5*M(5)/M(2))-1)+4.5*M(5)/M(1); M(3)-
M(4)*(exp(21.4/M(2))-1)-21.4/M(1); 3.95-
M(3)+M(4)*(exp((16.5+3.95*M(5))/M(2))-1)+(16.5+3.95*M(5))/M(1);
3.95*(1+M(4)*M(5)/M(2)*exp((16.5+3.95*M(5))/M(2))+M(5)/M(1))-
16.5*(M(4)/M(2)*exp((16.5+3.95*M(5))/M(2))+1/M(1)); M(3)+0.00026*(339.2-298)-
(M(4)*((339.2/298)^3)*exp(1.79e-19/1.38e-23*(1/298-(1-0.00026*(339.2-
298))/339.2))*exp((-0.085*(339.2-298)+21.4)/(339.2*M(2)/298))-1)-(-
0.085*(339.2-298)+21.4)/M(1)];
M0=[Rsh_ref_guess;aref_guess;IL_ref_guess;IO_ref_guess;Rs_ref_guess];
F=fsolve(F, M0)
```

Anexo C: Programa en el software Matlab-Simulink para el modelado eléctrico

Solución Matlab

Para modelado final del comportamiento eléctrico se pretende analizar el efecto de la temperatura y la radiación solar en nuestro módulo fotovoltaico. se puede apreciar que estas son ecuaciones no lineales para esto se decidió usar el programa Matlab utilizando el comando fsolve(Asghari Faryad et al., s. f.), para resolver este sistema también es necesario hallar valores de referencia para esto 5 parámetros el procedimiento usado fue el detallado por (Duffie et al., 2020)

Implementación de I_o : Este bloque se implementó utilizando la ecuación (68) como se muestra en la figura mostrada a continuación.

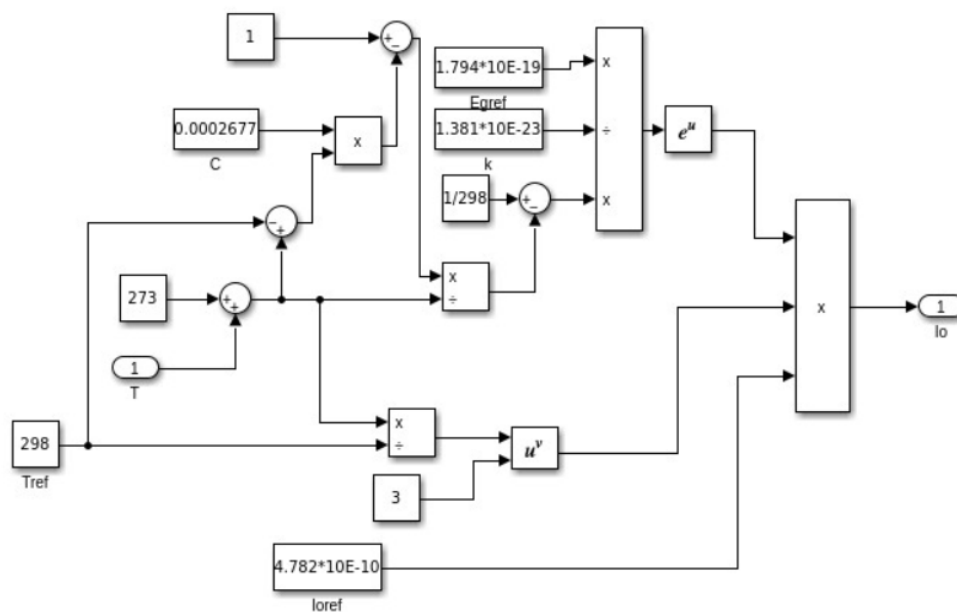


Figura. Modelado en el software Simulink de la ecuación I_o .

Fuente: Elaboración propia

Implementación de I_L : Este bloque se implementó utilizando la ecuación (67) como se muestra en la figura mostrada a continuación.

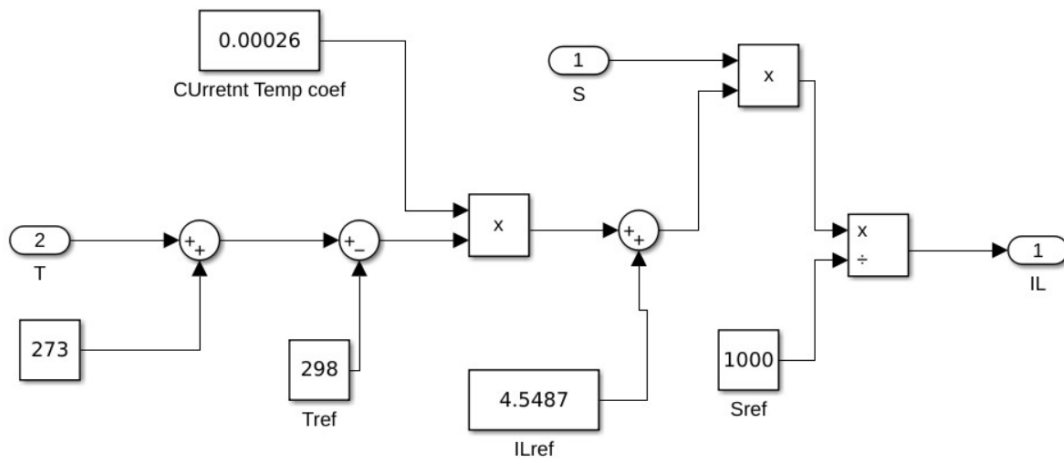


Figura. Modelado en el software Simulink de la ecuación IL .
Fuente: Elaboración propia

Implementación de I: Utilizando las ecuaciones de la (66) a (73) para considerar la variación de R_s y R_{sh} obtenemos el modelo de la figura mostrada a continuación.

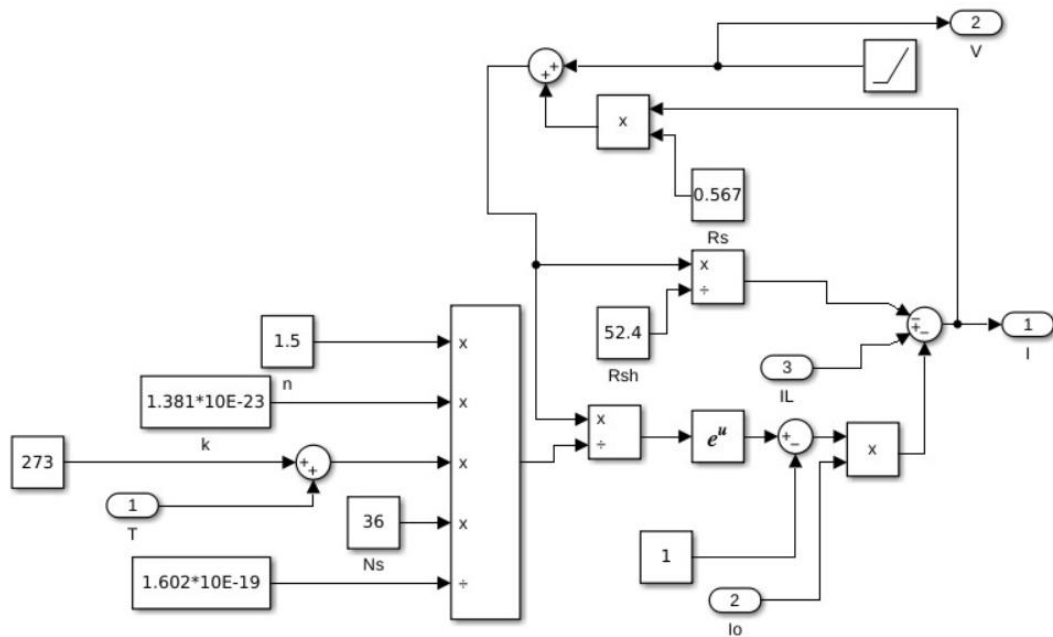


Figura. Modelado en el software Simulink de la ecuación I .
Fuente: Elaboración propia

Bloque final: Agrupamos los bloques anteriores y formamos el bloque la figura mostrada a continuación.

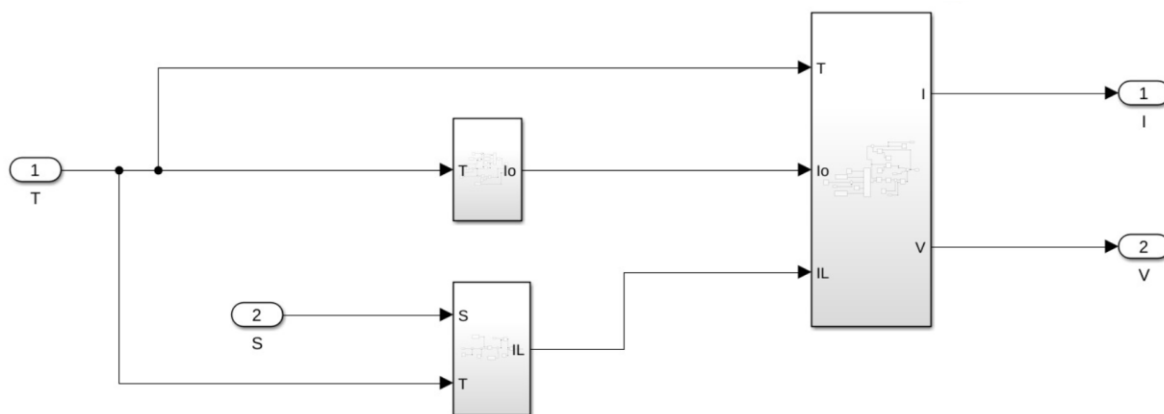


Figura. Modelado en el software Simulink de la ecuación I.
Fuente: Elaboración propia

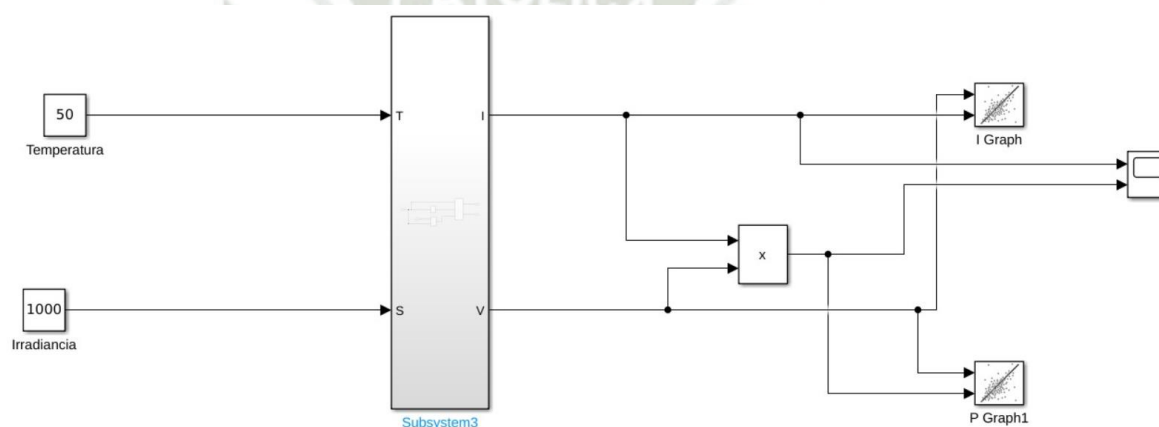


Figura. Modelado en el software Simulink de la ecuación I.
Fuente: Elaboración propia

Simulación del modelo: Simulamos el modelo final mediante la entrada de una señal de rampa (con el voltaje) durante un tiempo específico. Esta señal actúa como una entrada de voltaje para la celda fotovoltaica.

Anexo D: Programa en el software EES para la producción energética

"FUNCIONES"

"las funciones definen relaciones reutilizables, incluyendo cálculos lógicos con IF y ELSE, y deben ir antes de las ecuaciones principales porque el software necesita interpretarlas primero para resolver correctamente los cálculos. Esto organiza el programa y evita errores"

"Función para la ecuación 6"

```
Function funa(K)
If(K>=0) Then
t:=1
Else
t:=-1
Endif
funa=t
End
```

"Ecuación 19: Función para la ecuación 17"

```
Function funa1(K1)
If(K1>=0) Then
t1:=1
Else
t1:=-1
Endif
funa1=t1
End
```

"Ecuación 20: Función para la ecuación 17"

```
Function funa2(K2,K3,K4,K5)
If((arctan((sin(K2)*sin(K3))/(cos(K4)*sin(K5))))*K3>=0) Then
t2:=0
Else
t2:=1
Endif
funa2=t2
End
```

"Ecuación 39: Utilizabilidad"

```
Function funa3(K6,K7,K8)
If(K6>=K7) Then
t3:=0
If(K7=2) Then
t3:=(1-(K6/K7))^2
Endif
Else
t3:=abs((abs(K8))-(((K8^2)+(1+(2*K8))*((1-(K6/K7))^2))^(1/2)))
```

```
Endif
funa3=t3
End
```

"

```
{ Function funa4(K9,K10)
If(K9>K10) Then
t4:=K10
Endif
If(K9<K10) Then
t4:=K9
Endif
funa4=t4
End
delta_fmax=funa4(1-f_o,d_o)}
```

"

```
c_a=funa(w)
```

$c_1 = \text{funa1}(\text{gamma}_s)$
 $c_2 = \text{funa2}(\text{theta}_z, \text{gamma}_s, \text{theta}_a, \text{phi})$
 $\text{phi}_i = \text{funa3}(X_{ci}, X_m, g)$
 "PROGRAMA PRINCIPAL"
 "Datos de entrada"
 $n=75$ "numero del dia del año" {estos cálculos son para una fecha en concreto, este procedimiento fue resuelto para el día 15/03/2024}
 $G_{sc}=1367[\text{W}/\text{m}^2]$ "Constante solar"
 "Datos ubicados en la tabla paramétrica"
 $\{T_{am}=21[^\circ\text{C}]$
 $L_{bar}_i=10[\text{Wh}]$
 $ht=10.5\}$ "
 $pg=0.2$
 $\text{phi}=-16.39[\text{deg}]$ "Latitud de la zona de instalación"
 "Cálculo de angulos"
 $\text{delta}=23.45 \cdot \sin((360 \cdot (284+n)/365))$ "Ecuación 5 :Angulo de declinación solar" "Este ángulo indica la ubicación del sol al medio día, lo calculamos con el número del día de año en el que se realizó este cálculo"
 $w=((ht-12)) \cdot 15[\text{deg}]$ "Ecuación 4 :Angulo de hora" "Representa el desplazamiento angular del sol al este u oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobres su eje a 15° por hora es negativo por las mañanas y positivo por las tardes."
 $\text{theta}_z = \arccos(\cos(\text{phi}) \cdot \cos(\text{delta}) \cdot \cos(w) + \sin(\text{phi}) \cdot \sin(\text{delta}))$ "Ecuación 5: Angulo de zenith" "Representa el ángulo entre la vertical y la línea hacia el sol, es decir el ángulo de incidencia de la radiación del haz sobre una superficie horizontal"
 $\text{gamma}_s = c_a \cdot (\arccos((\cos(\text{theta}_z) \cdot \sin(\text{phi}) - \sin(\text{delta})) / (\sin(\text{theta}_z) \cdot \cos(\text{phi}))))$ "Ecuación 6: Angulo de azimut solar" "Es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección del haz de radiación en el plano horizontal, Los desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos "
 $\text{theta}_a = \arccos(\cos(\text{theta}_z) \cdot \cos(\text{phi}) + \sin(\text{theta}_z) \cdot \sin(\text{phi}) \cdot \cos(\text{gamma}_s))$ "Ecuación 18"
 $\text{gamma} = (\arctan((\sin(\text{theta}_z) \cdot \sin(\text{gamma}_s)) / (\cos(\text{theta}_a) \cdot \sin(\text{phi})))) + (180 \cdot c_1 \cdot c_2)$ "Ecuación 17" "Angulo de azimut de la superficie"
 $\text{beta} = \arctan(\tan(\text{phi}) / \cos(\text{gamma}))$ "Ecuación 16: Pendiente del panel" "Es el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal"
 $\text{theta} = \arccos(\cos(\text{delta}))$ "Ecuación 15: Angulo de incidencia" "Es el ángulo entre la radiación del haz sobre una superficie y la normal a esta superficie."
 $w_s = \arccos(-\tan(\text{phi}) \cdot \tan(\text{delta}))$ "Ecuación 7: Angulo horario de ocaso" "Es el ángulo horario correspondiente al instante en que el sol cruza el horizonte, marcando el inicio o el fin del día solar"
 $H_{bar}_o = ((24 \cdot 3600[\text{s}] \cdot G_{sc}) / (\pi)) \cdot (1 + 0.033 \cdot \cos(360 \cdot n / 365)) \cdot (\cos(\text{phi}) \cdot \cos(\text{delta}) \cdot \sin(w_s) + ((\pi \cdot w_s) / 180) \cdot \sin(\text{phi}) \cdot \sin(\text{delta}))$ "Ecuación 21: Irradiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal para un día: es la cantidad total de energía solar que incide, fuera de la atmósfera terrestre, en una superficie horizontal durante 24 horas."
 $H=162.51$ "Irradianción mensual global obtenido mediante PVGIS"
 $H_{bar} = (H/31) \cdot 3.6 \cdot 10^6$ "Ecuación 22: Irradiación diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal" "Es el promedio de la energía solar diaria recibida sobre una superficie horizontal durante un mes"
 $a=0.409+(0.5016 \cdot \sin(w_s-60))$ "Ecuación 45"
 $b=0.6609-(0.4767 \cdot \sin(w_s-60))$ "Ecuación 46"
 $r_d = (\pi/24) \cdot ((\cos(w) - \cos(w_s)) / (\sin(w_s) - (((\pi \cdot w_s) / 180) \cdot \cos(w_s))))$ "Ecuación 48: Relación entre la radiación difusa por hora y la radiación difusa diaria"
 $r_t = (\pi/24) \cdot ((\cos(w) - \cos(w_s)) / (\sin(w_s) - (((\pi \cdot w_s) / 180) \cdot \cos(w_s)))) \cdot (a + (b \cdot \cos(w)))$ "Ecuación 44: Relación entre la radiación total por hora y la radiación total diaria"
 $K_{bar}_T = H_{bar} / H_{bar}_o$ "Ecuación 23: Índice de claridad promedio mensual" "Este índice representa la fracción de energía solar que llega a la superficie terrestre después de atravesar

la atmósfera, reflejando el efecto de factores como nubosidad, polvo y vapor de agua durante un mes."

$H_{bar_d} = (1.311 - (3.022 * K_{bar_T}) + (3.427 * (K_{bar_T}^2)) - (1.821 * (K_{bar_T}^3))) * H_{bar}$ "Ecuación 24: Radiación difusa diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal" "Este valor refleja la contribución de la radiación dispersa por la atmósfera, excluyendo la radiación directa del sol."

$R_b = \cos(\theta) / \cos(\theta_z)$ "Ecuación 25: Relación de radiación de haz en una superficie inclinada a ese en superficie horizontal"

$I_{bar_T} = ((H_{bar_t} - H_{bar_d} * R_b) + (H_{bar_d} * ((1 + \cos(\beta)) / 2)) + (H_{bar} * pg * r_t * ((1 - \cos(\beta)) / 2)))$ "Ecuación 49: Promedio mensual de radiación horaria incidente en el colector" "Es la cantidad promedio de energía solar que incide por hora sobre la superficie del colector durante un mes."

$\{I_{bar_T} = ((I_{om} / \cos(\theta_z)) * \tau_o_b * \cos(\delta)) * 0.6\}$

$w_2 = (ht + 0.5 - 12) * 15 [deg]$

$w_1 = (ht - 0.5 - 12) * 15 [deg]$

$I_{om} = (12 * 3600 [s] * G_{sc} / (\pi * (1 + (0.033 * \cos((360 * n) / 365)))) * (\cos(\phi) * \cos(\delta) * (\sin(w_2) - \sin(w_1)) + ((\pi * (w_2 - w_1)) / 180) * \sin(\phi) * \sin(\delta))$ "Irradiación solar extraterrestre promedio mensual"

"Constantes necesarias para el cálculo de Zi el cual se usan para calculo de la eficiencia"

$a_1 = (R_b^2) + (pg * (1 - \cos(\beta)) * R_b) + (((pg^2) * ((1 - \cos(\beta))^2)) / 4)$ "Ecuación 32"

$a_2 = (R_b * (1 + \cos(\beta) - (2 * R_b))) + (pg * (1 + \cos(\beta) - (2 * R_b)) * ((1 - \cos(\beta)) / 2))$ "Ecuación 33"

$a_3 = (((1 - \cos(\beta)) / 2) - R_b)^2$ "Ecuación 34"

$b_1 = -0.1551 + (0.9226 * k |_{minus_T})$ "Ecuación 35"

$b_2 = 0.1456 + (0.0544 * \ln(k |_{minus_T}))$ "Ecuación 36"

$b_3 = (0.2769 - (0.318 * k |_{minus_T})) * k |_{minus_T}$ "Ecuación 37"

$Z_i = ((I_{om} / I_{bar_T})^2) * ((a_1 * b_1) + (a_2 * b_2) + (a_3 * b_3))$ "Ecuación 31"

"

"Datos del panel"

$G_{TNOCT} = 800 [W/m^2]$

$T_{NOCT} = 46 [^{\circ}C]$

$T_{aNOCT} = 20 [^{\circ}C]$

$\tau = 1$ "Transmitancia"

$\alpha = 0.9$ "Absorbancia"

$\eta_{mpref} = 0.1619$ "Eficiencia del punto de máxima potencia de la cara frontal"

$\eta_e = 0.9$ "Eficiencia de cualquier equipo de acondicionamiento de energía"

$\mu_{mp} = -0.00043 [1/^{\circ}C]$ "Coeficiente de eficiencia de temperatura del punto de máxima potencia"

$T_{ref} = 25 [^{\circ}C]$ "Temperatura de la celda de referencia"

$N_p = 1$ "Numero de paneles"

$A_c = 0.187 [m^2]$ "Area de la cubierta receptora"

$\eta_{mprefrear} = 0.1115$ "Eficiencia del punto de máxima potencia de la cara posterior"

"

$U_{LNOCT} = (\tau * \alpha * G_{TNOCT}) / (T_{NOCT} - T_{aNOCT})$ "Coeficiente de pérdidas

UI" "Representa la tasa de transferencia de calor por unidad de área y diferencia de temperatura entre el colector solar y el ambiente."

$\eta_{bar_i} = \eta_{mpref} * \eta_e * (1 + ((\mu_{mp} / \eta_{mpref}) * (T_{am} - T_{ref})) + (((\mu_{mp} * (I_{bar_T}^2)) / \eta_{mpref}) * (1 / 3600 [s]) * ((\tau * \alpha) / U_{LNOCT}) * (1 - \eta_{mpref}) * Z_i))$ "Ecuación 29: Eficiencia de matriz promedio mensual para la hora i en la cara frontal"

$\eta_{bar_irear} = \eta_{mprefrear} * \eta_e * (1 + ((\mu_{mp} / \eta_{mprefrear}) * (T_{am} - T_{ref})) + (((\mu_{mp} * (I_{bar_T}^2)) / \eta_{mprefrear}) * (1 / 3600 [s]) * ((\tau * \alpha) / U_{LNOCT}) * (1 - \eta_{mprefrear}) * Z_i))$ "Ecuación 29: Eficiencia de matriz promedio mensual para la hora i en la cara posterior"

$R_h = I_{bar_T} / (H_{bar} * r_t)$

$X_{ci} = (L_{bar_i} * 3600 [s]) / (I_{bar_T} * A_c * (\eta_{bar_i} + \eta_{bar_irear}) * N_p)$ "Ecuación 38: Radiación crítica adimensional" "Es la relación entre la radiación solar incidente necesaria para equilibrar las pérdidas térmicas del colector solar y la radiación solar global disponible en un momento dado."

$E_{bar_i} = (I_{bar_T} * A_c * (\eta_{bar_i} + \eta_{bar_irear}) * N_p) / 3600 [s]$ "Ecuación 29: Energia horaria promedio mensual para la hora i"

```

g=(X_m-1)/(2-X_m) "Ecuación 40"
X_m=1.85+(0.169*(R_h/(k|minus_T^2)))-(0.0696*(cos(beta)/(k|minus_T^2)))-
(0.981*((k|minus_T)/(cos(delta)^2))) "Ecuación 41"
k|minus_T=(r_t/r_d)*K_bar_T "Ecuación 42"
E_bar_exi=E_bar_i*phi_i "Ecuación 50: Generación horaria promedio mensual que excede la
carga para la hora i"
E_bar_Li=E_bar_i-E_bar_exi "Ecuación 51: Energía de la carga para la hora i (Este valor
representa la energía producida por hora)"
"
{Estos calculos deben resolverse luego de la tabla parametrica}
{sumparametric('Cuadro balance','L_bar_i',1,12)=L_bar
sumparametric('Cuadro balance','E_bar_exi',1,12)=E_bar_ex
sumparametric('Cuadro balance','E_bar_Li',1,12)=E_bar_L
B_c=480[Wh]
f_o=E_bar_L/L_bar
eta_b=0.8
d_o=(eta_b*E_bar_ex)/(L_bar)
s=B_c/L_bar
P=1.315-(0.1059*((f_o*L_bar)/(B_c)))-(0.1847/K_bar_T)
delta_fs=(d_o+delta_fmax-(((d_o+delta_fmax)^2)-(4*P*d_o*delta_fmax))^(1/2)))/(2*P)
eta_bar_L=f_o+delta_fs
E_bar_LT=eta_bar_L*L_bar
"

```

Anexo E: Programa en el software EES para el diseño y modelamiento de componentes

"DISEÑO Y MODELAMIENTO DE COMPONENTES"

"Cálculo de la estructura inferior"

"Se determinaron las cargas aplicadas a la estructura inferior sumando los pesos de los distintos elementos"

"Peso del sistema de refracción"

$W_AAluminio=(0.8*2+0.8+0.31*2+0.033*4+0.135*2+0.57*2+0.31*2+0.072*2+0.2*2+0.135*2)[m]*0.42[kg/m];W_Pinox=(0.795*0.625)[m^2]*11.790[kg/m^2];W_Vidrio=0.187[m^2]*10[kg/m^2];W_CALuminio=3.118[m]*0.23[kg/m];W_Pernos=12*0.00393[kg];W_Remaches=25*0.00393[kg];W_Sist_Refleccion=(2*W_Pinox)+W_AAluminio+(2*W_vidrio)+W_CALuminio+W_Pernos+W_Remaches$

"Peso de la reductora"

$W_AAcero=2.5548[m]*1.11[kg/m];W_PAcero=0.2984[m]*0.98[kg/m];W_Engranaje=0.09821[kg];W_Rodamiento=0.012[kg];W_Acople=2700[kg/m^3]*1.197*10^(-5)[m^3];W_Nema=0.28[kg];W_Pernos_1=0.006[kg];W_Eje_inox=0.389[kg/m]*((0.256*2)+0.1+0.069)[m];W_Caja_reductora=W_AAcero+W_PAcero+(W_Engranaje*16)+(30*W_Rodamiento)+(W_Acople*2)+W_Nema+(14*W_Pernos)+W_Eje_inox+0.261[kg]$

"Diagrama de cuerpos libre 1"

"Sumatoria de fuerzas en los apoyos"

$A'_x*\cos(16.4)+A'_y*\sin(16.4)+B'_y*\sin(16.4)=0$ "Sumatoria de fuerzas en X"

$A'_x*\sin(16.4)+A'_y*\cos(16.4)-W_Caja_reductora-$

$W_Sist_Refleccion+B'_y*\cos(16.4)=0$ "Sumatoria de fuerzas en Y"

$(W_Caja_reductora*24)-(W_Sist_Refleccion*512)+(B'_y*\cos(16.4)*966)+(B'_y*\sin(16.4)*150)$

$=0$ "Sumatoria de momento en A"

"Cambio de eje de coordenadas"

$A[1]=(A'_y*\sin(16.4)-$

$A'_x*\cos(16.4))*9.81;A[2]=(A'_y*\cos(16.4)+A'_x*\sin(16.4))*9.81;A[3]=0;B[1]=(B'_y*\sin(16.4))*9.81;B[2]=(B'_y*\cos(16.4))*9.81;B[3]=0$

"Fuerzas del viento"

"Matriz F_W"

$F_WA[1]=1.45[N];F_WA[2]=-4.6[N];F_WA[3]=12.9[N];F_WB[1]=-3.756[N];F_WB[2]=-$

$3.358[N];F_WB[3]=12.72[N]$

"Fuerzas resultantes"

DUPLICATE i=1,3

$F_A[i]=sum(F_WA[i]+A[i],k=1,1)$

end

{F_B=F_WB+B}

DUPLICATE i=1,3

$F_B[i]=sum(F_WB[i]+B[i],k=1,1)$

end

"Momentos en A"

$Da[1]=0.1234[m];Da[2]=-0.092[m];Da[3]=0[m]$

"Sumatoria de fuerza"

$F_AD[2]+F_AF[2]=F_A[2]$

$-F_AD[3]+F_AF[3]=-F_A[3]$

$D1[1]=0.0001$

$D1[2]=43.455/1000$

$D1[3]=-73.675/1000$

$D2[1]=0$

$D2[2]=0$

$D2[3]=-2*73.675$

$F_AF[1]=66.39$

$F_AF[2]=79.286$

$F_AF[3]=F_AF[2]*TAN(56)$

$F_AD[1]+F_AF[1]=135$

$M_A[1]=1.1868;M_A[2]=1.55918;M_A[3]=0.6987$

```

DUPLICATE i=1,3
M'O1[i]=sum(F'AF[i]*D1[i],k=1,1)
end
DUPLICATE i=1,3
M'O2[i]=sum(F'AF[i]*D2[i],k=1,1)
end
DUPLICATE i=1,3
M'O2[i]=sum(M'O1[i]-M'O3[i]-M'AF[i],k=1,1)
end
"Cambio de coordenadas"
F'AF'[1]=-F'AF[1]
F'AF'[2]=-(F'AF[2]*COS(34)+F'AF[3]*SIN(34))
F'AF'[3]=-(F'AF[2]*SIN(34)+F'AF[3]*COS(34))
"CALCULO DEL CENTROIDE Y EL MOMENTO DE INERCIA"
"Centroide"
Area1=1451.61[mm^2]
Area2=-1232.01[mm^2]
X_bar_1=19.05[mm]
Y_bar_1=19.05[mm]
X_bar_2=20.55[mm]
Y_bar_2=20.55[mm]
Area=(Area1+Area2)
X_bar_1A=Area1*X_bar_1
X_bar_2A=Area2*X_bar_2
X_bar=(X_bar_1A+X_bar_2A)/(Area)
"Momento de inercia"
w_ang=38.1
w_ang1=35.1
I_x=((1/12)*(w_ang)*(w_ang)^3+(w_ang)^2*(w_ang/2-X_bar)^2)-
((1/12)*(w_ang1)*(w_ang1)^3+(w_ang1)^2*(w_ang1/2+3-X_bar)^2)*10^(-12)
r[1]=((-19.05-X_bar)/1000)
r[2]=(27/1000)
r[3]=(X_bar/1000)
M[1]=r[2]*F'AF'[3]+(-(r[3]*F'AF'[2]))
M[2]=(-(r[1]*F'AF'[3]))+(r[3]*F'AF'[1])
M[3]=(r[1]*F'AF'[2])-(r[2]*F'AF'[1])
"Esfuerzo permisibles para columna de aluminio"
"Radio de giro de la columna"
r=sqrt(I_x/Area)
L_eq=630
phi=L_eq/r
sigma_perm=(140-0.874*(phi))
"Esfuerzo normal"
M'Z=M[3]+(-F'AF'[1]*0.4784[m])
M'X=-(M[1])-(F'AF'[3]*0.4784[m])
sigma_a=(F'AF'[2]/(Area/1000^2))+(M'Z*(-0.01063[m])/I_x)-(M'X*0.02747[m]/I_x)
sigma_b=(F'AF'[2]/(Area/1000^2))+(M'Z*(-0.01063[m])/I_x)-(M'X*(-0.01063[m])/I_x)
sigma_c=(F'AF'[2]/(Area/1000^2))+(M'Z*(0.02747[m])/I_x)-(M'X*(-0.01063[m])/I_x)
"Esfuerzo cortante puro"
"Cambio de coordenadas"
Vz''=-(F'AF'[1]*cos(45)+F'AF'[3]*cos(45))
Vy''=-(F'AF'[3]*cos(45)-F'AF'[1]*cos(45))
"Calculo del cortante"
a=21/1000
t=3/1000
y=18/1000
tau_1=((6*Vz''*(a-y)*y*cos(45))/(t*a^3))/10^6
"Esfuerzo cortante transversal"
a_1=(Area)/(t*1000)
a_2=a_1/(t*1000)

```

$C_1 = (1/3) * (1 - (0.630/a_2))$
 $T_1 = M[2] - ((V_y') * 15.033/1000)$
 $\tau_{max} = T_1 / (C_1 * (a_1/1000) * (3)^2)$
"Esfuerzo resultante"
 $\sigma_1 = (\sigma_c / (2 * 10^6)) + \sqrt{(\sigma_c / (2 * 10^6))^2 + ((\tau_1 + \tau_{max})^2)}$
 $\sigma_2 = (\sigma_c / (2 * 10^6)) - \sqrt{(\sigma_c / (2 * 10^6))^2 + ((\tau_1 + \tau_{max})^2)}$
 $\sigma_{max} = ((\sigma_1)^2 - ((\sigma_1 * \sigma_2)) + ((\sigma_2)^2)$
"CALCULO DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE EL METODO DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ"
"Datos de entrada"
 $E = 68.9$
 $l_x' = (((1/12) * (w_{ang}) * (w_{ang})^3 + (w_{ang})^2 * (w_{ang}/2 - X_{bar})^2) - ((1/12) * (w_{ang1}) * (w_{ang1})^3 + (w_{ang1})^2 * (w_{ang1}/2 + 3 - X_{bar})^2))$
"Longitudes de elementos"
 $l[1] = 238.25; l[2] = 247; l[3] = 126.5; l[4] = 247; l[5] = 238.25$
"Angulos de colocacion de los elementos"
 $\alpha[1] = 180; \alpha[2] = 315; \alpha[3] = 0[^\circ]; \alpha[4] = 45; \alpha[5] = 180$
" Matriz de rigidez compuesta K"
 $K''[1,1] = (((E * Area) / l[1]) * \cos(\alpha[1])^2 + (((12 * E * l_x') / l[1]^3) * \sin(\alpha[1])^2)) + (((E * Area) / l[2]) * \cos(\alpha[2])^2 + (((12 * E * l_x') / l[2]^3) * \sin(\alpha[2])^2))$
 $K''[1,2] = (\cos(\alpha[1]) * \sin(\alpha[1]) * ((E * Area) / l[1]) - ((12 * E * l_x') / l[1]^3)) + (\cos(\alpha[2]) * \sin(\alpha[2]) * ((E * Area) / l[2]) - ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[1,3] = \sin(\alpha[1]) * ((6 * E * l_x') / l[1]^2) + (-\sin(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2))$
 $K''[2,1] = (\cos(\alpha[1]) * \sin(\alpha[1]) * ((E * Area) / l[1]) - ((12 * E * l_x') / l[1]^3)) + (\cos(\alpha[2]) * \sin(\alpha[2]) * ((E * Area) / l[2]) - ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[2,2] = (\sin(\alpha[1])^2 * ((E * Area) / l[1]) + \cos(\alpha[1])^2 * ((12 * E * l_x') / l[1]^3)) + (\sin(\alpha[2])^2 * ((E * Area) / l[2]) + \cos(\alpha[2])^2 * ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[2,3] = -\cos(\alpha[1]) * ((6 * E * l_x') / l[1]^2) + \cos(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[3,1] = \sin(\alpha[1]) * ((6 * E * l_x') / l[1]^2) + (-\sin(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2))$
 $K''[3,2] = -\cos(\alpha[1]) * ((6 * E * l_x') / l[1]^2) + (\cos(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2))$
 $K''[3,3] = ((4 * E * l_x') / l[1]) + ((4 * E * l_x') / l[2])$
 $K''[1,4] = -(((E * Area) / l[2]) * \cos(\alpha[2])^2 + (((12 * E * l_x') / l[2]^3) * \sin(\alpha[2])^2))$
 $K''[1,5] = -(\cos(\alpha[2]) * \sin(\alpha[2]) * ((E * Area) / l[2]) - ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[1,6] = -\sin(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[2,4] = -(\cos(\alpha[2]) * \sin(\alpha[2]) * ((E * Area) / l[2]) - ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[2,5] = -(\sin(\alpha[2])^2 * ((E * Area) / l[2]) + \cos(\alpha[2])^2 * ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[2,6] = \cos(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[3,4] = \sin(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[3,5] = -\cos(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[3,6] = ((2 * E * l_x') / l[2])$
 $K''[4,1] = -(((E * Area) / l[2]) * \cos(\alpha[2])^2 + (((12 * E * l_x') / l[2]^3) * \sin(\alpha[2])^2))$
 $K''[4,2] = -(\cos(\alpha[2]) * \sin(\alpha[2]) * ((E * Area) / l[2]) - ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[4,3] = \sin(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[5,1] = -(\cos(\alpha[2]) * \sin(\alpha[2]) * ((E * Area) / l[2]) - ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[5,2] = -(\sin(\alpha[2])^2 * ((E * Area) / l[2]) + \cos(\alpha[2])^2 * ((12 * E * l_x') / l[2]^3))$
 $K''[5,3] = -\cos(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[6,1] = -\sin(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[6,2] = \cos(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2)$
 $K''[6,3] = ((2 * E * l_x') / l[2])$
 $K''[4,4] = (((E * Area) / l[2]) * \cos(\alpha[2])^2 + (((12 * E * l_x') / l[2]^3) * \sin(\alpha[2])^2)) + (((E * Area) / l[3]) * \cos(\alpha[3])^2 + (((12 * E * l_x') / l[3]^3) * \sin(\alpha[3])^2))$
 $K''[4,5] = (\cos(\alpha[2]) * \sin(\alpha[2]) * ((E * Area) / l[2]) - ((12 * E * l_x') / l[2]^3)) + (\cos(\alpha[3]) * \sin(\alpha[3]) * ((E * Area) / l[3]) - ((12 * E * l_x') / l[3]^3))$
 $K''[4,6] = \sin(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2) + (-\sin(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x') / l[3]^2))$
 $K''[5,4] = (\cos(\alpha[2]) * \sin(\alpha[2]) * ((E * Area) / l[2]) - ((12 * E * l_x') / l[2]^3)) + (\cos(\alpha[3]) * \sin(\alpha[3]) * ((E * Area) / l[3]) - ((12 * E * l_x') / l[3]^3))$
 $K''[5,5] = (\sin(\alpha[2])^2 * ((E * Area) / l[2]) + \cos(\alpha[2])^2 * ((12 * E * l_x') / l[2]^3)) + (\sin(\alpha[3])^2 * ((E * Area) / l[3]) + \cos(\alpha[3])^2 * ((12 * E * l_x') / l[3]^3))$
 $K''[5,6] = -\cos(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2) + \cos(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x') / l[3]^2)$
 $K''[6,4] = \sin(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2) + (-\sin(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x') / l[3]^2))$
 $K''[6,5] = -\cos(\alpha[2]) * ((6 * E * l_x') / l[2]^2) + (\cos(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x') / l[3]^2))$

$$\begin{aligned}
 K''[6,6] &= ((4 * E * l_x) / l[2]) + ((4 * E * l_x) / l[3]) \\
 K''[4,7] &= -(((E * Area) / l[3]) * \cos(\alpha[3])^2) + (((12 * E * l_x) / l[3]^3) * \sin(\alpha[3])^2) \\
 K''[4,8] &= -(\cos(\alpha[3]) * \sin(\alpha[3]) * (((E * Area) / l[3]) - ((12 * E * l_x) / l[3]^3))) \\
 K''[4,9] &= -\sin(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) \\
 K''[5,7] &= -(\cos(\alpha[3]) * \sin(\alpha[3]) * (((E * Area) / l[3]) - ((12 * E * l_x) / l[3]^3))) \\
 K''[5,8] &= -(\sin(\alpha[3])^2 * ((E * Area) / l[3]) + \cos(\alpha[3])^2 * ((12 * E * l_x) / l[3]^3)) \\
 K''[5,9] &= \cos(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) \\
 K''[6,7] &= \sin(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) \\
 K''[6,8] &= -\cos(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) \\
 K''[6,9] &= ((2 * E * l_x) / l[3]) \\
 K''[7,4] &= -(((E * Area) / l[3]) * \cos(\alpha[3])^2) + (((12 * E * l_x) / l[3]^3) * \sin(\alpha[3])^2) \\
 K''[7,5] &= -(\cos(\alpha[3]) * \sin(\alpha[3]) * (((E * Area) / l[3]) - ((12 * E * l_x) / l[3]^3))) \\
 K''[7,6] &= \sin(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) \\
 K''[8,4] &= -(\cos(\alpha[3]) * \sin(\alpha[3]) * (((E * Area) / l[3]) - ((12 * E * l_x) / l[3]^3))) \\
 K''[8,5] &= -(\sin(\alpha[3])^2 * ((E * Area) / l[3]) + \cos(\alpha[3])^2 * ((12 * E * l_x) / l[3]^3)) \\
 K''[8,6] &= -\cos(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) \\
 K''[9,4] &= -\sin(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) \\
 K''[9,5] &= \cos(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) \\
 K''[9,6] &= ((2 * E * l_x) / l[3]) \\
 K''[7,7] &= (((E * Area) / l[3]) * \cos(\alpha[3])^2) + (((12 * E * l_x) / l[3]^3) * \sin(\alpha[3])^2) + (((E * Area) / l[4]) * \cos(\alpha[4])^2) + (((12 * E * l_x) / l[4]^3) * \sin(\alpha[4])^2) \\
 K''[7,8] &= (\cos(\alpha[3]) * \sin(\alpha[3]) * (((E * Area) / l[3]) - ((12 * E * l_x) / l[3]^3))) + (\cos(\alpha[4]) * \sin(\alpha[4]) * (((E * Area) / l[4]) - ((12 * E * l_x) / l[4]^3))) \\
 K''[7,9] &= \sin(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) + (-\sin(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2)) \\
 K''[8,7] &= (\cos(\alpha[3]) * \sin(\alpha[3]) * (((E * Area) / l[3]) - ((12 * E * l_x) / l[3]^3))) + (\cos(\alpha[4]) * \sin(\alpha[4]) * (((E * Area) / l[4]) - ((12 * E * l_x) / l[4]^3))) \\
 K''[8,8] &= (\sin(\alpha[3])^2 * ((E * Area) / l[3]) + \cos(\alpha[3])^2 * ((12 * E * l_x) / l[3]^3)) + (\sin(\alpha[4])^2 * ((E * Area) / l[4]) + \cos(\alpha[4])^2 * ((12 * E * l_x) / l[4]^3)) \\
 K''[8,9] &= -\cos(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) + \cos(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[9,7] &= \sin(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) + (-\sin(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2)) \\
 K''[9,8] &= -\cos(\alpha[3]) * ((6 * E * l_x) / l[3]^2) + (\cos(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2)) \\
 K''[9,9] &= ((4 * E * l_x) / l[3]) + ((4 * E * l_x) / l[4]) \\
 K''[7,10] &= -(((E * Area) / l[4]) * \cos(\alpha[4])^2) + (((12 * E * l_x) / l[4]^3) * \sin(\alpha[4])^2) \\
 K''[7,11] &= -(\cos(\alpha[4]) * \sin(\alpha[4]) * (((E * Area) / l[4]) - ((12 * E * l_x) / l[4]^3))) \\
 K''[7,12] &= -\sin(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[8,10] &= -(\cos(\alpha[4]) * \sin(\alpha[4]) * (((E * Area) / l[4]) - ((12 * E * l_x) / l[4]^3))) \\
 K''[8,11] &= -(\sin(\alpha[4])^2 * ((E * Area) / l[4]) + \cos(\alpha[4])^2 * ((12 * E * l_x) / l[4]^3)) \\
 K''[8,12] &= \cos(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[9,10] &= \sin(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[9,11] &= -\cos(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[9,12] &= ((2 * E * l_x) / l[4]) \\
 K''[10,7] &= -(((E * Area) / l[4]) * \cos(\alpha[4])^2) + (((12 * E * l_x) / l[4]^3) * \sin(\alpha[4])^2) \\
 K''[10,8] &= -(\cos(\alpha[4]) * \sin(\alpha[4]) * (((E * Area) / l[4]) - ((12 * E * l_x) / l[4]^3))) \\
 K''[10,9] &= \sin(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[11,7] &= -(\cos(\alpha[4]) * \sin(\alpha[4]) * (((E * Area) / l[4]) - ((12 * E * l_x) / l[4]^3))) \\
 K''[11,8] &= -(\sin(\alpha[4])^2 * ((E * Area) / l[4]) + \cos(\alpha[4])^2 * ((12 * E * l_x) / l[4]^3)) \\
 K''[11,9] &= -\cos(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[12,7] &= -\sin(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[12,8] &= \cos(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) \\
 K''[12,9] &= ((2 * E * l_x) / l[4]) \\
 K''[10,10] &= (((E * Area) / l[4]) * \cos(\alpha[4])^2) + (((12 * E * l_x) / l[4]^3) * \sin(\alpha[4])^2) + (((E * Area) / l[5]) * \cos(\alpha[5])^2) + (((12 * E * l_x) / l[5]^3) * \sin(\alpha[5])^2) \\
 K''[10,11] &= (\cos(\alpha[4]) * \sin(\alpha[4]) * (((E * Area) / l[4]) - ((12 * E * l_x) / l[4]^3))) + (\cos(\alpha[5]) * \sin(\alpha[5]) * (((E * Area) / l[5]) - ((12 * E * l_x) / l[5]^3))) \\
 K''[10,12] &= \sin(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) + (-\sin(\alpha[5]) * ((6 * E * l_x) / l[5]^2)) \\
 K''[11,10] &= (\cos(\alpha[4]) * \sin(\alpha[4]) * (((E * Area) / l[4]) - ((12 * E * l_x) / l[4]^3))) + (\cos(\alpha[5]) * \sin(\alpha[5]) * (((E * Area) / l[5]) - ((12 * E * l_x) / l[5]^3))) \\
 K''[11,11] &= (\sin(\alpha[4])^2 * ((E * Area) / l[4]) + \cos(\alpha[4])^2 * ((12 * E * l_x) / l[4]^3)) + (\sin(\alpha[5])^2 * ((E * Area) / l[5]) + \cos(\alpha[5])^2 * ((12 * E * l_x) / l[5]^3)) \\
 K''[11,12] &= -\cos(\alpha[4]) * ((6 * E * l_x) / l[4]^2) + \cos(\alpha[5]) * ((6 * E * l_x) / l[5]^2)
 \end{aligned}$$

```

K''[12,10]=sin(alpha[4])*((6*E*_x')/[4]^2)+(-sin(alpha[5])*((6*E*_x')/[5]^2))
K''[12,11]=-cos(alpha[4])*((6*E*_x')/[4]^2)+(cos(alpha[5])*((6*E*_x')/[5]^2))
K''[12,12]=((4*E*_x')/[4])+(4*E*_x')/[5]
K''[7,1]=0;K''[8,1]=0;K''[9,1]=0;K''[10,1]=0;K''[11,1]=0;K''[12,1]=0;K''[7,2]=0;K''[8,2]=0;K''[9,2]
=0;K''[10,2]=0;K''[11,2]=0;K''[12,2]=0;K''[7,3]=0;K''[8,3]=0;K''[9,3]=0;K''[10,3]=0;K''[11,3]=0;K''
[12,3]=0;K''[10,4]=0;K''[11,4]=0;K''[12,4]=0;K''[10,5]=0;K''[11,5]=0;K''[12,5]=0;K''[10,6]=0;K''[11
,6]=0;K''[12,6]=0
K''[1,12]=0;K''[2,12]=0;K''[3,12]=0;K''[4,12]=0;K''[5,12]=0;K''[6,12]=0;K''[1,11]=0;K''[2,11]=0;K''
[3,11]=0;K''[4,11]=0;K''[5,11]=0;K''[6,11]=0;K''[1,10]=0;K''[2,10]=0;K''[3,10]=0;K''[4,10]=0;K''[5
,10]=0;K''[6,10]=0;K''[1,9]=0;K''[2,9]=0;K''[3,9]=0;K''[1,8]=0;K''[2,8]=0;K''[3,8]=0;K''[1,7]=0;K''[
2,7]=0;K''[3,7]=0
f''[1]=9.143*10^(-3);f''[2]=9.413*10^(-3);f''[3]=0.5323*10^(-3);f''[4]=40.238*10^(-
3);f''[5]=38.8279*10^(-3);f''[6]=0.1096*10^(-3);f''[7]=-51.306*10^(-3);f''[8]=30.8675*10^(-
3);f''[9]=0.3535*10^(-3);f''[10]=-17.099*10^(-3);f''[11]=17.099*10^(-3);f''[12]=-0.9954*10^(-3);

```

"Calculo de las deformaciones"

DUPLICATE i=1,12

f''[i]=sum(K''[i,k]*mu[k],k=1,12)

end

"Matriz T"

```

T12'[1,1]=cos(alpha[1]);T12'[1,2]=-
sin(alpha[1]);T12'[1,3]=0;T12'[2,1]=sin(alpha[1]);T12'[2,2]=cos(alpha[1]);T12'[2,3]=0;T12'[3,1]=0;T1
2'[3,2]=0;T12'[3,3]=1
T23'[1,1]=cos(alpha[2]);T23'[1,2]=-
sin(alpha[2]);T23'[1,3]=0;T23'[2,1]=sin(alpha[2]);T23'[2,2]=cos(alpha[2]);T23'[2,3]=0;T23'[3,1]=0;T2
3'[3,2]=0;T23'[3,3]=1
T34'[1,1]=cos(alpha[3]);T34'[1,2]=-
sin(alpha[3]);T34'[1,3]=0;T34'[2,1]=sin(alpha[3]);T34'[2,2]=cos(alpha[3]);T34'[2,3]=0;T34'[3,1]=0;T3
4'[3,2]=0;T34'[3,3]=1;
T45'[1,1]=cos(alpha[4]);T45'[1,2]=-
sin(alpha[4]);T45'[1,3]=0;T45'[2,1]=sin(alpha[4]);T45'[2,2]=cos(alpha[4]);T45'[2,3]=0;T45'[3,1]=0;T4
5'[3,2]=0;T45'[3,3]=1
T51'[1,1]=cos(alpha[5]);T51'[1,2]=-
sin(alpha[5]);T51'[1,3]=0;T51'[2,1]=sin(alpha[5]);T51'[2,2]=cos(alpha[5]);T51'[2,3]=0;T51'[3,1]=0;T5
1'[3,2]=0;T51'[3,3]=1

```

"Matriz k para el calculo de las fuerzas internas"

```

K11'[1,1]=((E*Area)/[1]);K11'[1,2]=0;K11'[1,3]=0;K11'[2,1]=0;K11'[2,2]=((12*E*_x')/[1]^3);K11'[
2,3]=((6*E*_x')/[1]^2);K11'[3,1]=0;K11'[3,2]=((6*E*_x')/[1]^2);K11'[3,3]=((4*E*_x')/[1]);
K12'[1,1]=-(E*Area)/[1];K12'[1,2]=0;K12'[1,3]=0;K12'[2,1]=0;K12'[2,2]=-
((12*E*_x')/[1]^3);K12'[2,3]=((6*E*_x')/[1]^2);K12'[3,1]=0;K12'[3,2]=-
((6*E*_x')/[1]^2);K12'[3,3]=((4*E*_x')/[1]);
K21'[1,1]=-(E*Area)/[1];K21'[1,2]=0;K21'[1,3]=0;K21'[2,1]=0;K21'[2,2]=-
((12*E*_x')/[1]^3);K21'[2,3]=-
((6*E*_x')/[1]^2);K21'[3,1]=0;K21'[3,2]=((6*E*_x')/[1]^2);K21'[3,3]=((4*E*_x')/[1]);
K22'[1,1]=((E*Area)/[1]);K22'[1,2]=0;K22'[1,3]=0;K22'[2,1]=0;K22'[2,2]=((12*E*_x')/[1]^3);K22'[
2,3]=-(6*E*_x')/[1]^2;K22'[3,1]=0;K22'[3,2]=-(6*E*_x')/[1]^2;K22'[3,3]=((4*E*_x')/[1]);
K11a'[1,1]=((E*Area)/[2]);K11a'[1,2]=0;K11a'[1,3]=0;K11a'[2,1]=0;K11a'[2,2]=((12*E*_x')/[2]^3);
K11a'[2,3]=((6*E*_x')/[2]^2);K11a'[3,1]=0;K11a'[3,2]=((6*E*_x')/[2]^2);K11a'[3,3]=((4*E*_x')/[
2]);
K12a'[1,1]=-(E*Area)/[2];K12a'[1,2]=0;K12a'[1,3]=0;K12a'[2,1]=0;K12a'[2,2]=-
((12*E*_x')/[2]^3);K12a'[2,3]=((6*E*_x')/[2]^2);K12a'[3,1]=0;K12a'[3,2]=-
((6*E*_x')/[2]^2);K12a'[3,3]=((4*E*_x')/[2]);
K21a'[1,1]=-(E*Area)/[2];K21a'[1,2]=0;K21a'[1,3]=0;K21a'[2,1]=0;K21a'[2,2]=-
((12*E*_x')/[2]^3);K21a'[2,3]=-
((6*E*_x')/[2]^2);K21a'[3,1]=0;K21a'[3,2]=((6*E*_x')/[2]^2);K21a'[3,3]=((4*E*_x')/[2]);
K22a'[1,1]=((E*Area)/[2]);K22a'[1,2]=0;K22a'[1,3]=0;K22a'[2,1]=0;K22a'[2,2]=((12*E*_x')/[2]^3);
K22a'[2,3]=-(6*E*_x')/[2]^2;K22a'[3,1]=0;K22a'[3,2]=-
((6*E*_x')/[2]^2);K22a'[3,3]=((4*E*_x')/[2]);
K11b'[1,1]=((E*Area)/[3]);K11b'[1,2]=0;K11b'[1,3]=0;K11b'[2,1]=0;K11b'[2,2]=((12*E*_x')/[3]^3);
K11b'[2,3]=((6*E*_x')/[3]^2);K11b'[3,1]=0;K11b'[3,2]=((6*E*_x')/[3]^2);K11b'[3,3]=((4*E*_x')/[
3]);

```

```

K12b´[1,1]=-(E*Area)/l[3];K12b´[1,2]=0;K12b´[1,3]=0;K12b´[2,1]=0;K12b´[2,2]=
((12*E*I_x´)/l[3]^3);K12b´[2,3]=((6*E*I_x´)/l[3]^2);K12b´[3,1]=0;K12b´[3,2]=
((6*E*I_x´)/l[3]^2);K12b´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[3]);
K21b´[1,1]=-(E*Area)/l[3];K21b´[1,2]=0;K21b´[1,3]=0;K21b´[2,1]=0;K21b´[2,2]=
((12*E*I_x´)/l[3]^3);K21b´[2,3]=
((6*E*I_x´)/l[3]^2);K21b´[3,1]=0;K21b´[3,2]=((6*E*I_x´)/l[3]^2);K21b´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[3]);
K22b´[1,1]=((E*Area)/l[3]);K22b´[1,2]=0;K22b´[1,3]=0;K22b´[2,1]=0;K22b´[2,2]=((12*E*I_x´)/l[3]^3);
K22b´[2,3]=-(6*E*I_x´)/l[3]^2);K22b´[3,1]=0;K22b´[3,2]=
((6*E*I_x´)/l[3]^2);K22b´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[3]);
K11c´[1,1]=((E*Area)/l[4]);K11c´[1,2]=0;K11c´[1,3]=0;K11c´[2,1]=0;K11c´[2,2]=((12*E*I_x´)/l[4]^3);
K11c´[2,3]=((6*E*I_x´)/l[4]^2);K11c´[3,1]=0;K11c´[3,2]=((6*E*I_x´)/l[4]^2);K11c´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[
4]);
K12c´[1,1]=-(E*Area)/l[4];K12c´[1,2]=0;K12c´[1,3]=0;K12c´[2,1]=0;K12c´[2,2]=
((12*E*I_x´)/l[4]^3);K12c´[2,3]=((6*E*I_x´)/l[4]^2);K12c´[3,1]=0;K12c´[3,2]=
((6*E*I_x´)/l[4]^2);K12c´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[4]);
K21c´[1,1]=-(E*Area)/l[4];K21c´[1,2]=0;K21c´[1,3]=0;K21c´[2,1]=0;K21c´[2,2]=
((12*E*I_x´)/l[4]^3);K21c´[2,3]=
((6*E*I_x´)/l[4]^2);K21c´[3,1]=0;K21c´[3,2]=((6*E*I_x´)/l[4]^2);K21c´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[4]);
K22c´[1,1]=((E*Area)/l[4]);K22c´[1,2]=0;K22c´[1,3]=0;K22c´[2,1]=0;K22c´[2,2]=((12*E*I_x´)/l[4]^3);
K22c´[2,3]=-(6*E*I_x´)/l[4]^2);K22c´[3,1]=0;K22c´[3,2]=
((6*E*I_x´)/l[4]^2);K22c´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[4]);
K11d´[1,1]=((E*Area)/l[5]);K11d´[1,2]=0;K11d´[1,3]=0;K11d´[2,1]=0;K11d´[2,2]=((12*E*I_x´)/l[5]^3);
K11d´[2,3]=((6*E*I_x´)/l[5]^2);K11d´[3,1]=0;K11d´[3,2]=((6*E*I_x´)/l[5]^2);K11d´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[
5]);
K12d´[1,1]=-(E*Area)/l[5];K12d´[1,2]=0;K12d´[1,3]=0;K12d´[2,1]=0;K12d´[2,2]=
((12*E*I_x´)/l[5]^3);K12d´[2,3]=((6*E*I_x´)/l[5]^2);K12d´[3,1]=0;K12d´[3,2]=
((6*E*I_x´)/l[5]^2);K12d´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[5]);
K21d´[1,1]=-(E*Area)/l[5];K21d´[1,2]=0;K21d´[1,3]=0;K21d´[2,1]=0;K21d´[2,2]=
((12*E*I_x´)/l[5]^3);K21d´[2,3]=
((6*E*I_x´)/l[5]^2);K21d´[3,1]=0;K21d´[3,2]=((6*E*I_x´)/l[5]^2);K21d´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[5]);
K22d´[1,1]=((E*Area)/l[5]);K22d´[1,2]=0;K22d´[1,3]=0;K22d´[2,1]=0;K22d´[2,2]=((12*E*I_x´)/l[5]^3);
K22d´[2,3]=-(6*E*I_x´)/l[5]^2);K22d´[3,1]=0;K22d´[3,2]=
((6*E*I_x´)/l[5]^2);K22d´[3,3]=((4*E*I_x´)/l[5]);
{DUPLICATE i=1,3
mu_a[k]*K11´[i,k]=sum(T12´[i,k]*f´[i],k=1,3)
end}
{F12}
da1´[1]=0;da1´[2]=0;da1´[3]=0;db1´[1]=mu[1];db1´[2]=mu[2];db1´[3]=mu[3];
DUPLICATE i=1,3
da1´[i]=sum(T12´[i,k]*fa1´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa1´[i]=sum(fa1´[k]*K11´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
db1´[i]=sum(T12´[i,k]*fa2´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa2´[i]=sum(fa2´[k]*K12´[i,k],k=1,3)
end
f12´[1]=(fa1´[1]+fa2´[1])*1000;f12´[2]=(fa1´[2]+fa2´[2])*1000;f12´[3]=fa1´[3]+fa2´[3]

da2´[1]=0;da2´[2]=0;da2´[3]=0;db2´[1]=mu[1];db2´[2]=mu[2];db2´[3]=mu[3]
DUPLICATE i=1,3
da2´[i]=sum(T12´[i,k]*fa2a´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa2a´[i]=sum(fa2a´[k]*K21´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3

```

```

db2´[i]=sum(T12´[i,k]*fa3´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa3´[i]=sum(fa3´[k]*K22´[i,k],k=1,3)
end
f12´[4]=(fa2a´[1]+fa3´[1])*1000;f12´[5]=(fa2a´[2]+fa3´[2])*1000;f12´[6]=fa2a´[3]+fa3´[3]
{F23}
da3´[1]=mu[1];da3´[2]=mu[2];da3´[3]=mu[3];db3´[1]=mu[4];db3´[2]=mu[5];db3´[3]=mu[6]
DUPLICATE i=1,3
da3´[i]=sum(T23´[i,k]*fa3a´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa3a´[i]=sum(fa3a´[k]*K11a´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
db3´[i]=sum(T23´[i,k]*fa4´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa4´[i]=sum(fa4´[k]*K12a´[i,k],k=1,3)
end
f23´[1]=(fa3a´[1]+fa4´[1])*1000;f23´[2]=(fa3a´[2]+fa4´[2])*1000;f23´[3]=fa3a´[3]+fa4´[3]

da4´[1]=mu[1];da4´[2]=mu[2];da4´[3]=mu[3];db4´[1]=mu[4];db4´[2]=mu[5];db4´[3]=mu[6]
DUPLICATE i=1,3
da4´[i]=sum(T23´[i,k]*fa4a´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa4a´[i]=sum(fa4a´[k]*K21a´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
db4´[i]=sum(T23´[i,k]*fa5´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa5´[i]=sum(fa5´[k]*K22a´[i,k],k=1,3)
end
f23´[4]=(fa4a´[1]+fa5´[1])*1000;f23´[5]=(fa4a´[2]+fa5´[2])*1000;f23´[6]=fa4a´[3]+fa5´[3]
{F34}
da5´[1]=mu[4];da5´[2]=mu[5];da5´[3]=mu[6];db5´[1]=mu[7];db5´[2]=mu[8];db5´[3]=mu[9]
DUPLICATE i=1,3
da5´[i]=sum(T34´[i,k]*fa5a´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa5a´[i]=sum(fa5a´[k]*K11b´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
db5´[i]=sum(T34´[i,k]*fa6´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa6´[i]=sum(fa6´[k]*K12b´[i,k],k=1,3)
end
f34´[1]=(fa5a´[1]+fa6´[1])*1000;f34´[2]=(fa5a´[2]+fa6´[2])*1000;f34´[3]=fa5a´[3]+fa6´[3];

da6´[1]=mu[4];da6´[2]=mu[5];da6´[3]=mu[6];db6´[1]=mu[7];db6´[2]=mu[8];db6´[3]=mu[9];
DUPLICATE i=1,3
da6´[i]=sum(T34´[i,k]*fa6a´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa6a´[i]=sum(fa6a´[k]*K21b´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3

```

```

db6´[i]=sum(T34´[i,k]*fa7´´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa7´[i]=sum(fa7´´[k]*K22b´[i,k],k=1,3)
end
f34´[4]=(fa6a´[1]+fa7´[1])*1000;f34´[5]=(fa6a´[2]+fa7´[2])*1000;f34´[6]=fa6a´[3]+fa7´[3]
{F45}
da7´[1]=mu[7];da7´[2]=mu[8];da7´[3]=mu[9];db7´[1]=mu[10];db7´[2]=mu[11];db7´[3]=mu[12]
DUPLICATE i=1,3
da7´[i]=sum(T45´[i,k]*fa7a´´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa7a´´[i]=sum(fa7a´´[k]*K11c´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
db7´[i]=sum(T45´[i,k]*fa8´´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa8´[i]=sum(fa8´´[k]*K12c´[i,k],k=1,3)
end
f45´[1]=(fa7a´[1]+fa8´[1])*1000;f45´[2]=(fa7a´[2]+fa8´[2])*1000;f45´[3]=fa7a´[3]+fa8´[3]

da8´[1]=mu[7];da8´[2]=mu[8];da8´[3]=mu[9];db8´[1]=mu[10];db8´[2]=mu[11];db8´[3]=mu[12]
DUPLICATE i=1,3
da8´[i]=sum(T45´[i,k]*fa8a´´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa8a´´[i]=sum(fa8a´´[k]*K21c´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
db8´[i]=sum(T45´[i,k]*fa9´´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa9´[i]=sum(fa9´´[k]*K22c´[i,k],k=1,3)
end
f45´[4]=(fa8a´[1]+fa9´[1])*1000;f45´[5]=(fa8a´[2]+fa9´[2])*1000;f45´[6]=fa8a´[3]+fa9´[3]
{F51}
da9´[1]=mu[10];da9´[2]=mu[11];da9´[3]=mu[12];db9´[1]=0;db9´[2]=0;db9´[3]=0
DUPLICATE i=1,3
da9´[i]=sum(T51´[i,k]*fa9a´´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa9a´´[i]=sum(fa9a´´[k]*K11d´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
db9´[i]=sum(T51´[i,k]*fa10´´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa10´[i]=sum(fa10´´[k]*K12d´[i,k],k=1,3)
end
f51´[1]=(fa9a´[1]+fa10´[1])*1000;f51´[2]=(fa9a´[2]+fa10´[2])*1000;f51´[3]=fa9a´[3]+fa10´[3]

da10´[1]=mu[10];da10´[2]=mu[11];da10´[3]=mu[12];db10´[1]=0;db10´[2]=0;db10´[3]=0
DUPLICATE i=1,3
da10´[i]=sum(T51´[i,k]*fa10a´´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa10a´´[i]=sum(fa10a´´[k]*K21d´[i,k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3

```

```

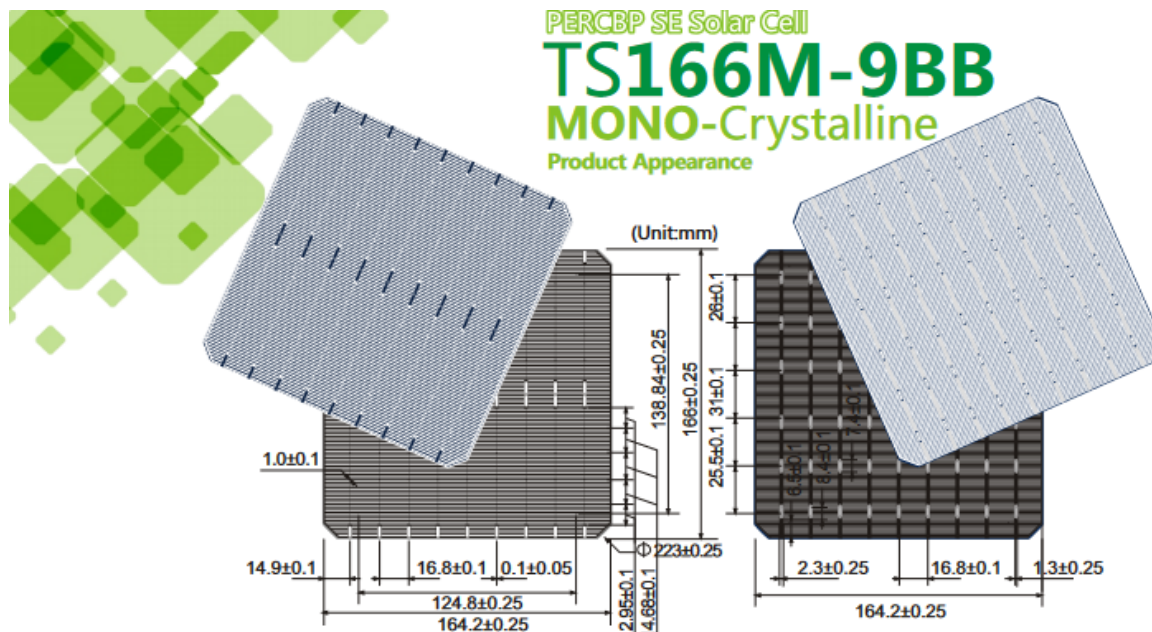
db10´[i]=sum(T51´[i,k]*fa11´[k],k=1,3)
end
DUPLICATE i=1,3
fa11´[i]=sum(fa11´[k]*K22d´[i,k],k=1,3)
end
f51´[4]=(fa10a´[1]+fa11´[1])*1000;f51´[5]=(fa10a´[2]+fa11´[2])*1000;f51´[6]=fa10a´[3]+fa11´[3]
"Calculo de pernos"
F_pernos=sqrt(F´AF´[1]^2+F´AF´[2]^2)
n_pernos=2
F_porperno=F_pernos/n_pernos
a_pernos=F_porperno/120
d=sqrt((4*a_pernos)/pi)
"CALCULO CAJA REDUCTORA"
n=0.000694444[RPM]
n_o=60[RPM]
T_o=63000*P/n
TV_o=VR^X_0
TV_o=n_o/n
VR=1.952
W_t=T_o/(D_P/2)
Theta=30
W_r=W_t*tan(theta)
W=((W_t^2)+(W_r^2))^(1/2)
"Cálculo del paso diametral"
m=2;m=(1/P_d)*25.4
"Calculo numero de dientes de los engranajes"
Nd_P=25
VR=Nd_G/Nd_P
D_G=Nd_G/P_d
D_P=Nd_P/P_d
"Calculo de la fuerza reuslante en los engranajes"
T_o=26.55[lb*pulg]
Y_lewis=0.521
SF=1.5
S_ut=3000[Ksi]
F_cara=(W_t*P_d*SF)/(S_ut*Y_lewis)
"CALCULO DE FUERZAS PRODUCIDAS POR LOS ENGRANAJES"
"Dinamica engranajes"
"Tabla Parametrica"
{P=2.927E-07 [HP]
T_o=63000*P/n_o
n=0.000694444[RPM]
TV_o=VR^X_0
TV_o=n_o/n
VR=1.952
W_t=T_o/(D/2)
Theta=30
W_r=W_t*tan(theta)
W=((W_t^2)+(W_r^2))^(1/2)
L=((263/2)-(6.5+5.5))-((22+6.5)*z)
L1=((263/2)-(6.5+5.5))-((22+6.5)*z)-11
T_o1=63000*P/n_o
W_t1=T_o1/(D1/2)
W_r1=W_t1*tan(theta)
W1=((W_t1^2)+(W_r1^2))^(1/2)
(2*T_o*0.112985)-(0.027*2*F_x)=(0.0010565*0.048*2*1.952*F_x)/(0.0010565)}
"Engranaje inicial"
"Ecuacion apartir del diagrama de cuerpo libre"
R_1yi+R_2yi+W_T1i*cos(60)=W_T2i+W_R1i*sin(60)+W_E
W_R1i*cos(60)+W_R2i+W_T1i*sin(60)=R_1zi+R_2zi

```

$-0.011*(W_T1*\sin(60)+W_R1*\cos(60))+0.011*R_1z=0$
 $0.011*(W_T1*\cos(60)-W_R1*\sin(60))+0.011*R_1y-0.009*W_E=0$
 $W_E=0.099$
 $W_R1=0.0008071$
 $W_R2=0.00158209$
 $W_T2=0.004952$
 $W_T1=0.002537$
"Engranaje final"
"Ecuacion apartir del diagrama de cuerpo libre"
 $R_1y+R_2y+W_T1=W_R2*\sin(60)+W_T2*\cos(60)+W_E$
 $W_R1+W_R2*\cos(60)=R_1z+R_2z+W_T2*\sin(60)$
 $-0.011*W_R1+0.011*R_1z=0$
 $0.011*W_T1+0.011*R_1y-0.009*W_E=0$
 $W_R1=9.41314091$
 $W_R2=18.451718$
 $W_T2=57.74$
 $W_T1=29.58$



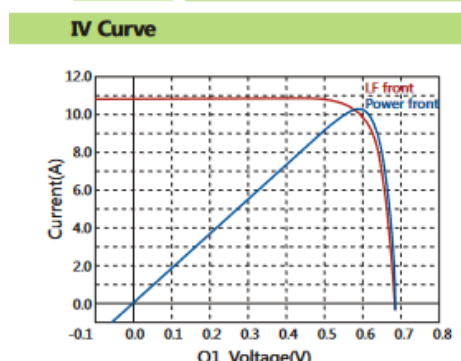
Anexo F: Datos de la celda fotovoltaica.



Technical Data and Design	
Dimension	166mm × 166mm ± 0.25mm
Thickness	190 ± 30 μm
Front	9 busbars(silver), width 0.1 ± 0.03mm, 124 finger grids, Blue anti-reflecting coating(silicon nitride)
Back(+)	width of back electrode(silver) 1.3 ± 0.25mm, finger grids(aluminum), dotted laser design

TkVoltage	: -0.36 %/K
TkCurrent	: +0.07%/K
TkPower	: -0.38%/K
Rsh	≥ 35Ω , Irev2 ≤ 0.8A

Electrical Performance Parameters						
Efficiency (%)	Pmpp (W)	Vmpp (V)	Imp (A)	Voc (V)	Isc (A)	FF (%)
22.9	6.28	0.5933	10.582	0.6874	11.113	82.18
22.8	6.25	0.5916	10.566	0.6859	11.100	82.10
22.7	6.22	0.5905	10.540	0.6837	11.105	81.97
22.6	6.20	0.5887	10.525	0.6822	11.090	81.89
22.5	6.17	0.5873	10.503	0.6811	11.082	81.73
22.4	6.14	0.5856	10.486	0.6807	11.075	81.46
22.3	6.11	0.5835	10.477	0.6790	11.060	81.41
22.2	6.09	0.5817	10.462	0.6780	11.046	81.26
22.1	6.06	0.5799	10.448	0.6777	11.039	80.98
22.0	6.03	0.5781	10.433	0.6774	11.021	80.81
21.9	6.00	0.5760	10.424	0.6748	11.014	80.79
21.8	5.98	0.5742	10.409	0.6743	10.996	80.60
21.7	5.95	0.5720	10.401	0.6729	10.990	80.45
21.6	5.92	0.5701	10.386	0.6719	10.974	80.30
21.5	5.89	0.5684	10.371	0.6713	10.958	80.12



Light Intensity Dependence		
Intensity(W/m2)	Voc	Isc
1000	1.000	1.000
900	0.996	0.903
800	0.991	0.803
600	0.988	0.602
400	0.962	0.403

Take the Voc (Isc) at 1000W/m² as the standard, test the range of Voc (Isc) decrease with light intensity.

Solder Ability	
Peel strength Minimum	≥ 1.4N/mm
Results may be different due to different ribbons, soldering methods and parameters.	

STC (Standard Testing Conditions) : 1000W/m², AM1.5, 25°C
 Technical parameters above-mentioned subjects to technical changes and tests. GREEN POWER reserves the right of final interpretation.

Back Electrical Performance Parameters						
Efficiency (%)	Pmpp (W)	Vmpp (V)	Imp (A)	Voc (V)	Isc (A)	FF (%)
>16	4.44	0.5884	7.549	0.6788	8.019	\
15.5-16	4.30	0.5782	7.492	0.6688	7.940	\
15-15.5	4.17	0.5721	7.335	0.6650	7.735	\
<15	4.06	0.5657	7.173	0.6592	7.554	\

Anexo G: Adquisición de datos.

Día 11/03/2024

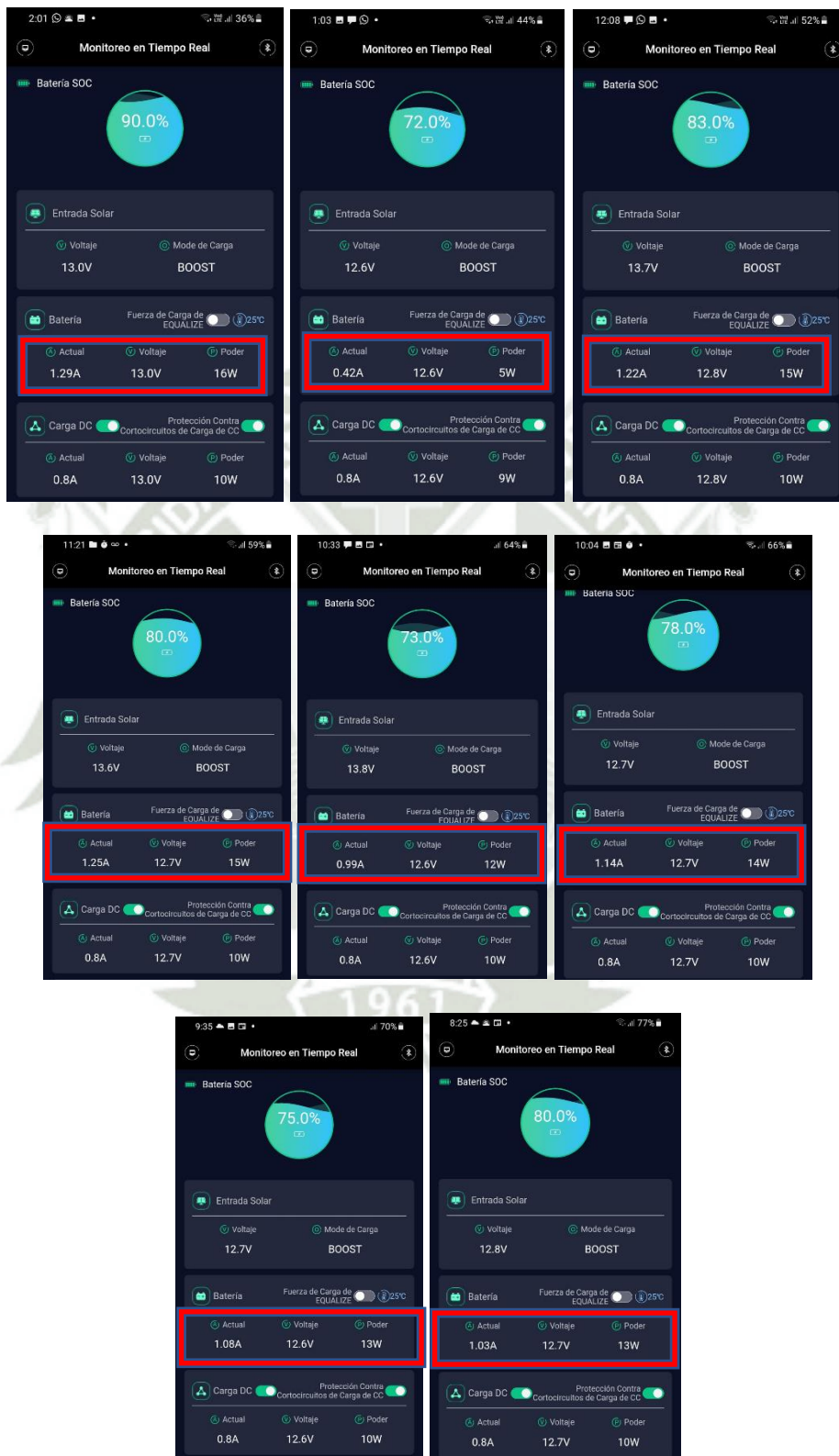
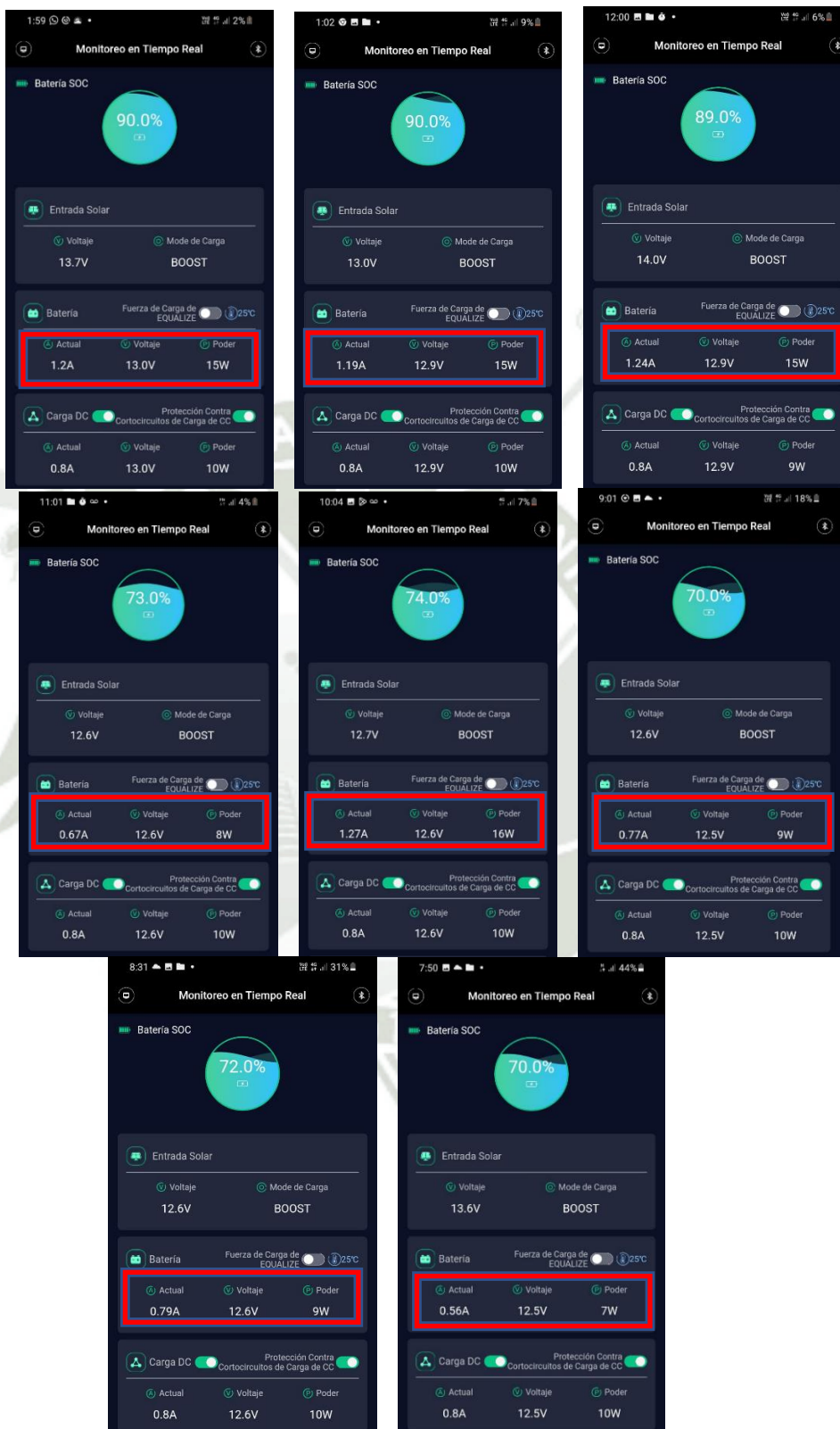


Figura. Datos adquiridos mediante PVchargepro el día 11/03/2024.

Fuente: PVchargepro

Día 10/03/2024



Datos adquiridos mediante PVchargepro el día 10/03/2024.

Fuente: PVchargepro

Día 08/03/2024

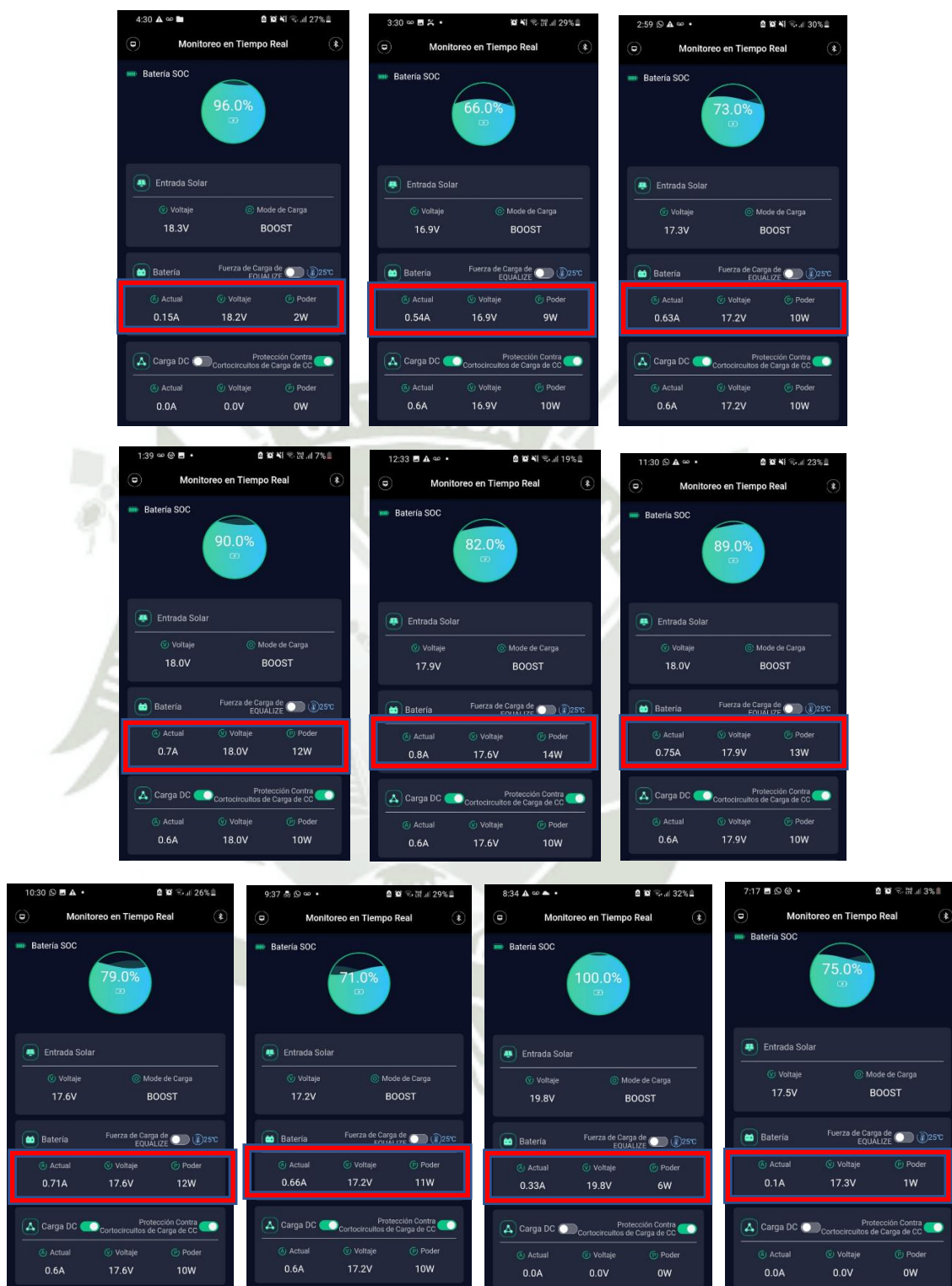


Figura. Datos adquiridos mediante PVchargepro el día 08/03/2024.
Fuente: PVchargepro

Anexo H: Código del motor

```
#include <DS3231.h> //Añadimos la librería.
DS3231 rtc(SDA, SCL); //Constructor que recibe como parámetros los pines para
comunicación I2C.
Time tiempo; //Declara una clase llamada tiempo.
int dia, mes, anio, hora, minuto, segundo; //Declara las variables donde se almacenarán
los datos de la fecha y la hora.
int pulso = 9;
int direccion = 8;
long conteo = 0;
long regreso1 = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  rtc.begin(); //Inicializa el rtc.
  pinMode(pulso, OUTPUT); //pulso
  pinMode(direccion, OUTPUT); //direccion
  //setearDatosAIRtc(); //Actualiza la hora del rtc.
}

void loop() {
  cargarDatos(); //Llama a la función encargada de cargar los datos de la fecha y la hora.
  movimiento_motor();
}

void setearDatosAIRtc() {
  rtc.setDOW(WEDNESDAY); //Setea el día de la semana.
  rtc.setTime(07, 20, 00); //Setea la Hora:Minuto:Segundo (La Hora debe estar en el
formato de 24Hs).
  rtc.setDate(10, 01, 2024); //Setea el Día/Mes/Año.
  delay(1000); //Produce una espera de 1 segundo.
}

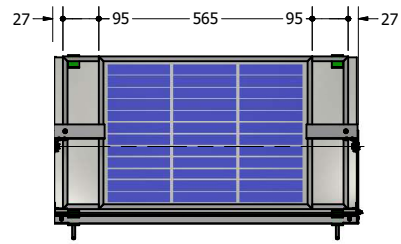
void cargarDatos() {
  tiempo = rtc.getTime(); //Carga los datos de la fecha y hora actual del reloj en la clase
tiempo.
  dia = tiempo.date; //Cargamos el día.
  mes = tiempo.mon; //Cargamos el mes.
  anio = tiempo.year; //Cargamos el año.
  hora = tiempo.hour; //Cargamos la hora.
  minuto = tiempo.min; //Cargamos el minuto.
  segundo = tiempo.sec; //Cargamos el segundo.
}

void movimiento_motor() {
  if (hora >= 06 && hora < 18) { //Comienza el giro del motor a 60rpm en sentido
horario
  digitalWrite(direccion, HIGH);
```

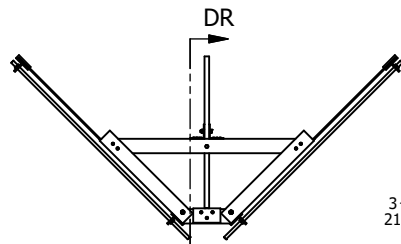
```
delayMicroseconds(10);
for (int j = 0; j < 400; j++) {
    digitalWrite(pulso, HIGH);
    delayMicroseconds(2500);
    digitalWrite(pulso, LOW);
}
conteo++;
}
if (hora == 18 && minuto == 00 && segundo < 01) {
    delay(3000);
}
if (conteo > regreso1) {
    if (hora >= 18 && hora < 24) {
        digitalWrite(direccion, LOW);
        delayMicroseconds(10);
        for (int j = 0; j < 400; j++) {
            digitalWrite(pulso, HIGH);
            delayMicroseconds(1250);
            digitalWrite(pulso, LOW);
        }
        regreso1++;
    }
    if (hora >= 00 && hora < 01) {
        digitalWrite(direccion, LOW);
        delayMicroseconds(10);
        for (int j = 0; j < 400; j++) {
            digitalWrite(pulso, HIGH);
            delayMicroseconds(1250);
            digitalWrite(pulso, LOW);
        }
        regreso1++;
    }
}
if (conteo == regreso1) {
    conteo = 0;
    regreso1 = 0;
}
}
```

Anexo I: Planos

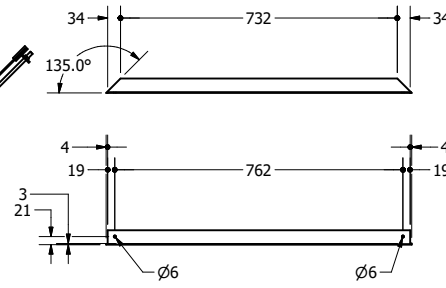




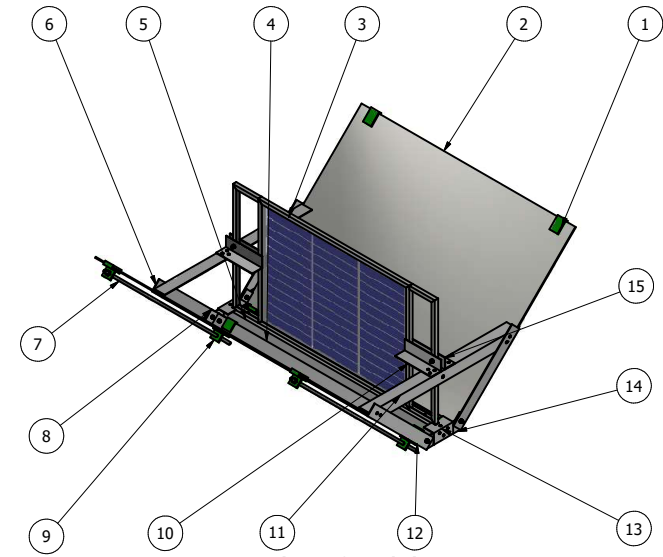
SECTION DR-DR
SCALE 1:10



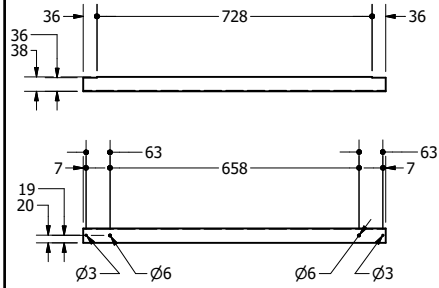
Sistema fotovoltaico con redirección
ESC: 1:10



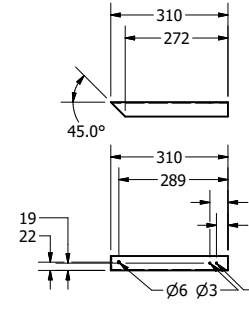
Angulo de aluminio N°10
ESC: 1:10



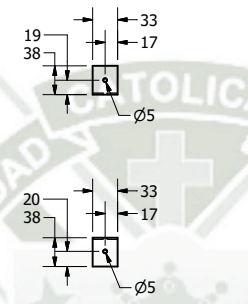
Sistema fotovoltaico con redirección
ESC: 1:10



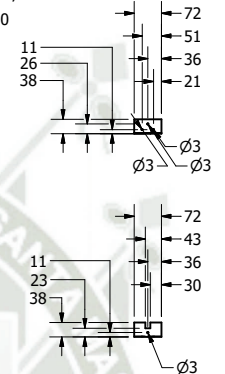
Angulo de aluminio N°11
ESC: 1:10



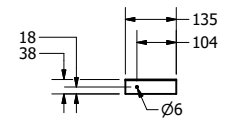
Angulo de aluminio N°12
ESC: 1:10



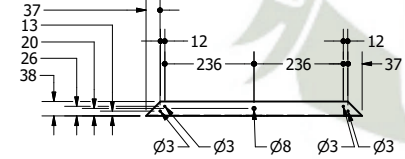
Angulo de aluminio N°13
ESC: 1:5



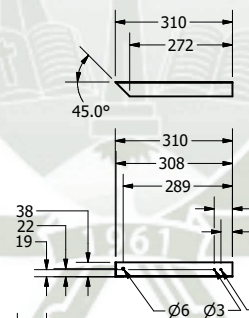
Angulo de aluminio N°17
ESC: 1:10



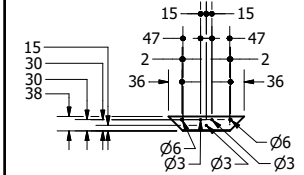
Angulo de aluminio N°14
ESC: 1:10



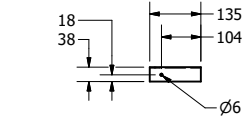
Angulo de aluminio N°15
ESC: 1:10



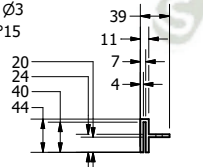
Angulo de aluminio N°16
ESC: 1:10



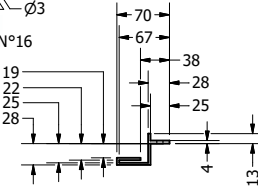
Angulo de aluminio N°18
ESC: 1:10



Angulo de aluminio N°19
ESC: 1:10



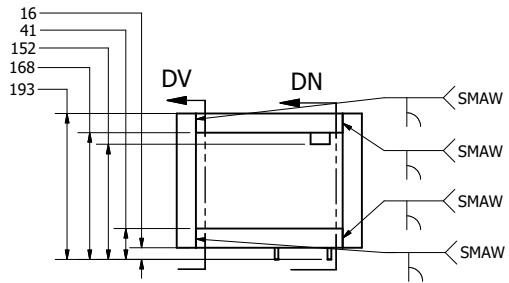
Pieza de sujeción impresa en 3D N°1
ESC: 1:5



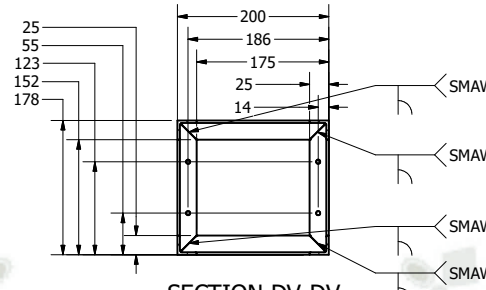
Pieza de sujeción impresa en 3D N°2
ESC: 1:5

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	4	Pieza se sujecion impresa en 3D N°1	Material ABS
2	2	Plancha de acero inoxidable	Plancha de Acero Inoxidable brillante de 795 x 625 x 1.5 [mm]
3	1	Panel fotovoltaico bifacial	Detalles plano N°5
4	2	Angulo de aluminio N°10	L 1 x 1 x 1/8
5	1	Angulo de aluminio N°11	L 1 x 1 x 1/8
6	1	Angulo de aluminio N°12	L 1 x 1 x 1/8
7	4	Varilla roscada	Varilla roscada galvanizada de 5/16 [pulg]
8	4	Angulo de aluminio N°13	L 1 x 1 x 1/8
9	4	Pieza se sujecion impresa en 3D N°2	Material ABS
10	2	Angulo de aluminio N°14	L 1 x 1 x 1/8
11	2	Angulo de aluminio N°15	L 1 x 1 x 1/8
12	2	Angulo de aluminio N°16	L 1 x 1 x 1/8
13	2	Angulo de aluminio N°17	L 1 x 1 x 1/8
14	2	Angulo de aluminio N°18	L 1 x 1 x 1/8
15	2	Angulo de aluminio N°19	L 1 x 1 x 1/8
16	2	Chumacera de pared	Chumacera de pared de 8[mm]
17	8	AS 1474 - M8(1)	Hex Nut
18	28	Rivet GB/T 1015-1986-3 X 4	Countersunk head semi - tublar rivets
19	2	AS 1427 - M5 x 25(7)	ISO metric machine screws
20	12	ISO 7089 - 5	Plain washers - Normal series - Product grade A
21	12	ISO 4032 - M5(4)	Hexagon nuts, style 1 - Product grades A and B
22	2	AS 1427 - M5 x 10(7)	ISO metric machine screws
23	4	AS 1427 - M5 x 16(7)	ISO metric machine screws
24	4	AS 1427 - M5 x 12(7)	ISO metric machine screws

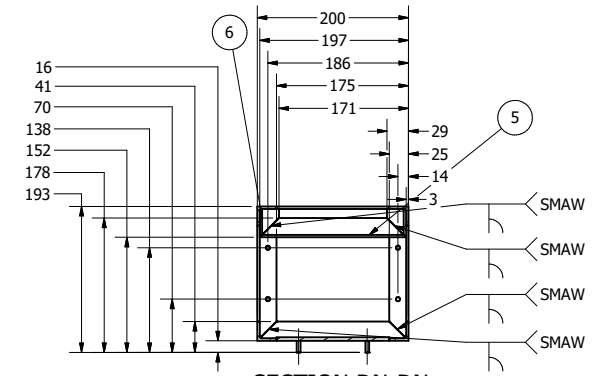
Dib/Diseño:	Enciso Ureta Mauricio	Fecha:	18/05/24	
Revisado:	Ing. Camilo Fernández	Fecha:	25/05/24	
Escala:	IND			Prototipo de sistema móvil de captación y redireccionamiento de radiación solar: Sistema fotovoltaico con redirección
N° Plano:	2	Revisión:	A	



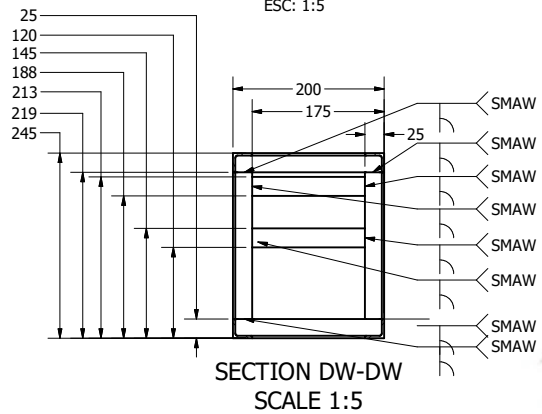
Caja reductora
ESC: 1:5



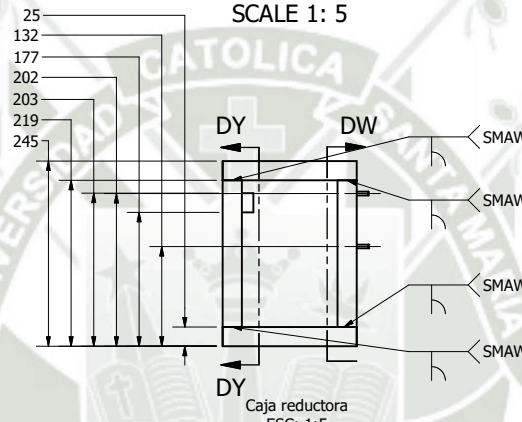
SECTION DV-DV
SCALE 1:5



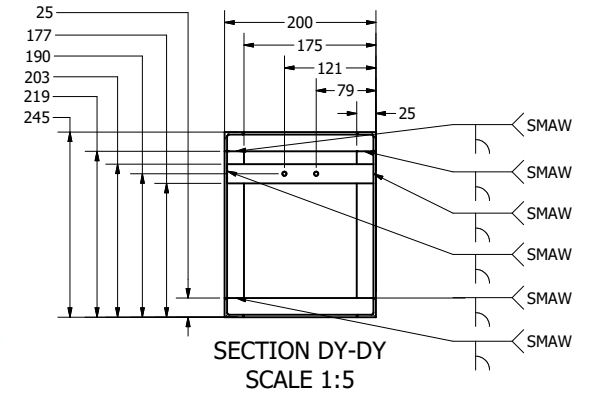
SECTION DN-DN
SCALE 1:5



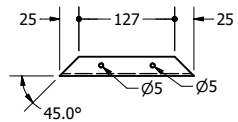
SECTION DW-DW
SCALE 1:5



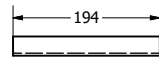
Caja reductora
ESC: 1:5



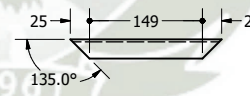
SECTION DY-DY
SCALE 1:5



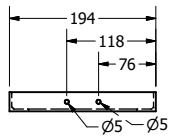
Angulo de acero N°1
ESC: 1:5



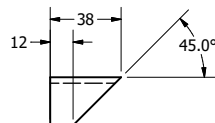
Angulo de acero N°2
ESC: 1:5



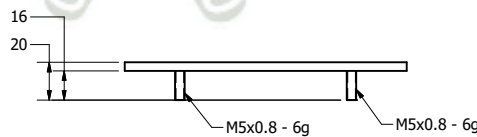
Angulo de acero N°3
ESC: 1:5



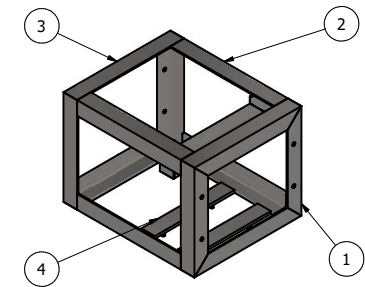
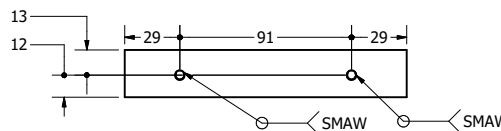
Angulo de acero N°4
ESC: 1:5



Angulo de acero N°5
ESC: 1:2



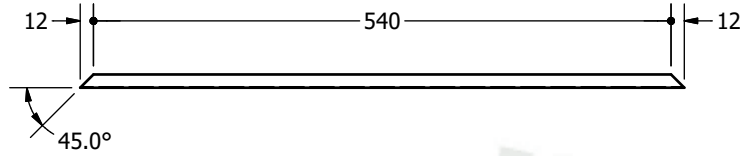
Platina de acero
ESC: 1:2



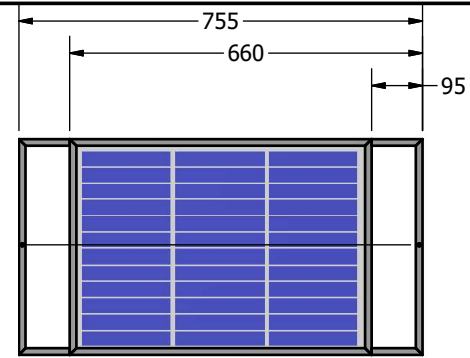
Caja reductora
ESC: 1:5

PARTS LIST			
ITEM	QTY	DESCRIPTION	PART NUMBER
1	4	Angulo de acero N°1	AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 6.988
2	4	Angulo de acero N°2	AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 7.638
3	4	Angulo de acero N°3	AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 7.874
4	2	Platina de acero	JIS G 3194 - 4.5 x 25 - 149.2
5	1	Angulo de acero N°4	AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 7.624
6	5	Angulo de acero N°5	AISC - L 1 x 1 x 1/8 - 1.477

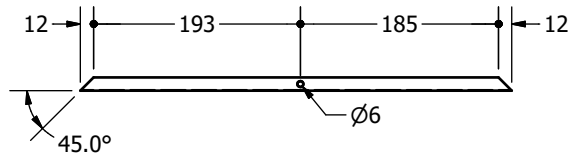
Nombre:	Fecha:		Universidad Católica de Santa María
Dib/Diseño:	18/05/24		
Revisado:	25/05/24		
Escala:	Prototipo de sistema móvil de captación y redireccionamiento de radiación solar: Caja reductora (Estructura)		N° Plano:
IND			Revisión:
			4
			A



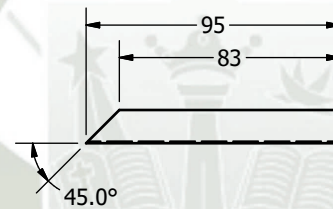
Canal de aluminio N°1
ESC: 1:5



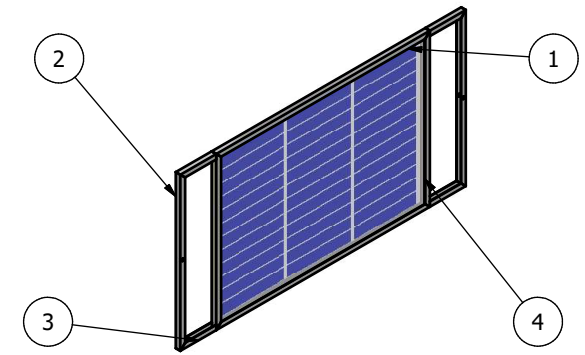
Panel fotovoltaico bifacial
ESC: 1:10



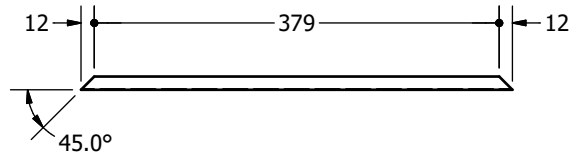
Canal de aluminio N°2
ESC: 1:5



Canal de aluminio N°3
ESC: 1:5



Panel fotovoltaico bifacial
ESC: 1:10



Canal de aluminio N°4
ESC: 1:5

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	4	Canal de aluminio N°1	Canal de aluminio de 12 x 12 [mm]
2	1	Canal de aluminio N°2	Canal de aluminio de 12 x 12 [mm]
3	1	Canal de aluminio N°3	Canal de aluminio de 12 x 12 [mm]
4	1	Canal de aluminio N°4	Canal de aluminio de 12 x 12 [mm]

Nombre:		Fecha:		 Universidad Católica de Santa María	
Dib/Diseño:	Enciso Ureta Mauricio	18/05/24			
Revisado:	Ing. Camilo Fernández	25/05/24			
Escala:	IND			N° Plano:	Revisión:
Prototipo de sistema móvil de captación y redireccionamiento de radiación solar: Panel fotovoltaico bifacial				5	A