

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Electricidad

SIMULACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA BASADO EN EL EFECTO SEEBECK ACOPLADO A UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO.

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Autor:

Sebastián Ramiro Yamberla Ipiales

Director:

Ing. Julio Esteban Guerra Masson Msc.

IBARRA-ECUADOR

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004192785		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Yamberla Ipiales Sebastián Ramiro		
DIRECCIÓN:	San José Chorlavi		
EMAIL:	sryamberlai@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062658010	TELÉFONO MÓVIL:	0985120219

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SIMULACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA BASADO EN EL EFECTO SEEBECK ACOPLADO A UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO
AUTOR (ES):	Yamberla Ipiales Sebastián Ramiro
FECHA: DD/MM/AAAA	28/11/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero electrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Julio Esteban Guerra Masson Msc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de noviembre de 2023

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Sebastian Ramiro Yamberla Ipiales

CERTIFICACION

Ing. Guerra Julio Msc.

TUTOR DE TESIS

Universidad técnica del Norte

CERTIFICA:

Que el señor Sebastián Ramiro Yamberla Ipiales ha trabajado bajo mi tutoría la presente tesis, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, la misma que cumple con un desarrollo del 100%, de acuerdo con la última revisión hecha el día 28/11/2023.

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal dashed line. The signature is stylized and appears to be 'Julio Guerra'.

Firma

Ibarra, 28 de noviembre de 2023

Dedicatorias

Mediante la presente, deseo dedicar este trabajo a Dios por darme la sabiduría, salud que me permitió culminar este proyecto de forma exitosa.

A mis estimados padres, hermanos, primos y hermana por el invaluable e incondicional apoyo que me han brindado durante mi trayectoria académica y vida personal. Su dedicación y esfuerzo desinteresado han sido pilares fundamentales para mi crecimiento como estudiante y persona. Les estaré eternamente reconocido por cada uno de los sacrificios realizados y la motivación constante brindada para alcanzar mis metas. Sus sabios consejos y valores inculcados han permitido que consiga este importante logro. No tengo cómo pagar tanta entrega de su parte. Solo me resta decirles, madre y padre, que son mi mayor orgullo y privilegio. Mi corazón rebosa de gratitud al tenerlos a mi lado. Son los mejores padres. Infinitas gracias por todo.

A mi abuelita quien ha significado tanto en mi vida, siendo quien me convirtió en lo que soy hoy en día.

También dedico este trabajo a mis estimados amigos Ariel , 朱宇, Ricardo, Milton, Emerson, Ahuqui, María Fernanda por su invaluable amistad y apoyo durante todos estos años.

Ariel, agradezco profundamente tu sincera amistad. Gracias por escucharme, aconsejarme y ayudarme en mi crecimiento personal. Los momentos que hemos compartido están llenos de risas, confianzas y una complicidad única. Eres un gran amigo.

朱宇, tu apoyo en cada momento ha significado mucho para mí. Agradezco enormemente tu ayuda, que me ha permitido superar varios retos a lo largo de estos años. Gracias por siempre escucharme y estar ahí cuando te necesito, disculpa que no pueda retribuirte de igual forma.

Ricardo, Milton, Emerson, Ahuqui, María Fernanda gracias por extenderme la mano cuando lo he necesitado, por escucharme y aconsejarme siempre. Los momentos que hemos compartido están llenos de risas y complicidad. Tenerlos en mi vida es un verdadero privilegio. Infinitas gracias por absolutamente todo, amigos.

Os agradezco a cada uno de ustedes por creer en mí, incluso a veces más que yo mismo. Son parte invaluable de mi vida. Es un honor y privilegio contar con su amistad.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios, a mi familia y a las personas por las cuales se aprobó este proyecto, a mi tutor Ing. Julio Guerra y a mi asesor Ing. Gerardo Collaguazo quienes supieron guiarme con sus conocimientos para culminar este proyecto exitosamente.

Sebastián Ramiro Yamberla Ipiales

Índice

Resumen.....	15
Abstract.....	16
Introduccion.....	17
Contextualización.....	17
Planteamiento del problema.....	20
Formulación del problema.....	21
Justificación.....	21
Alcance.....	22
Objetivo general.....	23
Objetivos específicos.....	23
Capitulo I.....	24
1.1 Efecto fotovoltaico.....	24
1.2 Efecto fotoeléctrico.....	25
1.3 Paneles solares fotovoltaicos.....	27
1.3.1 Definición de los paneles solares fotovoltaicos.....	27
1.3.2 Células fotovoltaicas.....	27
1.3.3 Análisis comparativo de acuerdo con el material empleado para la construcción de las células fotovoltaicas.....	29
1.3.4 Curva de I-V célula fotovoltaica convencional.....	31

1.3.5	Efectos de la temperatura en paneles fotovoltaicos cristalinos y de película delgada	
	32	
1.4	Efecto Seebeck	33
1.5	Efecto Peltier	33
1.6	Efecto Thomson	34
1.7	Figura de mérito ZT	34
1.8	Generadores termoeléctricos	35
1.8.1	Definición de los generadores termoeléctricos	35
1.8.2	Análisis comparativo de acuerdo con el material usado en los generadores termoeléctricos.....	35
1.8.3	Curva de generación I-V en un generador termoeléctrico estándar.....	39
2	Capitulo II.....	40
2.1	Metodología	40
2.2	Software Computacional	42
2.2.1	MATLAB.....	42
2.2.2	Simulink.....	42
2.2.3	SolidWorks	43
2.3	Sistema de los generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico	43
2.4	Modelo matemático del panel solar fotovoltaico	47

2.4.1	Corriente de salida en una celda solar.....	47
2.4.2	Ecuación de la corriente del diodo.....	50
2.4.3	Potencia de salida del módulo fotovoltaico	53
2.4.4	Temperatura en el módulo fotovoltaico.....	54
2.4.5	Irradiación solar de acuerdo con las horas sol pico	54
2.5	Modelo matemático del generador termoeléctrico.....	55
2.5.1	Modelo eléctrico y térmico del generador termoeléctrico	55
2.6	Modelo matemático para el acoplamiento de generadores termoeléctricos al panel solar fotovoltaico.....	59
2.6.1	Transferencia térmica.....	59
2.6.2	Ley de Fourier.....	60
2.7	Irradiación solar de corta onda en el cantón Ibarra	60
2.8	Temperatura en el cantón Ibarra.....	61
2.9	Selección del panel fotovoltaico	63
2.10	Irradiación máxima de acuerdo con las horas de sol pico.....	65
2.11	Cálculo de los valores de operación característicos del panel fotovoltaico	65
2.12	Modelo matemático en Simulink del panel fotovoltaico	68
2.12.1	Modelo en Simulink de la generación del panel fotovoltaico.....	68
2.12.2	Modelo en Simulink de la temperatura en las células del panel fotovoltaico.....	68

2.13	Selección del generador termoeléctrico	69
2.14	Modelo matemático en Simulink del generador termoeléctrico	70
2.14.1	Modelo en Simulink de la temperatura en las células del panel fotovoltaico.....	70
2.15	Modelo Estructural del generador termoeléctrico	72
2.16	Selección de materiales y diseño de acoplamiento	73
2.16.1	Modelo en Simulink de la temperatura del acoplamiento	74
2.17	Modelo en Simulink del sistema entre los generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico.....	74
2.18	Modelo estructural del acoplamiento para los generadores termoeléctricos al panel fotovoltaico.....	75
2.19	Discusión de resultados.....	78
3	Capitulo III	82
3.1	Software computacional.....	82
3.1.1	LabVIEW	82
3.2	Determinación de temperatura promedio.....	83
3.2.1	Temperatura promedio medida por Meteonorm 8.1	83
3.2.2	Temperatura promedio medida por NASA-SSE.....	83
3.2.3	Temperatura promedio medida por PVGIS TMY	84
3.2.4	Temperatura promedio determinada mediante MATLAB	85

3.2.5	Temperatura determinada mediante LabVIEW	86
3.3	Determinación de la Irradiación solar en Ecuador	88
3.3.1	Irradiación promedio medida por Meteonorm 8.1	88
3.3.2	Irradiación promedio medida por NASA-SSE	88
3.3.3	Irradiación promedio medida por PVGIS TMY	89
3.3.4	Irradiación promedio determinada mediante MATLAB	90
3.3.5	Irradiación determinada mediante LabVIEW	91
3.4	Valores óptimos vs valores reales de operación del panel fotovoltaico.....	92
3.5	Valores óptimos vs valores reales de operación del generador termoeléctrico.....	93
3.6	Sistema acoplado desarrollado en LabVIEW.....	94
3.7	Simulación de los generadores termoeléctricos acoplados a el panel fotovoltaico acuerdo a la variación de temperatura y radiación solar	96
3.7.1	Simulación en el entorno de MATLAB/SIMULINK	96
3.7.2	Simulación en el entorno de LABVIEW	99
3.7.3	Simulación en el entorno de SolidWorks.....	102
3.7.4	Relación de potencia generada de acuerdo con la cantidad de generadores termoeléctricos.....	104
3.8	Análisis de los resultados	105
	CONCLUSIONES	108

RECOMENDACIONES.....	110
Referencias bibliográficas.....	111
Anexos	115
Anexo 1: Código en MATLAB para la radiación solar	115
Anexo 2: Código de MATLAB para la variación de temperatura ambiente	115
Anexo 3: Código de MATLAB para la determinación de variables del generador termoeléctrico.....	115
Anexo 4: Código de MATLAB de los valores de generación del generador termoeléctrico .	117
Anexo 5: Ficha técnica panel fotovoltaico HiKu7 Mono PERC 645 W – 675W.....	117
Anexo 6: Ficha técnica panel fotovoltaico Mono Solar Module 5BB 410W	120
Anexo 7: Ficha técnica panel fotovoltaico Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 555-575 Watt	123
Anexo 8: Ficha técnica panel fotovoltaico Cheetah HC 60M-V 325-345 Watt	125
Anexo 9: Ficha técnica panel fotovoltaico M12 HJT GSM 560.....	127
Anexo 10: Ficha técnica panel generador termoeléctrico TEG71-1.4-1.6.....	128
Anexo 11: Diagrama de bloques del panel fotovoltaico acoplado al generador termoeléctrico	129

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efecto fotovoltaico	24
Figura 2 Diagrama eléctrico del efecto fotoeléctrico.....	25
Figura 3 Diagrama eléctrico del efecto fotovoltaico	26
Figura 4 Curva I-V característica de una célula fotovoltaica convencional	31
Figura 5 Curva de reducción de rendimiento energético.....	32
Figura 6 Curva I-V de un generador termoeléctrico estándar	39
Figura 7 Diagrama de bloques descripción de actividades realizadas.....	41
Figura 8 Diagrama eléctrico de generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico...	44
Figura 9 Diagrama de bloques del sistema de generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico	45
Figura 10 Diagrama eléctrico celda solar	47
Figura 11 Graficas de comportamiento de la corriente y voltaje de acuerdo a la irradiación	48
Figura 12 Diagrama eléctrico de una celda solar con perdidas	49
Figura 13 Diagrama eléctrico de un generador termoeléctrico.....	55
Figura 14 Diagrama térmico de un generador termoeléctrico	57
Figura 15 Irradiación solar coordenadas 0.3487 -78.1233	60
Figura 16 Temperatura máxima a 2 metros (° C) en las coordenadas 0.3487 -78.1233.....	61
Figura 17 Temperatura mínima a 2 metros (° C) en las coordenadas 0.3487 -78.1233.....	62
Figura 18 Modelo de la generación del panel fotovoltaico	68
Figura 19 Modelo de la temperatura del panel fotovoltaico.....	69
Figura 20 Modelo eléctrico y térmico del generador termoeléctrico.....	71

Figura 21 Modelo eléctrico y térmico del generador termoeléctrico con medidores ideales	71
Figura 22 Modelo estructural en Solidworks del generador termoeléctrico.....	72
Figura 23 Modelo estructural en Solidworks del generador termoeléctrico sin placa de contacto	72
Figura 24 Modelo de la temperatura del acoplamiento	74
Figura 25 Modelo del sistema de generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico a través de Simulink.....	75
Figura 26 Modelo estructural para el acoplamiento de los generadores termoeléctricos al panel fotovoltaico	75
Figura 27 Modelo estructural del acoplamiento de los generadores termoeléctricos.....	76
Figura 28 Modelo estructural del acoplamiento de los generadores termoeléctricos y el panel fotovoltaico lado superior	76
Figura 29 Modelo estructural del acoplamiento de los generadores termoeléctricos y el panel fotovoltaico lado posterior	77
Figura 30 Temperatura de un día promedio de invierno en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233	85
Figura 31 Temperatura de un día promedio de verano en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233	85
Figura 32 Diagrama de bloques en LabVIEW para la determinación de la temperatura	86
Figura 33 Temperatura promedio obtenida tras la simulación	87
Figura 34 Irradiación de un día promedio en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233	90
Figura 35 Diagrama de bloques en LabVIEW para la determinación de la irradiación	91
Figura 36 Irradiación promedio obtenida tras la simulación	91

Figura 37 Sistema acoplado desarrollado en LabVIEW	95
Figura 38 Potencia entregada por el modulo fotovoltaico.....	96
Figura 39 Potencia generada por el generador termoeléctrico	98
Figura 40 Potencia generada por el panel considerando perdidas por temperatura.....	100
Figura 41 Diferencia de temperatura	100
Figura 42 Potencia entregada por el TEG.....	101
Figura 43 Corriente entregada por el TEG	102
Figura 44 Simulación del flujo térmico del generador termoeléctrico	102
Figura 45 Simulación del flujo térmico del panel fotovoltaico	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de las células fotovoltaicas de acuerdo al tipo de material empleado	29
Tabla 2 Características de los compuestos usados en células fotovoltaicas	30
Tabla 3 Agrupación de materiales usados para la creación de generadores termoeléctricos	35
Tabla 4 Compuestos termoeléctricos usados en la fabricación de generadores termoeléctricos.	37
Tabla 5 Ventajas y desventajas de los paneles solares fotovoltaicos.....	45
Tabla 6 Tipos de transferencia de calor	59
Tabla 7 Comparativa entre varios paneles fotovoltaicos de varias marcas.....	63
Tabla 8 Valores de potencia, voltaje y corriente descritos en la hoja del fabricante del panel M12 HJT GSM560	64
Tabla 9 Valores de la irradiación máxima de acuerdo a las horas sol pico	65
Tabla 10 Valores de operación de las celdas del panel fotovoltaico	66
Tabla 11 Valores de potencia, voltaje y corriente descritos de varios generadores termoeléctricos	69
Tabla 12 Valores de la conductividad térmica de algunos materiales	73
Tabla 13 Temperatura promedio Meteonorm 8.1 (2016-2021).....	83
Tabla 14 Temperatura promedio NASA-SSE (1983-2005).....	84
Tabla 15 Temperatura promedio PVGIS TMY (2021).....	84
Tabla 16 Irradiación promedio Meteonorm 8.1 (2016-2021)	88
Tabla 17 Irradiación promedio NASA-SSE (1983-2005).....	88
Tabla 18 Irradiación promedio PVGIS TMY (2021).....	89
Tabla 19 Valores de operación reales vs ideales del módulo fotovoltaico	92

Tabla 20 Valores de operación reales vs ideales del generador termoeléctrico.....	93
Tabla 21 Diferencia de la temperatura entre las celdas solares y la temperatura ambiente.....	97
Tabla 22 Cantidad de generadores termoeléctricos vs potencia generada.....	104

RESUMEN

En la actualidad, la creciente demanda energética impulsa la necesidad de sistemas más eficientes y limpios. Los paneles fotovoltaicos, aunque son atractivos debido a su eficiencia creciente y su contribución a la reducción de contaminantes, enfrentan el problema del aumento de la temperatura debido a la radiación solar directa, lo que reduce su producción de energía eléctrica. El objetivo de este trabajo se centra en modelar y simular la generación termoeléctrica, mediante el acople de un generador termoeléctrico a la parte posterior del panel solar fotovoltaico para el aprovechamiento del calor generado por el panel. Para el caso se eligió el panel M12 HJT GSM 560 y el generador termoeléctrico TEG71-1.4-1.6 tras un análisis bibliográfico. El modelo resultante emplea 400 generadores termoeléctricos los cuales presentan, un incremento de 160 W en la generación de energía eléctrica al aprovechar el gradiente de temperatura entre el panel y el entorno, lo que sugiere un incremento del 30 % en la generación considerando que la potencia pico del panel individual es de 560W. Tras analizar los resultados, se evidencia que el acople de generadores termoeléctricos al panel fotovoltaico demuestra un aumento en la generación eléctrica de manera significativa, lo cual sugiere que es viable el sistema propuesto.

Palabras clave: eficiencia energética, generación termoeléctrica, gradiente de temperatura, panel solar fotovoltaico M12 HJT GSM 560, generador termoeléctrico TEG71-1.4-1.6.

ABSTRACT

Currently, the growing energy demand drives the necessity for more efficient and cleaner systems. Although photovoltaic panels are attractive due to their increasing efficiency and their contribution to reducing pollutants, they face the issue of increased temperature resulting from direct solar radiation, so diminishing their electrical energy production. The aim of this study is to model and simulate thermoelectric generation by coupling a thermoelectric generator to the rear of the photovoltaic solar panel to harness the heat produced by the panel. The M12 HJT GSM 560 panel and the TEG71-1.4-1.6 thermoelectric generator were chosen for this case following a bibliographic analysis. The resulting model employed 400 thermoelectric generators, showing an increase of 160 W in electrical energy production by leveraging the temperature difference between the panel and its surroundings, suggesting a 30% increment in generation, considering the individual peak power of the panel is 560 W. Upon analyzing the outcomes, it becomes evident that the integration of thermoelectric generators with the photovoltaic panel demonstrates a substantial rise in electrical generation, indicating the viability of the proposed system.

Keywords: energy efficiency, thermoelectric generation, the temperature gradient, M12 HJT GSM 560 photovoltaic solar panel, TEG71-1.4-1.6 thermoelectric generator.

INTRODUCCION

Contextualización

Los paneles solares fotovoltaicos en los últimos años han ganado un puesto bien merecido en lo que respecta a la generación de energía eléctrica, ya que al emplear la, energía directamente irradiada por el sol hacia la tierra son medio ambientalmente amigables lo cual genera un impacto social y ecológico, de acuerdo al estudio realizado por Paredes (2018) en el Chimborazo - Ecuador los paneles solares pueden sustituir de forma directa a los generadores que están basados en combustibles fósiles, satisfaciendo así la demanda energética de forma que esta sea ambientalmente amigable, además de acuerdo a un análisis económico por la entidad IRENA (2019) los paneles solares en contraste con otras energías renovables son sustentables, ya que pueden generar energía eléctrica a partir de la irradiación solar, aprovechando las diferentes formas en la que esta se presenta, tales como espectro visible, espectro infrarrojo, espectro ultravioleta, al tener 3 tipos de aprovechamiento energético a través de paneles solares de baja temperatura, paneles solares de alta temperatura, paneles solares fotovoltaicos y paneles híbridos se puede observar un futuro prometedor de manera que para 2050, los paneles solares podrían constituir un 25% de la energía eléctrica generada total. Actualmente el material más empleado en lo que respecta a creación de células fotovoltaicas es el silicio, las células PV son la base principal de un panel solar fotovoltaico de acuerdo a la entidad SERI (1982) cuando estos entran en contacto con la irradiación solar específicamente con el espectro de luz visible los fotones irradiados sobre la placa genera un movimiento de electrones libres generando energía eléctrica, sin embargo la eficiencia que tienen las células ronda entre un 6 a 20% de acuerdo a los estudios por parte de Dubey, Sarvaiya y Seshadri (2012), dependiendo de las características climáticas en las que se

encuentre lo cual a simple vista parece poco prometedor, a pesar de ello las investigaciones han mejorado ese rendimiento y de acuerdo a los reportes realizados por la entidad Fraunhofer ISE (2022) en la actualidad las células fotovoltaicas pueden aprovechar de un 15 a 27% de irradiación solar de acuerdo a la construcción que estas tengan, ya sean mono cristalinas, poli cristalinas o amorfas, además de las impurezas o combinaciones de materiales, que mejoran la generación energética a través de paneles solares fotovoltaicos. A pesar de las mejoras que se han obtenido a lo largo del tiempo tras diferentes estudios en lo que respecta a generación fotovoltaica a través de paneles solares, aún existe un gran problema con el cual se debe lidiar si se busca un futuro aún mejor para la generación fotovoltaica, como se mencionó anteriormente los paneles solares dependen completamente de las condiciones climáticas y en específico de la irradiación solar la cual tiene 3 tipos de irradiación que son de espectro visible, UV e infrarrojo, esta última es la responsable de la temperatura generada por el sol en el planeta tierra, la cual afecta de forma negativa a los humanos y especialmente a los componentes eléctricos y electrónicos que están expuestos a este tipo de irradiación de forma directa de acuerdo a Dubey, Sarvaiya, Seshadri (2012) la temperatura de referencia de los paneles solares fotovoltaicos es de 25 ° C para trabajos en condiciones óptimas por lo cual tras la investigación realizada se concluyó que el aumento de temperatura con respecto a las condiciones normales de trabajo afecta directamente a la producción de energía eléctrica a través de los paneles solares fotovoltaicos lo cual es descrito en el trabajo de investigación de Adeeb, Farhan, Al-Salaymeh (2019) en donde se encuentra que por cada 1 ° C que aumenta en relación a la temperatura de referencia (25 ° C) la eficiencia de un panel se reduce en 0.0984% lo cual indica que en un proyecto a gran escala puede representar pérdidas significativas. Debido a este problema se han realizado estudios de modo que se logre encontrar una solución que solvante las perdidas por temperatura, uno de estos estudios menciona que el

reducir la temperatura de funcionamiento de los módulos fotovoltaicos aumenta su eficiencia y vida útil, lo cual puede lograrse reduciendo la producción de calor residual o mejorando el rechazo del calor residual, a través de la combinación de simulación y experimentación, en este caso para mejorar la eficiencia del panel solar fotovoltaico se dan varias modificaciones térmicas en cada categoría, a través de las modificaciones térmicas más efectivas se logra reducir la producción de calor residual al reflejar la luz inutilizable de la celda o el módulo, sin embargo las modificaciones ópticas que alteran el reflejo de la luz del módulo deben equilibrar sus efectos térmicos con efectos ópticos no térmicos para maximizar la producción de energía. (Silverman, 2018) Además de las modificaciones térmicas, existen otras técnicas y equipos que puede usarse para mejorar la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos debido al aumento de temperatura, mismas que son descritas por Dwivedi (2020) las cuales son refrigeración líquida (a través de flujo de agua, a través de choque de chorros, inmersión tipo acuario), enfriamiento mediante aire (espacio de aire, flujo de aire), enfriamiento basado en materiales por el cambio de fase (Conductividad), tubos de calor, disipador de calor, aletas (superficies extendidas), enfriamiento por radiación, micro canales, enfriamiento basado en nano fluidos, enfriamiento basado en refrigerante, generadores termoeléctricos (TEG), enfriamiento por evaporación, filtro de espectro, enfriamiento híbrido, todas estas técnicas buscan mejorar la eficiencia a través de la reducción de temperatura en los paneles solares fotovoltaicos, lo cual es un método bastante convencional, en lo que respecta a solventar los problemas generados por el aumento de temperatura. De todas las técnicas mencionadas anteriormente el uso de generadores termoeléctrico (TEG) con paneles solares fotovoltaicos, puede aprovecharse de manera que el aumento de temperatura sea aprovechado para generar energía eléctrica, un generador termoeléctrico (TEG) funciona a través del efecto Seebeck el cual fue descubierto por Thomas Johann Seebeck (1770 – 1831) en 1821 el cual a través de la

diferencia de temperatura entre los lados opuestos del generador termoeléctrico genera un diferencial de potencial (Fernández, 2017), a través de esta técnica Bayod-Rújula (2019), realizó un estudio combinando generadores termoeléctricos (TEG) y paneles solares híbridos (PVT) obteniendo resultados favorables que demuestran que esta técnica es válida si se requiere compensar la pérdida de eficiencia en los paneles solares fotovoltaicos debido al aumento de temperatura. En la investigación de Feroz (2021), se analiza un sistema híbrido entre un panel solar fotovoltaico (PV) y un generador termoeléctrico (TEG), a través de la investigación realizada, se obtuvieron resultados que demuestran que al tener un sistema combinado de PV-TEG se genera una potencia mayor comparada a la que produce un panel solar fotovoltaico (PV), convencional sin embargo es necesario tener un control adecuado para que los resultados sean favorables y las pérdidas no sean mayores. Como se observó en los ejemplos anteriores un sistema combinado entre un panel solar fotovoltaicos (PV) y generadores termoeléctricos (TEG), tienen resultados favorables, sin embargo al igual que los paneles solares los generadores termoeléctricos tienen porcentajes de eficiencia bajos en un rango de 5-15% debido a que están constituidos por materiales P-N (Junturas de semiconductores dopadas positivamente o negativamente), la eficiencia depende directamente de la diferencia de temperatura entre los lados opuestos del generador termoeléctrico, teniendo rangos máximos de temperatura, voltaje y corriente de acuerdo a las características de los dispositivos que se estén empleando. (Enescu, 2019).

Planteamiento del problema

En la actualidad, la demanda energética presenta una tasa de crecimiento en relación con el desarrollo tecnológico y la expansión geográfica. Se espera que esta siga aumentando con el paso del tiempo. Debido a esta consideración las fuentes convencionales de generación eléctrica

(combustibles fósiles, carbón, nuclear, gas natural), no serán suficientes, de tal forma que la generación por fuentes renovables (hidroeléctricas, biomasa, solar, eólica, mareomotriz) ha tomado gran relevancia en los últimos años. Frente a esto la energía solar ha tenido un impacto positivo significativo en lo que refiere a generación eléctrica, ya que es una de las energías más abundantes en el sistema solar. Por lo que en la actualidad se han desarrollado paneles solares fotovoltaicos los cuales aprovechan el espectro de luz visible que son irradiados por el sol. A pesar de que actualmente existen múltiples modelos, diseños y construcciones, al depender de materiales semiconductores tales como el silicio o el arseniuro de galio, sufren de una reducción en la generación eléctrica debido a que los componentes que emplean no toleran de forma adecuada el aumento de temperatura generado por la irradiación solar. Este aumento de temperatura en los paneles solares afecta primordialmente a los valores de salida de voltaje y corriente además de que reduce la vida útil del dispositivo, además esta energía es disipada solo como calor en lugar de ser aprovechada.

Formulación del problema

¿Cómo puede solventar la reducción de la generación eléctrica por efecto del aumento de temperatura en un panel solar fotovoltaico convencional, el acoplar un dispositivo de generación termoeléctrica basado en el efecto Seebeck?

Justificación

El panel solar fotovoltaico tiene un potencial prometedor debido a que la energía solar es una de las más abundantes que existen. Sin embargo, al estar expuestos a la irradiación solar, generan un gradiente de temperatura el cual reduce la energía eléctrica que puede ser generada por estos dispositivos lo cual es descrito en múltiples estudios y hojas de fabricantes de paneles solares

fotovoltaicos. Por lo que se ha optado por simular un dispositivo de generación termoeléctrica (TEG) acoplado en la parte posterior de un panel solar fotovoltaico (PV) de forma que el TEG aproveche el aumento de temperatura en el panel solar fotovoltaico, buscando que el rendimiento que se obtenga sea mayor al que tiene un panel solar fotovoltaico convencional.

Alcance

El proyecto tiene como objetivo realizar la simulación de un dispositivo de generación termoeléctrica basado en el efecto Seebeck, el cual esté acoplado en la parte posterior de un panel solar fotovoltaico. Inicialmente se realizará una investigación bibliográfica en revistas científicas, artículos científicos, libros, tesis y otros documentos que permitan realizar un análisis de los parámetros de funcionamiento (Voltaje, corriente y temperatura) y materiales usados en los paneles solares fotovoltaicos y generadores termoeléctricos que aprovechen el efecto Seebeck. Posterior a ello se realizará un modelamiento matemático del dispositivo de generación termoeléctrica acoplado a un panel solar fotovoltaico de acuerdo con el análisis realizado. Finalmente, para validar la simulación se usarán distintos softwares computacionales tales como MATLAB, en el cual se analizarán las variables de temperatura, voltaje, corriente y las curvas de potencia eléctrica del generador termoeléctrico acoplado al panel solar fotovoltaico. Respecto a los circuitos eléctricos se usará la extensión Simulink en donde se analizarán el comportamiento de estos. En el caso del modelo 3D se usará el software SolidWorks el cual estará enlazado a LabVIEW y mediante la simulación se obtendrán datos de comportamiento del dispositivo planteado.

Objetivo general

Simular un dispositivo de generación termoeléctrica basado en el efecto Seebeck, acoplado a un panel solar fotovoltaico para el aprovechamiento de las temperaturas generadas en él panel, mediante el uso de software computacional.

Objetivos específicos

1. Analizar los parámetros de temperatura y generación eléctrica en paneles solares fotovoltaicos y generadores termoeléctricos basados en el efecto Seebeck.
2. Modelar el dispositivo de generación termoeléctrica acoplado a un panel solar fotovoltaico.
3. Simular el dispositivo de generación termoeléctrica acoplado a un panel solar fotovoltaico.

CAPITULO I

Análisis de los parámetros de temperatura y generación eléctrica en paneles solares fotovoltaicos y generadores termoeléctricos basados en el efecto

Seebeck.

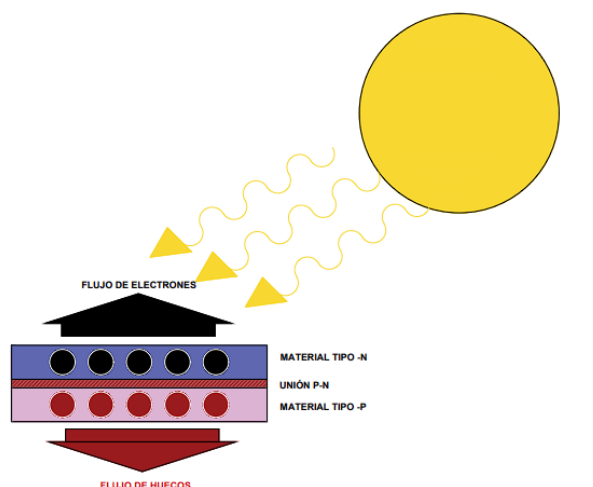
El siguiente apartado presenta el desarrollo del marco teórico que sustenta los sistemas de generación renovable tanto fotovoltaica como térmica. En este contexto, se proporcionó información detallada acerca de los paneles solares fotovoltaicos, los cuales convierten la radiación solar en electricidad, y de los generadores termoeléctricos, que aprovechan un gradiente térmico para generar energía eléctrica mediante el efecto Seebeck. Además, se llevó a cabo un análisis de los materiales, las características y las eficiencias de ambas tecnologías.

1.1 Efecto fotovoltaico

En 1839, el científico francés Alexandre Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico mientras realizaba experimentos con electrodos de metal y electrolitos. Durante sus experimentos, observó que la conductividad de los materiales aumentaba en presencia de la iluminación. La conductividad de un material es la medida que determina la capacidad de este para conducir la electricidad. (Zaidi, 2018, p.2)

Figura 1

Efecto fotovoltaico

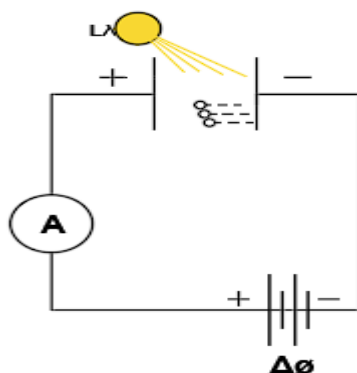


1.2 Efecto fotoeléctrico

En 1887, Heinrich Hertz realizó experimentos para confirmar las ecuaciones de Maxwell relacionadas con la radiación electromagnética. Como resultado de su investigación, concluyó que la luz se propaga mediante ondas electromagnéticas transversales y que no necesita un medio para su transporte, lo que significa que puede moverse incluso en el vacío. Estas ideas se confirmaron a través de varios experimentos posteriores, que demostraron la naturaleza ondulatoria de la luz. Tiempo después en 1905 Albert Einstein describió el efecto fotoeléctrico como un fenómeno en el que los electrones de un material conductor son liberados al ser iluminados con luz a una frecuencia umbral. En la figura 2 se observa el diagrama eléctrico del experimento realizado por Heinrich Hertz. (Rodríguez y Cervantes, 2006, p. 304)

Figura 2

Diagrama eléctrico del efecto fotoeléctrico



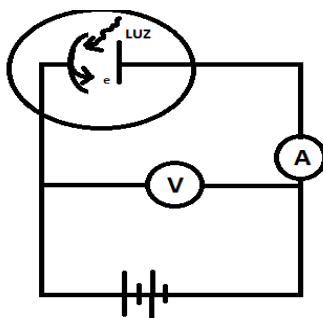
Nota. Adaptado de Rodríguez-Meza, M., & Cervantes-Cota, J. (2015). El efecto fotoeléctrico. *CIENCIA Ergo-sum*, 13(3), 303-311.

Wilhelm Hallwachs y Phillip Lenard llevaron a cabo experimentos en los que utilizaban dos electrodos (cátodo y ánodo) encerrados en un tubo de vidrio al vacío y conectados a una batería para generar un campo magnético, lo que permitió el estudio del efecto fotoeléctrico. Estos experimentos se realizaron a finales mediados del XIX y principios del siglo XX. Además, el descubrimiento del electrón por Joseph John Thomson en 1897 ayudó a aclarar las ideas sobre el efecto fotoeléctrico. (Rodríguez y Cervantes, 2006, p.304)

En la figura 3 se observa el diagrama eléctrico del experimento realizado por Wilhelm Hallwachs y Phillip Lenard quienes descubrieron que era necesario que la frecuencia de la luz emitida en el cátodo sea igual o mayor al umbral del material imbuido por luz.

Figura 3

Diagrama eléctrico del efecto fotovoltaico



Nota. Adaptado de Rodríguez-Meza, M., & Cervantes-Cota, J. (2015). El efecto fotoeléctrico. *CIENCIA Ergo-sum*, 13(3), 303-311. Consultado

1.3 Paneles solares fotovoltaicos

1.3.1 Definición de los paneles solares fotovoltaicos

Los paneles solares fotovoltaicos se construyen mediante la combinación de múltiples células fotovoltaicas que se conectan en serie y en paralelo. Cuando la luz solar incide sobre estas células, se produce electricidad a través del efecto fotovoltaico. El conjunto de células se monta sobre una estructura de aluminio. (Franklin, 2018, p. 1-2)

1.3.2 Células fotovoltaicas

Las células fotovoltaicas emplean materiales semiconductores tales como el silicio (Si), el germanio (Ge), el estaño (Sn), entre otros. El Silicio (Si) es uno de los más empleados debido a que se necesita conseguir una configuración eléctrica estable, se considera un átomo de silicio en el centro con cuatro átomos de silicio adyacentes de manera que se generen enlaces covalentes. Los enlaces covalentes generan que la banda de valencia está totalmente llena y al suministrar suficiente luz incidente o calor se puede elevar un electrón desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, generando un hueco y un electrón libre (exceso de electrones región tipo n

o negativa y menor cantidad de electrones región tipo p o positiva), este efecto es también conocido como conducción intrínseca de los semiconductores. Además de la conducción intrínseca existe la conducción extrínseca que se basa en semiconductores dopados en donde el átomo central cuenta con un electrón extra lo cual genera un electrón libre adicional conocido como portadores mayoritarios el cual al tener un enlace bastante débil requiere de menor cantidad de luz o calor para desplazarse. (Quaschnig, 2016, p. 120-124)

Al crearse un contacto entre los semiconductores p y n se crea una unión la cual difundirá los electrones de la región p a la región n generando huecos en la región p y generando electrones o cargas libres de la región n, debido a esto se crea un área fronteriza donde quedan pocos portadores de cargas libres. Se origina un campo eléctrico en la zona que se encuentra entre las dos regiones que han sido ionizadas, una con carga negativa y la otra con carga positiva, en donde los portadores de cargas libres pueden moverse y así producir una corriente. El voltaje producido dependerá del material semiconductor y del dopaje de este. Aunque para que se genere voltaje y corriente se la luz o calor imbuidos deberá atravesar una brecha de banda que es la magnitud de energía que se necesita para generar un hueco y un electrón libre. De acuerdo con ello no toda la energía que contienen los fotones podrá generar electricidad, además los electrones pueden recombinarse es decir que pueden volver de la banda de conductividad a la banda de valencia. Sin embargo, la célula solo puede usar energía igual a la brecha de banda del fotón con mayor energía, para el caso del exceso es decir la energía sobre la brecha de banda generara calor en el cristal. (Quaschnig, 2016, p. 124-127)

1.3.3 Análisis comparativo de acuerdo con el material empleado para la construcción de las células fotovoltaicas

1.3.3.1 Clasificación de las células fotovoltaicas de acuerdo con el tipo material empleado

Tabla 1

Clasificación de las células fotovoltaicas de acuerdo con el tipo de material empleado

<i>Tipo de material</i>	<i>Autores</i>	<i>Descripción</i>
Cristalino	Safyanu et. al, (2019)	Las células fotovoltaicas de material cristalino son hechas a partir de materiales semiconductores que forman estructuras moleculares cristalinas, las cuales son usadas en paneles solares monocristalinos y policristalinos.
Película delgada	Safyanu et. al, (2019)	Las células de película delgada están compuestas de una capa delgada de semiconductor fotovoltaico el cual es rociado sobre sustrato de vidrio, metal o plástico. Estas células tienen una menor absorción de luz comparadas con las células de material cristalino además su eficiencia es menor, sin embargo, su producción es más rápida y económica.
Orgánica y de polímero	Yu et. al, (2017)	Las células fotovoltaicas orgánicas y de polímero, son células que usan materiales orgánicos y polímeros semiconductores de los cuales a través del efecto fotovoltaico se genera electricidad a partir de la irradiación solar. Este tipo de célula es diferente a las células cristalinas o de película delgada, ya que son flexibles y ligeras; sin embargo, estas presentan una eficiencia menor lo cual es una desventaja en comparación a los otros tipos de células.
Híbridas	Xu et. al, (2020)	Las células fotovoltaicas híbridas combinan dos materiales uno orgánico y otro inorgánico, que pueden ser el silicio o el perovskita combinado con polímeros conjugados. La combinación de estos permite obtener una mejor respuesta por parte de las células fotovoltaicas.
Sensibles por tinte	Bozkurt et. al, (2020)	Las células fotovoltaicas sensibles por tinte son dispositivos basados en películas semiconductoras de óxido sensibles debido a moléculas de tinte. Aunque debido a su baja eficiencia no existe un comercio de ellas, sin embargo, se continúan realizando estudios para posibles mejoras para su comercialización.

1.3.3.2 Características de los compuestos usados en células fotovoltaicas

En la Tabla 2 describe las características de los distintos compuestos empleados en la construcción de células fotovoltaicas, las cuales son la eficiencia que es la relación de absorción de luz con respecto a la transformación de energía y la brecha de banda que es el valor que debe ser superado por la luz para generar huecos y electrones libres en donde 1eV (electronvoltio) es igual a $1,602 \times 10^{-19} \text{J}$.

Tabla 2

Características de los compuestos usados en células fotovoltaicas

Material empleado en la célula fotovoltaica	Eficiencia (%)	Brecha de Banda E_g (eV-electrón Voltio)	Autores
Mono cristalino de silicio (Si)	15%-20%	Alrededor de 1.1eV	
Policristalino de silicio (Si)	10%-14%	0.7Ev-1.4Ev	Safyanu, et.al (2019)
Arseniuro de Galio (GaAs)	30%-40%	Alrededor de 1.4eV	Safyanu, et.al (2019)
Silicio Amorfo	7%-9% Reducido a 5% después de unos meses de exposición	1.6eV-1.8eV	Yu, et.al (2017)
Telururo de Cadmio (CdTe) y Sulfuro de Cadmio (CdS)	Entre 15%	Alrededor de 1.4eV	Xu, et.al (2020)
Cobre Indio Galio Seleniuro (CIGS) / Cobre Indio Seleniuro (CIS)	10%-20%	1eV-1.2eV	Bozkurt, et.al (2020)
Células de orgánicas y de polímero	4%-12%	-	Yu, et.al (2017)
Silicio cristalino y silicio no cristalino (Si)	Entre 21%	1.2eV-1.7eV	Xu, et.al (2020)
Células solares híbridas orgánico-inorgánicas de perovskita	3% 25%	1.1eV-1.6eV	Bozkurt, et.al (2020)
Dióxido de titanio (TiO ₂) y Óxido de Zinc (ZnO)	0.1%-1.67%	1eV-3eV	

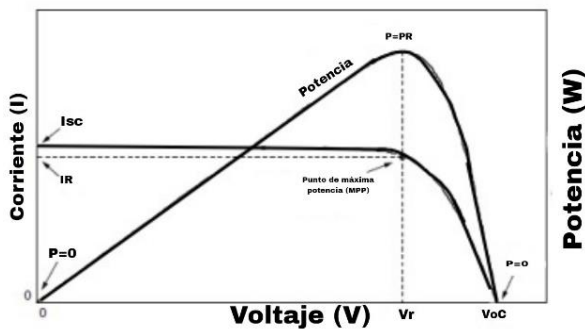
De acuerdo a los materiales observados se podría decir que debido a su eficiencia el uso de paneles solares híbridos serían la mejor opción en caso de buscar un sistema con mejores resultados comparados a los de los paneles solares cristalinos y de película delgada, sin embargo se debe tomar en cuenta que a mayor complejidad o a mayor cantidad de materiales empleados el precio del panel podría elevarse a valores no accesibles, por lo que lo más óptimo en este caso sería usar paneles solares conformados por células fotovoltaicas mono cristalinas ya que ofrecen una gran eficiencia en comparación con los otros tipos de células fotovoltaicas.

1.3.4 Curva de I-V célula fotovoltaica convencional

La curva I-V es la relación que existe entre el voltaje y corriente que puede producir una célula fotovoltaica, en la Figura 4 se observa la curva I-V característica de generación. En esta gráfica se trabaja con circuito abierto es decir sin ninguna carga de forma que la corriente sea cercana a 0 de tal forma que el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) sea el máximo. En el caso de la corriente trabaja con la corriente de cortocircuito donde la tensión eléctrica será cercana a 0 obteniendo así la máxima corriente en cortocircuito (I_{sc}). (Collaguazo, 2019)

Figura 4

Curva I-V característica de una célula fotovoltaica convencional



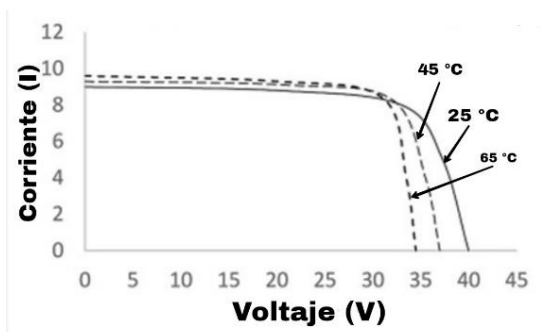
Nota. Adaptado de Cushicóndor Collaguazo, S. (2019, April 15). *Estimación de Irradiancia Solar Basada en modelos matemáticos y medición de variables eléctricas de paneles fotovoltaicos*. EPN.

1.3.5 Efectos de la temperatura en paneles fotovoltaicos cristalinos y de película delgada

El aumento de temperatura en los paneles fotovoltaicos es un problema ya que afecta de forma negativa la eficiencia que un panel fotovoltaico puede presentar, de acuerdo al estudio realizado por Adeb, Farhan y al-Salaymeh (2019) en donde se realizaron pruebas con paneles solares mono cristalinos, poli cristalinos y de película delgada, en donde se observó que existe una desviación anual en el rendimiento energético del 15,4%, 17,0% y 19,5% en los paneles fotovoltaicos respectivamente, debido a un aumento de temperatura en los paneles de 12.53 ° C, lo cual determino que por cada 1° C que aumenta de temperatura respecto a la temperatura estándar (25° C) de operación los paneles sufren una reducción de 0.00984%, 0.109% y 0.124% de rendimiento energético respectivamente para cada tipo de panel. En la figura 5 se observa la reducción de generación eléctrica al comparar diferentes temperaturas, 25 ° C, 45° C y 65° C de forma que sea observable la reducción de potencia entregada respecto al aumento de temperatura.

Figura 5

Curva de reducción de rendimiento energético



Nota. Adaptado de Adeeb, J., Farhan, A., & Al-Salaymeh, A. (2019, April 9). *Temperature effect on performance of different Solar Cell Technologies*. Journal of Ecological Engineering. Retrieved February 13, 2023, from <https://doi.org/10.12911/22998993/105543>

1.4 Efecto Seebeck

El efecto termoeléctrico, conocido como efecto Seebeck, es un proceso físico que se produce en materiales conductores cuando se crea una variación de temperatura a través de ellos, produciendo una corriente eléctrica. El efecto se produce debido a la existencia de un gradiente térmico que genera una diferencia de potencial eléctrico en el material, lo que resulta en la producción de una corriente eléctrica. El efecto fue descubierto en 1821 por el físico alemán Thomas Johann Seebeck y ha sido objeto de estudio e investigación en varias áreas de la ciencia y la tecnología desde entonces. (Cornaglia, 2018)

1.5 Efecto Peltier

El efecto Peltier, que es el opuesto al efecto Seebeck, ocurre cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través de un circuito compuesto por materiales diferentes que tienen uniones a la misma temperatura. En este caso, se produce una absorción de calor en una de las uniones del circuito y una liberación en la otra, resultando en que la sección del circuito enfríe cerca de los 25°

C, mientras que la sección que absorbe calor puede alcanzar rápidamente los 80° C. Este efecto termoeléctrico fue descubierto por el físico francés Jean Charles Peltier en 1834 mientras realizaba investigaciones sobre electricidad. (Penalva, 2018)

1.6 Efecto Thomson

William Thomson, también conocido como Lord Kelvin, fue un destacado matemático y físico de su época. Sus contribuciones en el campo de la termodinámica incluyeron el desarrollo del trabajo realizado por Joule sobre la interacción del calor y la energía mecánica, y la colaboración con Joule para investigar el fenómeno que se conoce como el efecto Thomson. El investigador concluyó que la relación entre los coeficientes Seebeck y Peltier aumentaba en proporción directa a la temperatura. (Tejedor, Sotelo, 2006)

1.7 Figura de mérito ZT

La evaluación de la figura de mérito ZT es de suma importancia en la caracterización de los materiales termoeléctricos, ya que se relaciona con su capacidad de convertir la diferencia de temperatura en energía eléctrica. Esta medida es crucial en aplicaciones que implican la generación de energía, refrigeración y otros dispositivos termoeléctricos. (Marx, 2019)

Se utiliza el término ZT para evaluar la capacidad de un material termoeléctrico en convertir la energía térmica en eléctrica, el cual se determina por la conductividad termoeléctrica (S), la conductividad térmica (K) y la resistividad eléctrica (ρ) del material. El valor del ZT es un indicador de la eficiencia de conversión de energía térmica en eléctrica de un material termoeléctrico, y cuanto mayor sea el valor, mayor será su eficiencia en este proceso. (Shi et. al, 2016)

1.8 Generadores termoeléctricos

1.8.1 Definición de los generadores termoeléctricos

Un generador termoeléctrico transforma la energía calorífica en energía eléctrica por medio del efecto Seebeck. Este dispositivo consta de dos semiconductores, uno de tipo p y otro de tipo n, que se conectan mediante un conductor. Al inducir calor a uno de los extremos y frío en el otro, se produce una diferencia de temperatura que da lugar a una corriente eléctrica. La generación de esta corriente eléctrica se produce gracias al efecto Seebeck, el cual genera una corriente eléctrica al aplicar una diferencia de temperatura a un conductor compuesto por dos materiales diferentes. (Jouhara et. al, 2021)

1.8.2 Análisis comparativo de acuerdo con el material usado en los generadores termoeléctricos

1.8.2.1 Materiales empleados en los generadores termoeléctricos de acuerdo con su agrupación o familia

La Tabla 3 describe las características que tienen las familias de materiales empleados en la construcción de generadores termoeléctricos.

Tabla 3

Agrupación de materiales usados para la creación de generadores termoeléctricos

Agrupación	Definición
Skutteruditas	Grupo de arseniuros, este mineral se encuentra relacionado con la plata, cobalto y níquel. Las Skutteruditas tienen un alto nivel de eficiencia termoeléctrica, lo cual significa que pueden convertir gran cantidad de calor en electricidad.
Calco-genidos	Grupo 16 de la tabla periódica, es decir, oxígeno (O), azufre (S), selenio (Se), telurio (Te), y polonio (Po).
Clatratos	Grupo de compuestos químicos en el que una o más moléculas de una sustancia están encapsuladas en una jaula tridimensional formada por moléculas de otra sustancia.

Óxidos	Grupo de compuestos químicos que consisten en un elemento químico combinado con oxígeno. Los óxidos pueden ser metálicos o no metálicos y su fórmula química general es MO, donde M representa el elemento y O representa el oxígeno.
Tetraedrita	Es un mineral que se encuentra comúnmente en yacimientos de minerales de cobre y plata. Tiene una apariencia opaca y puede tener un color gris, negro o marrón. La fórmula química general de la tetraedrita es $Cu_{12}Sb_4S_{13}$, lo que significa que contiene cobre, antimonio y azufre.
Half-Heusler	Grupo de materiales inter metálicos con propiedades termoeléctricas interesantes y un potencial significativo en una variedad de aplicaciones.
Siliciuros	Grupo de compuestos químicos que contienen silicio como uno de sus principales elementos constituyentes. Los siliciuros pueden contener uno o más metales como componentes adicionales y se caracterizan por su estructura cristalina compleja y su alta conductividad térmica y eléctrica.
Diamond-like	Grupo de materiales que tienen una estructura cristalina similar a la del diamante, lo que les da propiedades de alta dureza, resistencia y transparencia óptica. Estos materiales también pueden tener una alta conductividad térmica y eléctrica
Antimoniuros	Grupo en donde se encuentran el arseniuro de galio y el fosfuro de indio, que se utilizan ampliamente en la industria electrónica. Los antimoniuros también tienen propiedades termoeléctricas interesantes, lo que significa que pueden convertir el calor en electricidad y viceversa.
Materiales 2D: pozos cuánticos o superredes	Grupo de materiales bidimensionales son materiales con un grosor de solo unos pocos átomos y que tienen propiedades únicas debido a su estructura en dos dimensiones.
Nano compuestos	Los nanocompuestos son materiales creados al combinar al menos dos materiales diferentes, uno de los cuales es una nanopartícula. Se mezclan con una matriz de polímero, cerámica o metal para mejorar sus propiedades, lo que los hace interesantes en varias áreas de la ciencia.
Nuevos materiales termoeléctricos	Grupo de materiales termoeléctricos en desarrollo los cuales tendrán una mayor eficiencia energética y sean más económicos de producir. Estos nuevos materiales incluyen una amplia variedad de materiales, como aleaciones complejas, compuestos inter metálicos, materiales orgánicos y materiales híbridos.

Nota. Adaptado de Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L.,

Norman, L., Axcell, B., Wrobel, L., & Dai, S. (2021). Thermoelectric Generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100063.

<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100063>

1.8.2.2 Compuestos termoeléctricos usados en la creación de los generadores

termoeléctricos

La Tabla 4 describe las características como el tipo de portador, el valor que tienen en la figura de mérito ZT, el valor de la conductividad térmica y la temperatura de varios compuestos que han sido estudiados en lo que respecta a generación termoeléctrica.

Tabla 4

Compuestos termoeléctricos usados en la fabricación de generadores termoeléctricos

Material termoeléctrico	Portador (tipo n o p)	ZT	Kl [W/m. K]	Temperatura
Skutteruditas				
Yb _{0.19} Co ₄ Sb ₁₂	n	1	-	600K
In _{0.25} Co ₄ Sb ₁₂	n	1.2	2	575K
CoSb _{2.75} Sn _{0.05} Te _{0.2}	n	1.1	2.04	823K
Ba _{0.14} In _{0.23} Co ₄ Sb _{11.84}	n	1.34	0.74	850K
Yb _{0.2} Co ₄ Sb _{12.3}	n	1.26	-	800K
Yb _{0.3} Co ₄ Sb _{12.3}	n	1.3	-	800K
Na _{0.48} Co ₄ Sb _{12.3}	-	1.25	-	850K
Ba _{0.08} La _{0.05} Yb _{0.04} Co ₄ Sb ₁₂	n	1.7	-	850K
Materiales bidimensionales con pozos cuánticos o superredes				
PbTe/Pb _{1-x} EuxTe	-	2	.	239K
PbSeTe/PbTe	n	2	0.58	239K
Bi ₂ Te ₃ /Sb ₂ Te ₃	p	2.4	0.22	300K
Bi ₂ Te ₃ /Bi ₂ Te _{2.83} Se _{0.17}	n	1.4	0.58	300K
Nano compuestos basados en Bi₂Te₃				
BiSbTe	p	1.4	-	373K
Bi ₂ Te _{2.75} Se _{0.3}	n	1.04	-	498K
(BiSb) ₂ Te ₃	p	1.47	-	440K
Bi _{0.52} Sb _{1.48} Te ₃	p	1.56	0.26	300K
Bi ₂ Te ₃	n	1	0.3	450K
Bi _{0.4} Sb _{1.6} Te ₃	p	1.5	0.16	293K
Nano compuestos basados en PbTe				
AgPb ₁₈ SbTe ₂₀	n	2.2	-	800K
Ag _{0.5} Pb ₆ Sn ₂ Sb _{0.2} Te ₁₀	p	1.45	0.43	630K
Ag _{0.53} Pb ₁₈ Sb _{1.2} Te ₂₀	n	1.7	-	700K
K _{0.95} Pb ₂₀ Sb _{1.2} Te ₂₂	n	1.6	0.4	750K
Na _{0.95} Pb ₂₀ SbTe ₂₂	p	1.7	0.74	700K
PbTe-PbS8%	n	1.4	-	750K

PbTe - Pb - Sb	n	1.4	0.6	700K
PbTe - Si	n	0.9	-	675K
Pb _{9.6} Sb _{0.2} Te ₃ Se ₇	n	1.2	0.4	650K
(Pb _{0.95} Sn _{0.05} Te) _{0.92} (Pb) _{0.08}	n	1.5	0.4	642K
2% SrTe - containing PbTe	p	1.7	0.45	800K
NaPb ₁₈ BiTe ₂₀	p	1.3	-	670K
Ag _{0.8} Pb _{22.5} SbTe ₂₀	n	1.5	0.89	700K
<hr/>				
Nano compuestos basados en SiGe				
Si ₈₀ Ge ₂₀	p	0.95	-	1073K
Si ₈₀ Ge ₂₀ P ₂	n	1.3	-	1173K
<hr/>				
Nuevos materiales termoeléctricos				
In ₄ Se _{3-δ}	n	1.48	-	705K
In ₄ Se _{3-x} C _{10.03}	n	1.53	-	698K
β -Cu _{2-x} Se	p	1.5	0.4	1000K
β- Zn ₄ Sb ₃	p	1.35	-	673K
GrO	-	0.3	-	-
GO	-	0.3	-	-
rGO	-	0.5	-	-

Nota. Adaptado de Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehghah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Axcell, B., Wrobel, L., & Dai, S. (2021). Thermoelectric Generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100063>

De acuerdo con las descripciones anteriores acerca de los generadores termoeléctricos basados en el efecto Seebeck y sus materiales empleados, se puede decir que el estado actual de la ciencia no compite con otros medios de generación como los combustibles fósiles o la energía solar fotovoltaica ya que sigue siendo una tecnología emergente. A pesar de ello en los últimos años múltiples investigaciones demuestran un interés en el aprovechamiento de energía térmica por fuentes de calor residual para convertirla en electricidad.

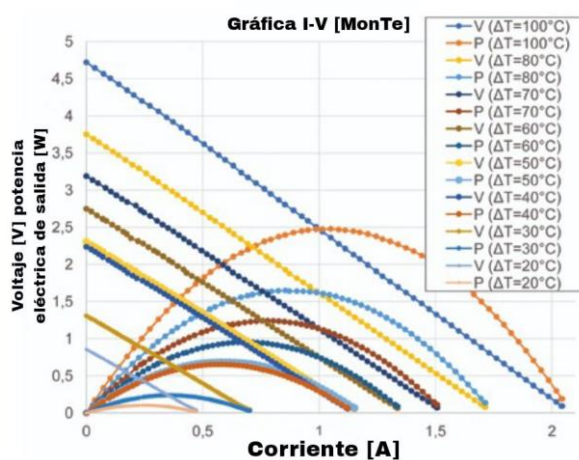
La generación termoeléctrica basada en el efecto Seebeck presenta múltiples ventajas tales como su baja necesidad de mantenimiento además de que es amigable con el medio ambiente,

aunque tras recapitular lo mencionado junto a la descripción de las características de los materiales empleados en los generadores termoeléctricos Tabla 3, se puede discernir que su eficiencia actual es relativamente baja y su capacidad de generación es limitada actualmente.

1.8.3 Curva de generación I-V en un generador termoeléctrico estándar

Figura 6

Curva I-V de un generador termoeléctrico estándar



Nota. Por Probadores Linseis Teg para los generadores termoeléctricos y Peltier. Linseis Messgeräte GmbH. (2022, August 17). Retrieved February 14, 2023, from <https://www.linseis.com/es/productos/termoelectrica/teg-tester/>.

La curva de generación que se observa en la Figura 6 fue obtenida por la empresa Linseis (2022) mediante un probador de generadores termoeléctricos en esta figura se pueden observar las distintas corriente y voltajes producidos en variaciones de temperatura de 20 ° C a 100 ° C producidas por un generador termoeléctrico estándar de Bi₂Te₃, cabe aclarar que los valores obtenidos son en condiciones idóneas, de forma que en el campo practica los valores de voltaje y corriente de salida variaran.

CAPITULO II

Modelamiento del dispositivo de generación termoeléctrica acoplado a un panel solar fotovoltaico.

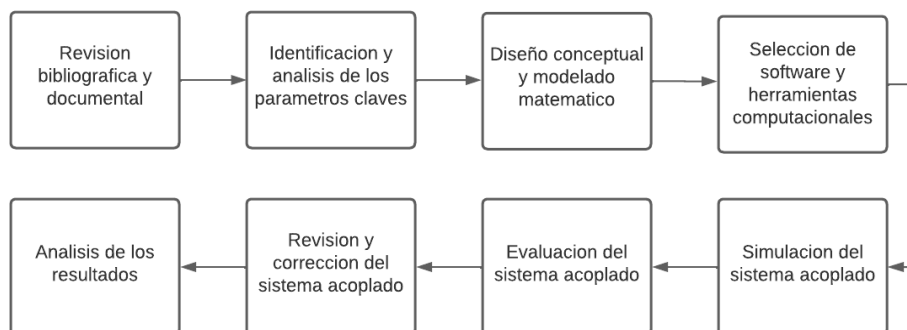
En el siguiente apartado se examinaron los parámetros clave del panel fotovoltaico y el generador termoeléctrico mencionados en la literatura con el objetivo de crear un modelo conceptual y matemático del sistema propuesto. En este proceso, se tuvieron en cuenta variables como la temperatura y la producción de energía eléctrica. Se optó por utilizar herramientas computacionales como MATLAB, Simulink y SolidWorks para llevar a cabo la modelización y simulación del sistema. Antes de proceder a la simulación, se efectuó una revisión de los modelos para detectar posibles errores. Posteriormente, se evaluó el sistema con el propósito de mejorar su capacidad de generación de energía eléctrica. Por último, se realizaron análisis detallados de los resultados, proporcionando una descripción de las condiciones en las que se realizaron las simulaciones, con el fin de que puedan ser reproducidas en el futuro.

2.1 Metodología

La metodología considerada para el desarrollo de este proyecto tiene un enfoque teórico-experimental el cual aborda la investigación científica, el modelado matemático y la simulación a través de software computacional. Este estudio permite identificar y analizar los parámetros de funcionamiento, los materiales y configuraciones de los dispositivos existentes en la literatura. A partir de este análisis se desarrolla un modelo matemático y conceptual del dispositivo de generación termoeléctrica acoplado a un panel solar fotovoltaico, considerando las variables y parámetros claves.

Figura 7

Diagrama de bloques descripción de actividades realizadas



En la Figura 7 se observan distintas secciones del diagrama de bloques el cual describe cada una de las actividades realizadas para el desarrollo del proyecto entre ellas la revisión bibliográfica y documental en la cual se buscó información del estado actual del arte, lo cual permitió evaluar las características fundamentales tales como materiales, estructuras y eficiencia en los paneles solares y generadores termoeléctricos.

En la identificación y análisis de los parámetros claves se observó la temperatura y valores de generación necesarios para evaluar los posibles diseños y modelos matemáticos. Tras ello se buscó información sobre softwares y herramientas computacionales que permitan la evaluación del modelado matemático y que permitan la simulación del sistema acoplado propuesto. Respecto a la simulación se realizó una verificación previa del sistema propuesto así pues de los modelos matemáticos en busca de errores. Posteriormente se evaluó el sistema acoplado propuesto en busca de mejoras para que su generación sea mayor. Se realizó una evaluación y revisión previa al análisis de los resultados en búsqueda de valores erróneos por factores humanos. Finalmente, tras una revisión final del sistema se realizó un análisis de resultados final en el cual se describen las

condiciones en las cuales se realizaron las simulaciones del sistema acoplado de forma que puedan ser replicadas por algún otro investigador.

2.2 Software Computacional

2.2.1 *MATLAB*

MATLAB (abreviatura de "Matrix Laboratory") es un entorno de programación y lenguaje de programación de alto nivel desarrollado por MathWorks. MATLAB también es compatible con la creación de gráficos y visualizaciones de datos de alta calidad, lo que facilita la exploración y presentación de resultados. El entorno de programación de MATLAB permite a los usuarios escribir scripts y funciones, lo que facilita la automatización de tareas y la creación de programas personalizados. Otra característica clave de MATLAB es su capacidad para integrarse con otros lenguajes de programación, como C, C++, Java y Python, así como con diversas bibliotecas y herramientas de software. Esto permite a los usuarios ampliar las capacidades de MATLAB y aprovechar otras tecnologías según sea necesario. (MATLAB, 2023)

2.2.2 *Simulink*

Simulink es un entorno de modelado y simulación compatible con MATLAB. Se utiliza para diseñar, modelar y simular sistemas dinámicos, incluyendo sistemas de control, sistemas de procesamiento de señales y sistemas físicos. Simulink permite a los usuarios construir modelos de sistema con bloques que representen componentes y funciones, y luego conectarlos con líneas que representan las relaciones y los flujos de información entre los bloques. Simulink además útil para la simulación de sistemas multidominio porque le permite combinar modelos de los dominios eléctrico, mecánico, térmico y otros dentro de una sola simulación. Simulink facilita el diseño y la

optimización de sistemas complejos gracias a su interfaz gráfica fácil de usar y la capacidad de crear bloques personalizados. (MATLAB, 2023)

2.2.3 SolidWorks

SolidWorks es un software de diseño asistido por computadora (CAD) en 3D utilizado para modelar y diseñar objetos, productos y sistemas mecánicos. Es un programa ampliamente utilizado en la industria de la ingeniería y el diseño, especialmente en los campos de la ingeniería mecánica, aeroespacial y automotriz. SolidWorks es desarrollado y comercializado por Dassault Systèmes, una empresa francesa especializada en software de diseño y simulación 3D. SolidWorks permite a los usuarios crear bocetos en 2D y 3D, modelar y ensamblar componentes, realizar análisis de elementos finitos (FEA) para evaluar tensiones, deformaciones y otros factores mecánicos en las piezas y ensambles. Además, el programa facilita la creación de dibujos técnicos detallados, listas de materiales, y documentación de diseño para la fabricación y producción. (SOLIDWORKS, CAD, 2023)

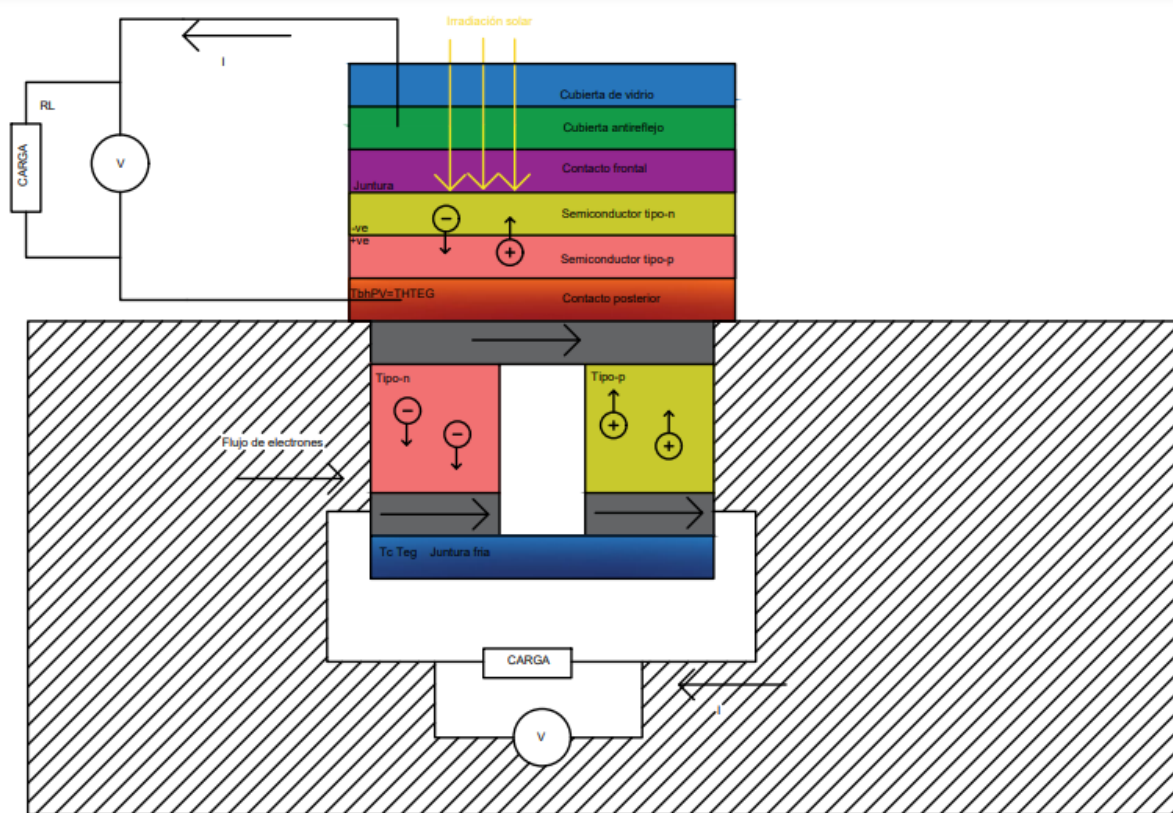
2.3 Sistema de los generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico

El sistema de los generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico con el objetivo de emplear la diferencia de temperatura entre la parte posterior del panel y la temperatura ambiente para la generación de energía eléctrica. Este sistema aprovecha dos fuentes de energía para la generación eléctrica por su parte el panel solar emplea la irradiación solar y los generadores termoeléctricos emplean el gradiente de temperatura. El sistema requiere de un acoplamiento adecuado entre los dispositivos de forma que se exista una transferencia de calor óptima entre el panel solar y los generadores termoeléctricos. Además, cuenta con un controlador de potencia el cual se encarga de que el sistema entregue la máxima potencia posible. Finalmente, un inversor el

cual se encargue de convertir la corriente eléctrica continúa en corriente eléctrica alterna la cual puede usarse en aplicaciones específicas o pueda interconectarse con la red eléctrica. El enfoque de este sistema es mejorar la eficiencia de generación que puede tener un panel solar fotovoltaico convencional de forma que se aproveche la irradiación solar disponible y el calor residual generado por el panel fotovoltaico en su parte posterior a través de generadores termoeléctricos.

Figura 8

Diagrama eléctrico de generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico

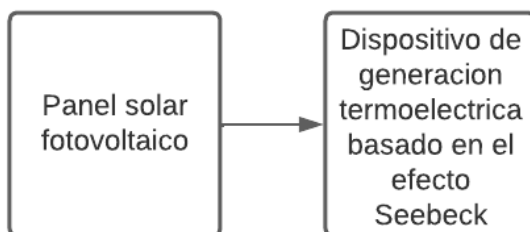


En la Figura 8 se encuentra el diagrama que describe los componentes que comprenden a un panel solar voltaico y a un generador termoeléctrico acoplados, se observa la forma en la que

están acoplados y la dirección que tienen el flujo de electrones en cada uno de ellos, relacionado directamente con la energía eléctrica generada.

Figura 9

Diagrama de bloques del sistema de generadores termoelectricos acoplados al panel fotovoltaico



Mediante la Figura 9 se expone el diagrama de bloques el cual se consideró para el sistema acoplado que contiene a los generadores termoelectricos y el panel fotovoltaico de forma que el desarrollo de este sea de forma metódica y ordenada.

De acuerdo con lo investigado en el capítulo anterior los paneles solares fotovoltaicos tienen características propias de acuerdo con su construcción y materiales usados, en la Tabla 5 se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de ellos de acuerdo con su construcción.

Tabla 5

Ventajas y desventajas de los paneles solares fotovoltaicos

Panel solar fotovoltaico	Ventajas	Desventajas
Mono Cristalino	La eficiencia de convertir la energía solar en electricidad es mayor que la de los paneles policristalinos y de película delgada. Ocupan menos espacio de instalación debido a su	Los costos de fabricación son más altos que los paneles policristalinos. Más sensible a las altas temperaturas, que pueden reducir su eficacia. Una menor resistencia a las

	<p>mayor eficiencia. Mayor durabilidad y longevidad. Mejor rendimiento con poca luz.</p>	<p>bolas y obstáculos puede afectar el rendimiento.</p>
Policristalino	<p>Menores costos de producción que los paneles Mono cristalinos. Excelente resistencia a las altas temperaturas, lo que los hace aptos para regiones con climas cálidos. La conversión eficiente de la energía solar en electricidad es buena. Mayor vida útil que la película delgada.</p>	<p>La eficiencia de convertir la energía solar en electricidad es menor que la de los paneles Mono cristalinos. Debido a su menor rendimiento, requieren más espacio de instalación. Menor rendimiento con poca luz. La apariencia es menos uniforme debido al proceso de fabricación.</p>
De película delgada	<p>Menor costo de producción en comparación con los paneles policristalinos y Mono cristalinos. La mayor resistencia a la sombra y la obstrucción los hace adecuados para aplicaciones de sombra parcial. Trabajan más eficazmente en condiciones de poca luz. Gran flexibilidad le permite ser utilizado en superficies curvas o no estándar.</p>	<p>La eficiencia de convertir la energía solar en electricidad es menor que la de los paneles policristalinos y Mono cristalinos. Requiere más espacio de instalación debido a un menor rendimiento. Vida más corta y degradación más rápida que las obleas de silicio cristalino. Requieren una gran área de instalación para producir la misma cantidad de energía que los paneles de cristal.</p>
Orgánicas y de polímero	<p>Menor costo de producción que las células de silicio cristalino. Alta flexibilidad y ligereza, lo que le permite integrarse en diversas superficies y aplicaciones. La capacidad de producir en grandes superficies y en diversas formas. Menos impacto ambiental que las obleas de silicio cristalino.</p>	<p>La eficiencia de convertir la luz en electricidad es baja en comparación con las obleas de silicio cristalino. Mayor degradación y vida útil más corta. Hipersensibilidad a las condiciones ambientales como la humedad y la temperatura. Esta tecnología aún está en desarrollo, lo que limita su disponibilidad y rendimiento actuales.</p>

Híbridas	Combinan diferentes tecnologías para aprovechar cada una. Pueden mejorar la eficiencia y la productividad de las juntas individuales. Mayor resistencia a diferentes condiciones climáticas y de luz.	El costo total de producción es mayor debido a la combinación de tecnologías. Mayor complejidad de instalación y mantenimiento. Disponibilidad limitada y oportunidad de mercado en comparación con los paneles solares convencionales.
----------	---	---

De acuerdo con la Tabla 2 los paneles monocristalinos presentan una mayor eficiencia comparado con los otros paneles juntamente con la Tabla 5 que realiza una comparativa de las ventajas y desventajas de los distintos modelos de paneles solares fotovoltaicos.

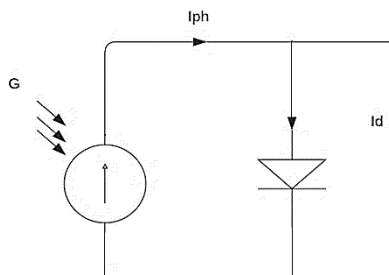
2.4 Modelo matemático del panel solar fotovoltaico

2.4.1 Corriente de salida en una celda solar

De acuerdo con la definición un panel solar fotovoltaico es un arreglo de varias celdas solares, el cual en forma de circuito se describe como un diodo tipo p-n, el cual a través del efecto fotoeléctrico convierte la irradiación solar en energía eléctrica. (Vera-Dávila, et.al, 2018)

Figura 10

Diagrama eléctrico celda solar

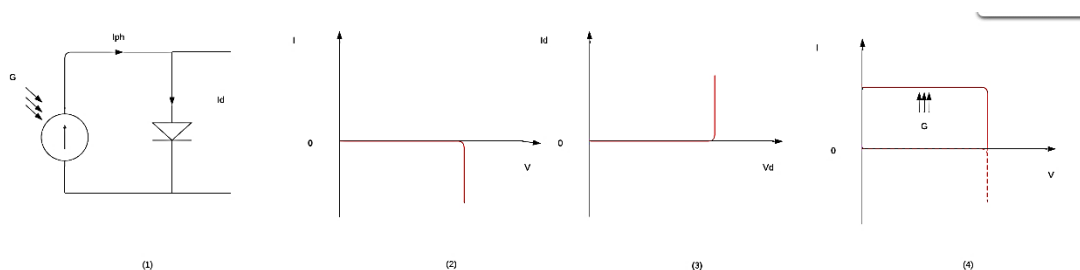


Nota: Adaptado de Vera-Dávila, A. G., Delgado-Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018, June 1). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de MATLAB. *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, 8(2), 343–356. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>

Al no contar con irradiación solar actúa como un diodo Shockley Sección 3 Figura 10, sin embargo, una vez se incide luz solar sobre el diodo este presenta una fuente de corriente proporcional a la irradiación dada sección 2 Figura 10, la corriente que presenta la celda solar es inversa la del diodo, de acuerdo con el incremento de la irradiación da como resultado una superposición entre ambos comportamientos sección 4 Figura 10.

Figura 11

Graficas de comportamiento de la corriente y voltaje de acuerdo con la irradiación

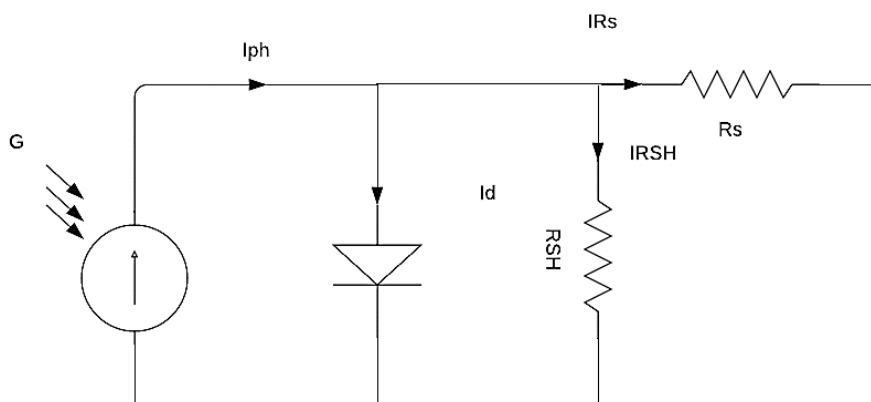


Nota: Adaptado de Vera-Dávila, A. G., Delgado-Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018, June 1). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de MATLAB. *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, 8(2), 343–356. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>

En la Figura 11 se observan 4 secciones la sección (1) se observa el circuito del diodo cuando es imbuido por irradiación, en la sección (2) se observa el comportamiento de la corriente del diodo cuando es imbuido por irradiación, en la sección (3) se observa el comportamiento de la corriente del diodo cuando no existe o existe poca irradiación, en la sección (4) se observa el comportamiento de la corriente en una celda de acuerdo con radiación. El circuito que se observa en la sección (1) de la Figura 11 presenta pérdidas debido a factores como las corrientes de fuga, la cual se representa con la resistencia Shunt (R_{sh}), para las caídas de voltaje en la salida se usa la resistencia en serie (R_s) y se usa la resistencia de carga (R_L) para representar la carga.

Figura 12

Diagrama eléctrico de una celda solar con pérdidas



Nota: Adaptado de Vera-Dávila, A. G., Delgado-Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018, June 1). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de MATLAB. *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, 8(2), 343–356. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>

La corriente de salida en la celda solar a partir de las leyes de Kirchhoff se determina en la Ecuación 1, donde (I_{PH}) es la corriente foto generada, (I_D) es la corriente del diodo, (I_{RHS}) es la corriente de pérdida de la resistencia en paralelo. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$I = I_{PH} - I_D - I_{RSH} \quad (1)$$

La corriente I_{ph} se define mediante la Ecuación 2 que corresponde a la corriente foto generada, donde (G) es la irradiación solar del ambiente, (G_{STC}) es la irradiación solar en condiciones de prueba, (A) es el área de la celda (cm^2), (J_{SC}) es la densidad de corriente de cortocircuito de la celda, (aJ_{SC}) es el coeficiente de temperatura de la densidad de corriente de cortocircuito, T es la temperatura bajo condiciones dadas, (T_{STC}) es la temperatura en condiciones de prueba. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} [A * J_{SC} + aJ_{SC}(T - T_{STC})] \quad (2)$$

2.4.2 Ecuación de la corriente del diodo

La Ecuación 3 describe la corriente en el diodo a partir de la ecuación de corriente del diodo Shockley, donde (I_0) es la corriente de saturación, (V_D) es el voltaje del diodo, (n) es igual al factor de idealidad del diodo, (V_T) es el voltaje térmico. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

Respecto a la ecuación de corriente de saturación del diodo existen varios autores que la describen, sin embargo para este caso se tomó en cuenta la Ecuación 4 que describe la corriente de saturación para el diseño propio de celdas solares, donde (J_{SC}) es la densidad de corriente de

cortocircuito de la celda, (A) es el área de la celda, (T_K) es la temperatura, (E_g) es la energía del GAP para el silicio, (E'_g) es la energía del GAP para el silicio para la temperatura estándar, (V_T) es el voltaje térmico, (V'_T) es el voltaje térmico a temperatura estándar, (V_{OC}) es el voltaje de circuito abierto de la celda, n es el factor de idealidad del diodo. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$I_0 = \frac{J_{SC} * A * T_K^3 * e^{-\frac{E_g}{V_T}}}{\left(e^{\frac{V_{OC}}{nV'_T}} - 1 \right) * T_{Kestandar}^3 * e^{-\frac{E'_g}{V'_T}}} \quad (4)$$

En el caso de que se cuenten con datos de fabricantes se puede tomar en cuenta la Ecuación 5 en la que se puede tomar en cuenta los valores de las hojas técnicas de paneles solares fotovoltaicos que ofrecen las compañías que los producen, donde (J_{SC}) es la densidad de corriente de cortocircuito de la celda, (A) es el área de la celda, (T_K) es la temperatura en grados Kelvin, (V_{OC}) es el voltaje de circuito abierto de la celda, n es el factor de idealidad del diodo, (R_{SH}) es la resistencia en paralelo. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$I_0 = \frac{J_{SC} * A - \frac{V_{OC}}{R_{SH}}}{\left(e^{\frac{V_{OC}}{nV_T}} - 1 \right)} \quad (5)$$

Respecto a la ecuación de voltaje del diodo se puede describir en la Ecuación 6, donde (I) es la corriente de salida de la celda solar, (R_S) es la resistencia en serie, (V) es el voltaje de salida de la celda solar. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$V_D = IR_S + V \quad (6)$$

Para el caso del voltaje en relación con la temperatura se describe en la Ecuación 7, donde (K) es la constante de Boltzmann, (q) es la carga del electrón. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$V_T = \frac{KT_K}{q} \quad (7)$$

Respecto al valor de (T_K) este es calculado en ° K al convertir la temperatura en ° C del ambiente, a través de la Ecuación 8 la cual maneja el valor de voltaje térmico a temperatura estándar. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$V_T' = \frac{KT_K}{q} \quad (8)$$

En la Ecuación 9 se describe energía del gap, donde (E_g) es la energía del GAP dependiendo de la temperatura, (E_{g0}) es la energía del GAP dependiendo del material del semiconductor, (T_K) es la temperatura en Kelvin, (α_{GAP}) es un parámetro dependiente de la temperatura del material del semiconductor, (β_{GAP}) es un parámetro de temperatura dependiente del material del semiconductor. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$Eg(T_K) = Eg_0 - \frac{\alpha_{GAP} T_K^2}{T_K + \beta_{GAP}} \quad (9)$$

En la Ecuación 10 Se describe la energía del gap a temperatura estándar, donde (E_{g'}) es la energía del GAP dependiendo de la temperatura, (E_{g0}) es la energía del GAP dependiendo del material del semiconductor, (T_K) es la temperatura en Kelvin, (α_{GAP}) es un parámetro dependiente

de la temperatura del material del semiconductor, (β_{GAP}) es un parámetro de temperatura dependiente del material del semiconductor. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$Eg(T_K)' = Eg_0 - \frac{\alpha_{GAP} T_K^2}{T_K + \beta_{GAP}} \quad (10)$$

La ecuación que describe las pérdidas debido a la corriente de fuga es la Ecuación 11, donde (R_S) es la resistencia en serie, (R_{SH}) es la resistencia en paralelo, (I) es la corriente de la resistencia en paralelo. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$I_{RSH} = \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (11)$$

La densidad de corriente es descrita en la Ecuación 12 donde (I_{SC}) es la corriente de cortocircuito, (A) es el área de la célula. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{A} \quad (12)$$

El voltaje del circuito abierto (V_{oc}) en la Ecuación 13 donde ($V_{OCPanel}$) es el voltaje de circuito abierto en el panel y (N) es el número de células. (Sánchez & Rodríguez, 2015)

$$V_{OC} = \frac{V_{OCPanel}}{N} \quad (13)$$

2.4.3 Potencia de salida del módulo fotovoltaico

La potencia de salida de un módulo fotovoltaico tomando en cuenta la dependencia de la irradiación solar está definida por la Ecuación 14, donde P_m es la potencia media de salida, (P_{mSTC}) es la potencia de salida en condiciones de pruebas, (G) es la irradiación en el ambiente, (G_{STC}) es

la irradiación en condiciones de prueba, (y) es el coeficiente de degradación del panel en función de la temperatura, (T_c) es la temperatura de la célula solar. (Kafui & Farkaz, 2019)

$$P_m = P_{m_{STC}} * \frac{G}{G_{STC}} * (1 - y(T_c - 20)) \quad (14)$$

Para el caso de la resistencia se toma en cuenta el voltaje de cortocircuito y la potencia nominal de las hojas de fabricante del panel fotovoltaico descrito en la Ecuación 15, donde (V) es el voltaje de salida del panel, (P) es la potencia entregada por el panel. (Kafui & Farkaz, 2019)

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (15)$$

2.4.4 Temperatura en el módulo fotovoltaico

La Ecuación 16 define la temperatura del módulo (T_c) en base a la irradiación solar y valores de temperatura nominal, donde (T_a) es la temperatura ambiente y (T_{NOCT}) es la temperatura de operación nominal de las células, (G) es la irradiación solar, (G_{STC}) es la irradiación solar en condiciones de prueba. (Kafui & Farkaz, 2019)

$$T_c = T_a + \frac{G}{G_{STC}} * (T_{NOCT} - 20) \quad (16)$$

2.4.5 Irradiación solar de acuerdo con las horas sol pico

La Ecuación 16 define la irradiación solar (G) por horas sol pico, en base a los valores de irradiación medida en kWh/día, donde (HSP) son las horas sol pico, (G_{dia}) es la irradiación por día. (CONELEC, 2008)

$$G = \frac{G_{dia}}{HSP} \quad (17)$$

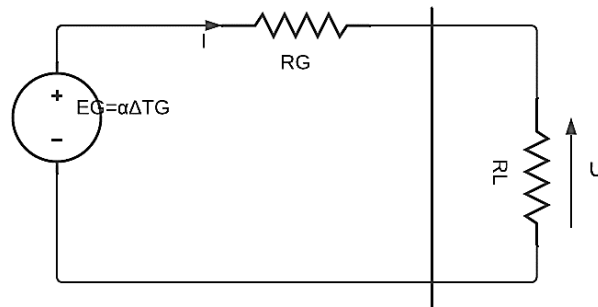
2.5 Modelo matemático del generador termoeléctrico

2.5.1 Modelo eléctrico y térmico del generador termoeléctrico

Dentro de la Figura 13 se presenta el diagrama eléctrico del generador termoeléctrico el cual cuenta con una fuente de voltaje, una resistencia en serie R_G que se refiere a la resistencia interna del generador termoeléctrico, y R_L que es la resistencia de carga.

Figura 13

Diagrama eléctrico de un generador termoeléctrico



Nota: Adaptado de Mirza, A. F., Mansoor, M., Zerbakht, K., Javed, M. Y., Zafar, M. H., & Khan, N. M. (2021). High-efficiency hybrid PV-TEG system with intelligent control to harvest maximum energy under various non-static operating conditions. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128643. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128643

La Ecuación 17 describe el coeficiente de Seebeck, donde (V_m) es el voltaje máximo del módulo y (ΔT) es el diferencial de temperatura. (Yilmaz, et.al, 2022)

$$S = \frac{2V_m}{\Delta T} \quad (18)$$

Para describir el coeficiente de Seebeck medio en el módulo donde todas las células están conectadas se emplea la Ecuación 18, donde (N) es el número de elementos del generador termoeléctrico por el coeficiente de Seebeck del material (S). (Yilmaz, et.al, 2022)

$$S_m = NS \quad (19)$$

Respecto a la potencia máxima entregada por el TEG en condiciones ideales (P_{cM}) su ecuación es la Ecuación 19, donde α es el coeficiente de Seebeck que mide la capacidad del material termoeléctrico para generar un voltaje en respuesta la diferencia de temperatura, la diferencia de temperatura entre el lado caliente y el lado frío (ΔTG) y (RG) es la resistencia total del generador termoeléctrico. (Lossec, et.al, 2010)

$$P_{cM} = \frac{(\alpha \Delta TG)^2}{4RG} \quad (20)$$

Usando la eficiencia de conversión de energía del dispositivo (η_{conv}) se puede calcular la potencia máxima utilizable (P_{uM}) esta descrita en la Ecuación 20. (Lossec, et.al, 2010)

$$P_{uM} = \eta_{conv} P_{cM} \quad (21)$$

En el caso del voltaje máximo para el generador eléctrico ($V_{max, TEG}$) se describe en la Ecuación 21, donde (VOC) es el voltaje en circuito abierto, (S_m) es el coeficiente de Seebeck del módulo, (ΔT) es el diferencial de temperatura. (Yilmaz, et.al, 2022)

$$V_{max, TEG} = VOC = S_m \Delta T \quad (22)$$

Para el caso de la resistencia del material (R_m) puede ser calculada a través de la Ecuación 22, donde (V^2_m) es el voltaje máximo del módulo y (P_m) es la potencia máxima del módulo. (Yilmaz, et.al, 2022)

$$R_m = R_L = \frac{V^2_m}{P_m} \quad (23)$$

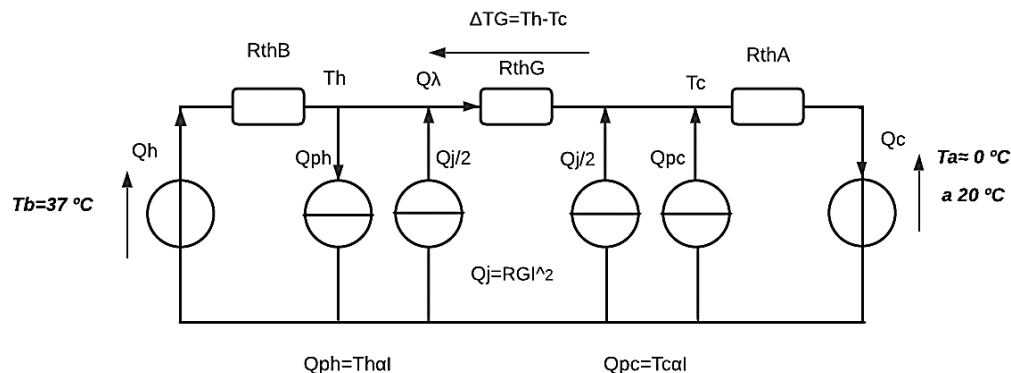
Para el caso de la corriente máxima del módulo ($I_{max, TEG}$) se describe en la Ecuación 23. (Yilmaz, et.al, 2022)

$$I_{max, TEG} = I_{SC} = \frac{S_m \Delta T}{R_m} \quad (24)$$

A través de la Figura 14 se ilustra el modelo térmico del generador termoeléctrico en el cual se observan distintas variables entre ellas valores de temperatura del lado caliente (Q_h) y del lado frío (Q_c), así pues, valores de resistencia interna (R_{th}), el flujo de calor (Q_j) que son variables que describen la interacción de la temperatura entre el lado caliente y frío del generador termoeléctrico.

Figura 14

Diagrama térmico de un generador termoeléctrico



Nota. Adaptado de Lossec, M., Multon, B., Ben Ahmed, H., & Goupil, C. (2010, September 17). Thermoelectric generator placed on the human body: system modeling and energy conversion improvements. *The European Physical Journal Applied Physics*, 52(1), 11103. <https://doi.org/10.1051/epjap/2010121>

Tomando en cuenta el diagrama térmico que se muestra en la Figura 14 se modela la ecuación que describe la relación de potencia y energía térmica para el lado caliente en la Ecuación 24, donde la relación de flujo térmico en el lado caliente (Q_H), el coeficiente de Seebeck medio (S_m), la variación de temperatura ($T_H - T_C$), la conductividad térmica media (K_m), la temperatura del lado caliente (T_H), la temperatura del lado frío (T_C), la pérdida de potencia por efecto Joule ($I^2 \frac{R_m}{2}$), (I) corriente del módulo. (Yilmaz, et.al, 2022)

$$Q_H = S_m T_H + K_m (T_H - T_C) - I^2 \frac{R_m}{2} \quad (25)$$

Para el lado frío la ecuación que describe el comportamiento es la Ecuación 25, donde la relación de flujo térmico en el lado caliente (Q_C), el coeficiente de Seebeck medio (S_m), la variación de temperatura ($T_H - T_C$), la conductividad térmica media (K_m), la temperatura del

lado caliente (TH), la temperatura del lado frío (TC), la pérdida de potencia por efecto Joule ($I^2 \frac{R_m}{2}$), (I) corriente del módulo. (Yilmaz, et.al, 2022)

$$Q_C = S_m I T_C + K_m (T_H - T_C) + \frac{I^2 R_m}{2} \quad (26)$$

Entonces la potencia generada de acuerdo con la variación de la temperatura entre los dos lados se describe en la Ecuación 26. (Yilmaz, et.al, 2022)

$$P = Q_H - Q_C = S_m I (T_H - T_C) - I^2 R_m \quad (27)$$

2.6 Modelo matemático para el acoplamiento de generadores termoeléctricos al panel solar fotovoltaico

2.6.1 Transferencia térmica

Para el caso del acoplamiento se considera las 3 formas de transferencia térmica las cuales son Radiación, Conducción, Convección las cuales están descritas en la Tabla 8.

Tabla 6

Tipos de transferencia de calor

<i>Tipo de transferencia de calor</i>	<i>Autor</i>	<i>Descripción</i>
Radiación	(«Mecanismos de Transferencia de Calor», 2021)	La transferencia de calor por radiación se da por la incidencia de ondas infrarrojas, luz visible u otra radiación electromagnética.
Conducción	(«Mecanismos de Transferencia	La transferencia de calor por conducción se da por la diferencia de temperatura entre dos cuerpos solidos al entrar en contacto.

Convección	de Calor», 2021) («Mecanismos de Transferencia de Calor», 2021)	La transferencia de calor por convección se da por el movimiento de fluidos.
------------	---	--

2.6.2 Ley de Fourier

La conductividad térmica de los materiales es la capacidad de conducir calor a través del material. La Ecuación 27 detalla la ley de Fourier (1827) la cual describe el comportamiento de la temperatura a través de un cuerpo sólido, de acuerdo con la variación de temperatura (dT) y la variación de espesor (dx) por el Área (A).

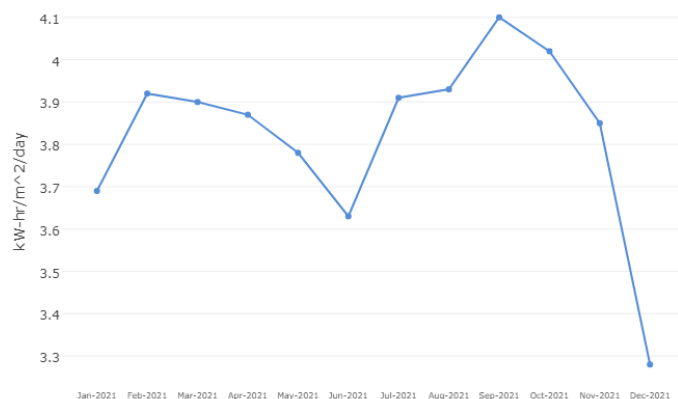
$$Q_{condsolid} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (28)$$

2.7 Irradiación solar de corta onda en el cantón Ibarra

A partir de las coordenadas 0.3487 -78.1233 localizadas en el centro de la ciudad se obtuvo los valores de irradiación de onda corta, a lo largo del año 2021, los cuales son proporcionados por la NASA.

Figura 15

Irradiación solar coordenadas 0.3487 -78.1233



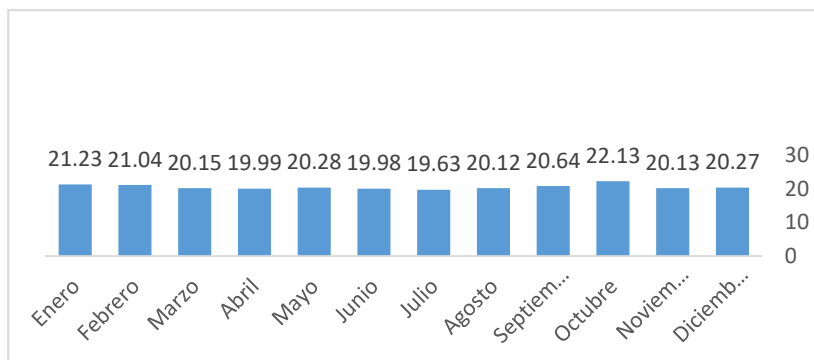
Nota. Los datos se obtuvieron de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Project financiado a través del Programa de Ciencia de la Tierra / Ciencia Aplicada de la NASA.

2.8 Temperatura en el cantón Ibarra

A partir de las coordenadas 0.3487 -78.1233 localizadas en el centro de la ciudad se obtuvo los valores de temperatura máximos y mínimos a lo largo del año 2021, detallados en la Figura 16 y Figura 17 respectivamente, los cuales fueron proporcionados por la NASA a través de MERRA-2 que es el sistema encargado de tomar datos de la temperatura en distintas partes del mundo.

Figura 16

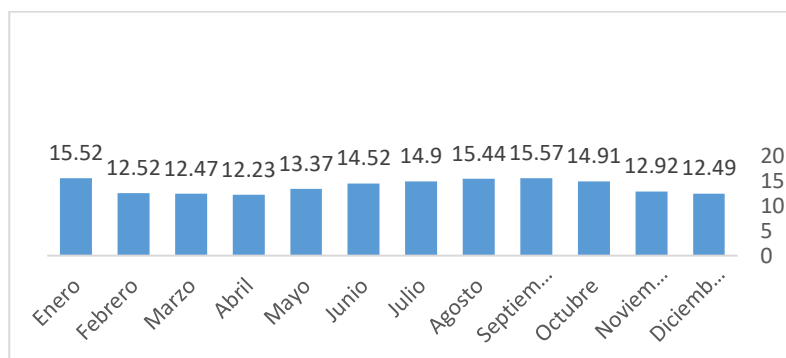
Temperatura máxima a 2 metros (° C) en las coordenadas 0.3487 -78.1233



Nota. Los datos se obtuvieron de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Project financiado a través del Programa de Ciencia de la Tierra / Ciencia Aplicada de la NASA.

Figura 17

Temperatura mínima a 2 metros (° C) en las coordenadas 0.3487 -78.1233



Nota. Los datos se obtuvieron de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Project financiado a través del Programa de Ciencia de la Tierra / Ciencia Aplicada de la NASA.

2.9 Selección del panel fotovoltaico

Para el caso de la selección del panel fotovoltaico, se optó por realizar una comparativa entre varios modelos de paneles fotovoltaicos Mono faciales que se encuentran en el mercado de acuerdo con su potencia entregada, eficiencia, Voltaje de funcionamiento óptimo y Corriente de funcionamiento óptima.

Tabla 7

Comparativa de varios paneles fotovoltaicos de varias marcas

<i>Modelo del panel</i>	<i>Potencia entregada (W)</i>	<i>Eficiencia (%)</i>	<i>Voltaje de funcionamiento (V)</i>	<i>Corriente de funcionamiento (A)</i>
HiKu7 Mono PERC CS7N-675MS	675	21.7%	38.9	17.36
Mono módulo Solar 410W DONGKE	410	20.50%	41	10.01
Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 555-575W	585	22.65%	42.52	13.76
Cheetah HC 60M 345 Watt	345	20.45%	34.12	10.11
LR4-72HTH-585M	585	22.6%	44.21	13.24
M12 HJT GSM560	560	23.3%	31.2	18.08

Tal como se observa en la Tabla 7 los paneles Mono cristalinos de silicio presentan una eficiencia en un rango de 20% a 23% existen varios modelos y de acuerdo con su volumen y dopaje del semiconductor puede variar la misma.

De acuerdo con la Tabla 7 el panel que presenta una mayor eficiencia es el M12 HJT GSM 560 el cual fue el seleccionado para el modelado, debido a que de acuerdo con su hoja de datos presenta una eficiencia mayor comparada con los otros modelos descritos en la Tabla 7.

Tabla 8

Valores de potencia, voltaje y corriente descritos en la hoja del fabricante del panel M12 HJT GSM560

M12 HJT GSM560	
Máxima potencia (Pmax)	560 W
Máximo punto de voltaje (Vmp)	31.2 V
Máximo punto de corriente (Imp)	18.08 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	37.2 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	19.51 A
Eficiencia del módulo STC (%)	23.3
Máximo voltaje del sistema	1500 VDC
Temperatura de operación	-40 a 85 ° C
Temperatura nominal de operación de las células	45 ° C
Factor de tolerancia de potencia	0 a +5W
Coeficiente de temperatura de Pmax	-0.340%/° C
Coeficiente de temperatura de Voc	-0.25%/° C
Coeficiente de temperatura de Isc	0.040%/° C
STC	800W/m2, Temperatura ambiente 20 ° C
Dimensiones del panel	2185*1098*35mm
Número de células	100
Dimensiones de las células	210mm*210mm
Corriente de operación de las células	4.75A

Nota. En la Tabla 8 se describen los valores resultantes del panel fotovoltaico tras las pruebas realizadas por los fabricantes, por *M12 HJT Solar Module Monocrystlline 560W*. (n.d.). GreenSunSolar. Retrieved June 2, 2023.

2.10 Irradiación máxima de acuerdo con las horas de sol pico

La irradiación máxima se calcula de acuerdo con las horas sol pico (HSP) es decir que de la cantidad de kWh/día se divide para la cantidad de HSP la cual es definida en la Ecuación 17, la Tabla 17 presenta un aproximado de irradiación de acuerdo con varias cantidades de horas sol pico en el día y considerando que los kWh/día son de 4800.

Tabla 9

Valores de la irradiación máxima de acuerdo con las horas sol pico

Horas sol pico	$\frac{W}{m^2}$
2	2400
4	1200
6	800
8	600
10	480
12	400

La irradiación máxima tomada para las simulaciones será de 800 W/m² considerando que las horas sol pico en Ecuador oscila entre 4 y 6 horas, sin embargo, por casos de estudio se emplea el valor de 800 W/m².

2.11 Cálculo de los valores de operación característicos del panel fotovoltaico

En la Tabla 9 se resume los valores obtenidos de las Ecuaciones 10, 11, 12, 13, 14, 15 de las cuales se obtuvieron los valores de operación de las celdas que contienen el panel fotovoltaico.

Tabla 10

Valores de operación de las celdas del panel fotovoltaico

Parámetro	Valor
A (Área)	441[cm ²]
J _{SC} (Densidad de corriente de cortocircuito)	0.041 [A/cm ²]
G _{STC} (irradiación solar en condiciones de prueba)	800 [W/m ²]
V _{OC} (Voltaje de circuito abierto en la celda)	0.372 [V]
α J _{SC} (Coeficiente de la densidad de corriente en cortocircuito)	9.07029 * 10 ⁻⁷ . [A/ ° C]
T _{STC} (Temperatura en condiciones de prueba)	20 [° C]
K (Constante de Boltzmann)	1.38 x 10 ⁻²³ J/K
q (carga elemental)	1.602 x 10 ⁻¹⁹ C
E _{g0} (Energía de la brecha de banda)	1.166 [eV]
α _{GAP} (Coeficiente de temperatura de la brecha de banda)	4.73x10 ⁻⁴ [eV/K]
β _{GAP} (Temperatura de la brecha de banda)	636 [K]
R (Resistencia en paralelo)	2.47 [Ω]
n (Factor de idealidad)	1.1
P _m (Potencia de salida del panel, irradiación de 800W/m ²)	510.3[W]
T _c (Temperatura de las células)	48.125[° C]

De acuerdo a la Figura 15 los valores de irradiación solar en las coordenadas 0.3487 - 78.1233 oscilan entre 2 [kW/m²] a 5 [kW/m²] además los valores de temperatura descritos en las Figuras 16 y 17 oscilan entre 10 [° C] a 22 [° C] mediante la Ecuación 15 el valor de la potencia teórica que se obtiene en el panel fotovoltaico fue de 510.3 [W] con una irradiación solar de 800 [W/m²] y temperatura ambiente de 22 [° C], a pesar de que se empleó valores de temperatura máximo y de irradiación solar mínima, la potencia teórica obtenida está acorde a la potencia

obtenida a través de los valores STC (condiciones de prueba estándar) en donde la temperatura es de 20 [° C] y el valor de irradiación es de 800W/m².

De acuerdo al estudio de Sánchez & Rodríguez, (2015) los valores de operación del panel fotovoltaico TYN-85S5 en condiciones de irradiación de 1234 W/m² y temperatura de 37 ° C presentan valores mayores de corriente de cortocircuito, sin embargo debido al aumento de temperatura con respecto a la temperatura de pruebas 25 [° C] de los fabricantes afecta los valores de salida de voltaje de circuito abierto lo cual nos indica que al tener una temperatura menor y al contar con una irradiación solar mayor es posible el obtener valores superiores de voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuito.

Kafui, Seres y Farkas (2019) mediante su trabajo de investigación “Comparación de la eficiencia en diferentes módulos fotovoltaicos”, realizaron pruebas en diferentes paneles con valores de potencia de entre 40 [W] a 180 [W] en donde al variar la temperatura entre valores de 37 ° C y una irradiación de 935 W/m² se observó que los valores de salida de potencia dependen netamente de las condiciones en las que se opera y de acuerdo a el aumento de temperatura la potencia de salida disminuye en el panel de igual forma en el caso de la reducción de la irradiación sobre el panel.

Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar las condiciones reales de operación, como la temperatura e irradiación solar, para obtener una estimación más precisa de potencia de salida del panel fotovoltaico. Los resultados obtenidos en la Tabla 9 se alinean con trabajos anteriores, los cuales respaldan la relevancia y validez de los resultados obtenidos.

2.12 Modelo matemático en Simulink del panel fotovoltaico

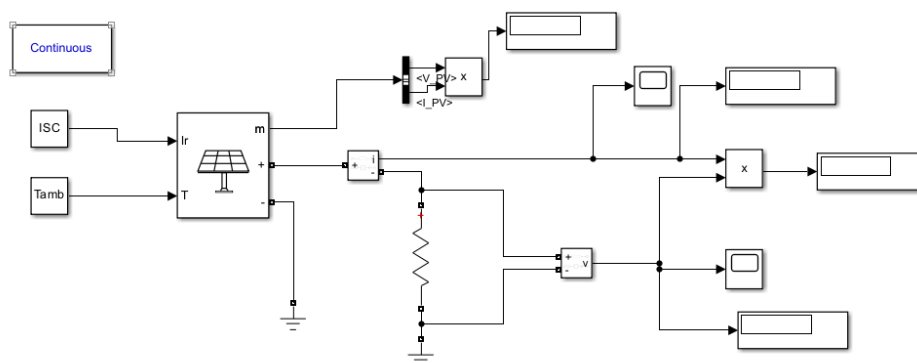
El modelo matemático desarrollado en Simulink utiliza las Ecuaciones 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 que dan como resultado el modelado para las celdas solares las cuales comprenden el panel solar M12 HJT GSM560, considerando que la agrupación de celdas que contiene el panel es de 100.

2.12.1 Modelo en Simulink de la generación del panel fotovoltaico

En la Figura 13 se observa el diagrama de bloques desarrollado en la Simulink través de las Ecuaciones 12, 13, 14, 15, que describen la relación entre los valores de voltaje, corriente, temperatura, cantidad de células, eficiencia y valores nominales en el panel fotovoltaico, el cual fue empleado para el análisis de la potencia entregada por el panel solar fotovoltaico, de acuerdo con los valores de irradiación solar ($\frac{W}{m^2}$) y temperatura en el ambiente ($^{\circ}C$).

Figura 18

Modelo de la generación del panel fotovoltaico



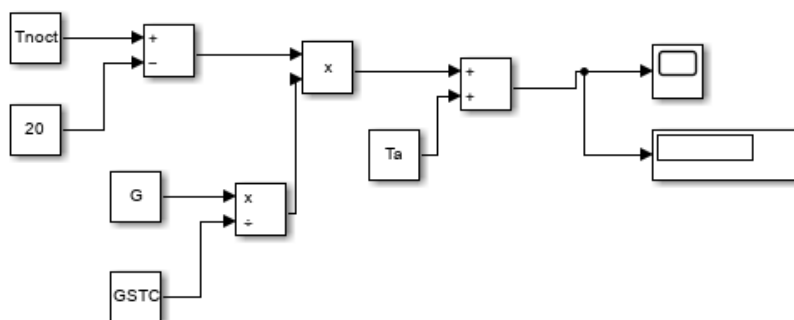
2.12.2 Modelo en Simulink de la temperatura en las células del panel fotovoltaico

En la Figura 14 se observa el diagrama de bloques desarrollado en Simulink a través de la Ecuación 16, que describen la relación de temperatura ambiente y la temperatura de las células, el

cual fue empleado para el análisis de la temperatura en las células del panel solar fotovoltaico, de acuerdo los valores de NOTC (Temperatura de operación nominal de la célula) y STC (Condiciones de prueba estándar).

Figura 19

Modelo de la temperatura del panel fotovoltaico



2.13 Selección del generador termoelectrico

Para la selección del módulo de generación termoelectrica se consideró una ficha técnica la cual compara valores de corriente, voltaje, potencia, dimensiones entre otros de distintos generadores termoelectricos, a continuación, se describe una tabla con varios de ellos de los cuales se elegirá uno de acuerdo con sus características técnicas.

Tabla 11

Valores de potencia, voltaje y corriente descritos de varios generadores termoelectricos

TEG P/N	Dimensiones		V/K	Voc	Carga coincidente e ohmios	Voltaje de salida combinado	Potencia de salida coincidente W	λ - W/°C	Flujo de calor a través del módulo W
	Lado caliente	Lado Frio							
TEG31- 2.8-1.2	30×30	30×30	0.02 273	2.5	0.3	0.84	6.5	1	154.8

TEG49- 4.5-2.0	62×62	62×62	0.03 091	3.4	2	1.33	13	1.3	220.3
TEG241- 1.0-1.2	40×40	40×40	0.11 000	12.1	10	6	3.6	1	72
TEG71- 1.4-1.6	30×30	30×30	0.04 636	5.1	1.9	1.92	3.9	0.5	84.8

Nota. Tomado de *Thermoelectric generator*. (n.d.). EVERREDtronics – Empower the future.

Para obtener los valores descritos en la Tabla 10 EVERREDTRONICS realizo pruebas con una diferencia de temperatura entre el lado frio de 50 ° C y el lado caliente de 160 ° C. Para este caso se toma en cuenta el módulo TEG71-1.4-1.6 debido a sus características de potencia voltaje y resistencia los cuales concuerdan con la hoja de datos del fabricante.

2.14 Modelo matemático en Simulink del generador termoeléctrico

El modelo matemático desarrollado en Simulink utiliza las Ecuaciones 18 a la 23 que dan como resultado el modelado del generador termoeléctrico (TEG) el cual comprende un área de 3cmx3cmx0.7cm que cuenta con 40 uniones P-N que están conectadas mediante cobre y que en su superficie cuenta con un contacto de cerámica sellado permitiendo que el comportamiento de los materiales sea adecuado para la generación de energía eléctrica a través del gradiente de temperatura.

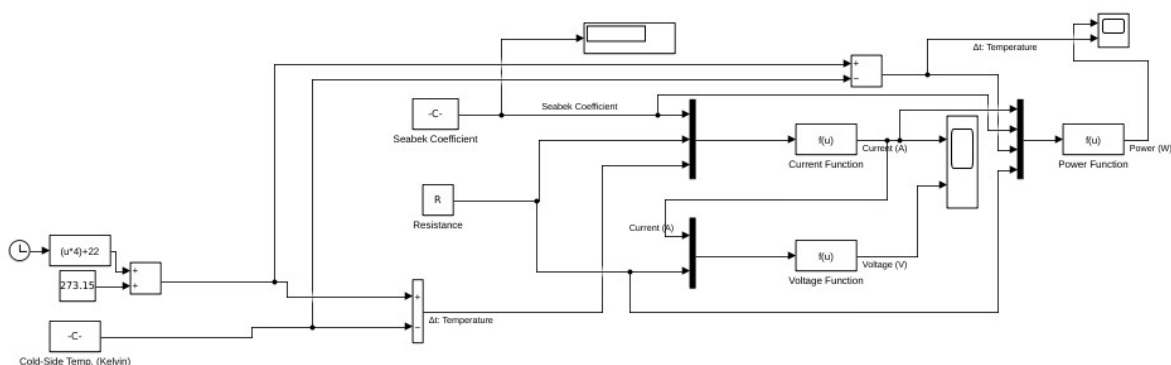
2.14.1 Modelo en Simulink de la temperatura en las células del panel fotovoltaico

Dentro de la Figura 18 se observa el diagrama de bloques desarrollado en la Simulink mediante las Ecuaciones 24, 25,26 el cual permite visualizar la potencia entregada por el generador

termoeléctrico, de acuerdo con la variación temperatura en el ambiente, respecto a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) que presenta la parte posterior del panel fotovoltaico seleccionado.

Figura 20

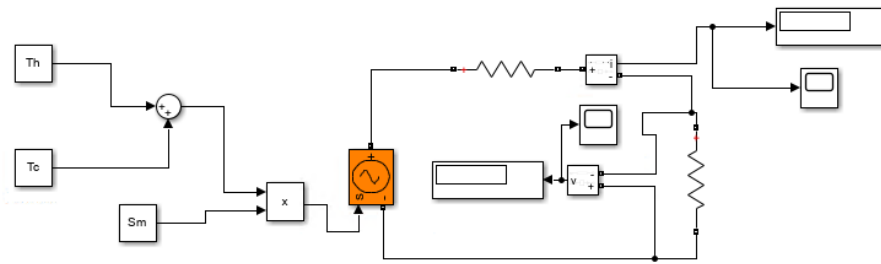
Modelo eléctrico y térmico del generador termoeléctrico



Mediante la Figura 19 se observa el diagrama de bloques desarrollado en la Simulink a través de las ecuaciones matemáticas que describen la relación de temperatura y potencia eléctrica en el generador termoeléctrico, el cual fue empleado para el análisis de la potencia entregada por el generador termoeléctrico, de acuerdo a la variación temperatura en el ambiente, respecto a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) que presenta la parte posterior del panel fotovoltaico seleccionado de forma que las respuestas se obtengan a través de medidores ideales.

Figura 21

Modelo eléctrico y térmico del generador termoeléctrico con medidores ideales

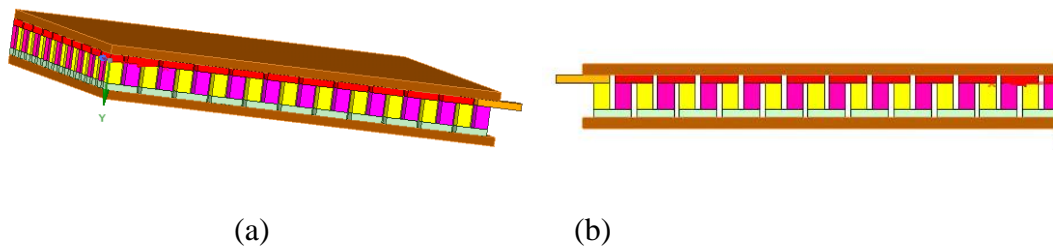


2.15 Modelo Estructural del generador termoeléctrico

La estructura del generador termoeléctrico es de doble torre una tipo-p y otra tipo-n el contacto térmico es de cerámica debido a que ese es el material usado en los generadores termoeléctricos. La Figura 19 representa la estructura del generador termoeléctrico sección (a) vista en ángulo, sección (b) vista lateral.

Figura 22

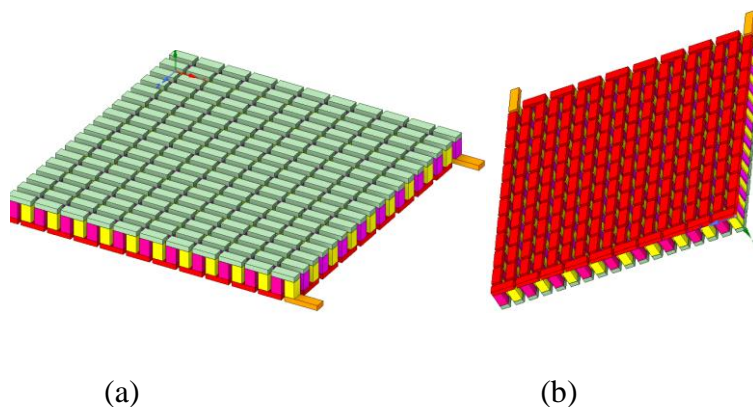
Modelo estructural en SolidWorks del generador termoeléctrico



Por medio de la Figura 20 se representa la estructura del generador termoeléctrico sin la placa cerámica de contacto sección (a) vista superior en Angulo del lado frío, sección (b) vista lateral en Angulo del lado caliente.

Figura 23

Modelo estructural en SolidWorks del generador termoeléctrico sin placa de contacto



2.16 Selección de materiales y diseño de acoplamiento

La conductividad térmica de los materiales es la capacidad de conducir calor a través del material. En la Tabla 11 se observan los valores de la conductividad térmica que presentan distintos materiales, entre ellos destacan el cobre y el aluminio por su alta capacidad de conducción térmica, debido a su ligereza se opta por el uso de aluminio para el acoplamiento.

Tabla 12

Valores de la conductividad térmica de algunos materiales

<i>Material</i>	<i>k (W/m·K)</i>	<i>Sustancia</i>	<i>k (W/m·K)</i>
Aluminio	205	Concreto	0.8
Latón	109	Corcho	0.04
Cobre	385	Fieltro	0.04
Plomo	34.7	Fibra de vidrio	0.04
Mercurio	8.3	Placa de cerámica	3
Plata	406	Vidrio	0.8
Acero	50.2	Poliestireno	0.027
Ladrillo aislante	0.15	Madera	0.12-0.04
Ladrillo rojo	0.6	Lana mineral	0.04

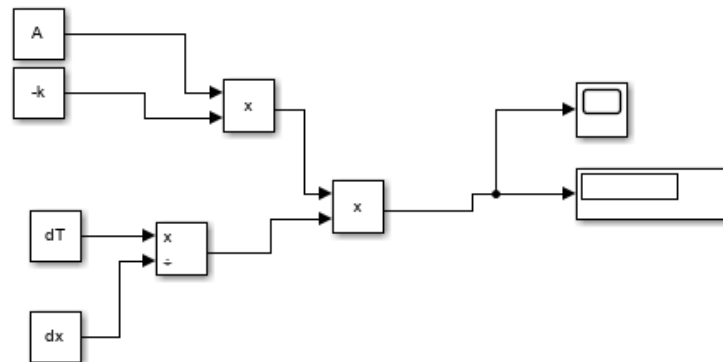
Nota. Por Jiménez. (n.d.). TRANSFERENCIA DE CALOR. Instituto Tecnológico De Costa Rica. Retrieved May 11, 2023

2.16.1 Modelo en Simulink de la temperatura del acoplamiento

Dentro de la Figura 21 se observa el diagrama de bloques desarrollado en la Simulink a través de la ley de Fourier de la Ecuación 27 que describe el comportamiento de temperatura en un cuerpo sólido, el cual fue empleado para el análisis de la temperatura ($^{\circ}$ C) que tendrá el acoplamiento debido a el contacto con el panel fotovoltaico y los generadores termoeléctricos.

Figura 24

Modelo de la temperatura del acoplamiento

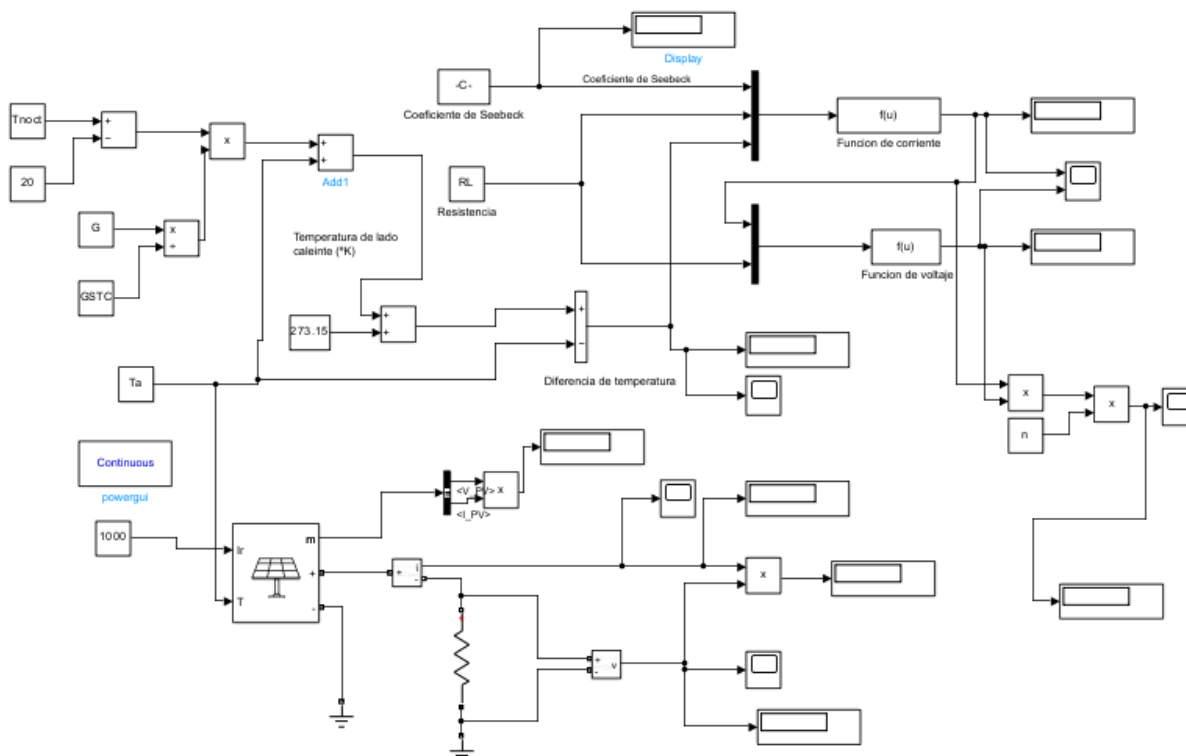


2.17 Modelo en Simulink del sistema entre los generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico

A través de la Figura 26 se observa el diagrama de bloques en Simulink desarrollado mediante los modelos matemáticos descritos de forma que se obtengan valores de voltaje y corriente para determinar la potencia entregada por los generadores termoeléctricos (TEG71-1.4-1.6) acoplados al panel fotovoltaico (M12 HJT GSM560) de acuerdo con la variación de temperatura en la parte posterior del panel respecto a la temperatura ambiente.

Figura 25

Modelo del sistema de generadores termoeléctricos acoplados al panel fotovoltaico a través de Simulink

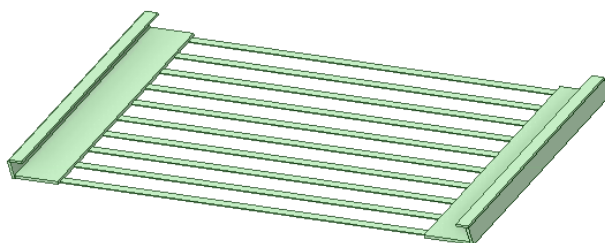


2.18 Modelo estructural del acoplamiento para los generadores termoeléctricos al panel fotovoltaico

Se consideró que el modelo estructural presentado en la Figura 26 tipo bandeja que usa aluminio como base y sus dimensiones son de 500mm*1134mm*49mm permite mantener los generadores termoeléctricos en contacto con el panel fotovoltaico, de forma que la estructura no afecta a la generación del panel y sirve de sujeción para los generadores termoeléctricos.

Figura 26

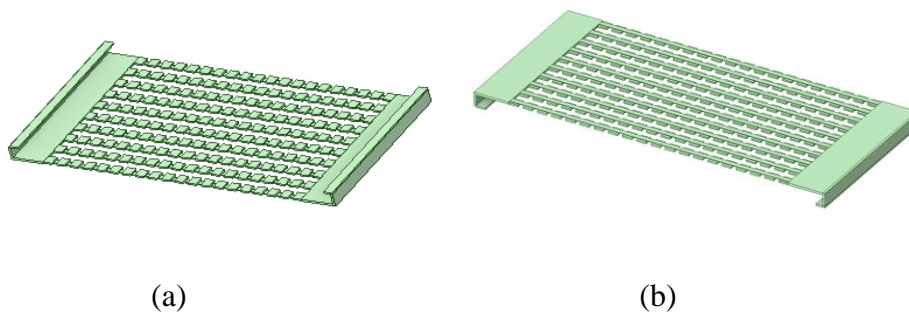
Modelo estructural para el acoplamiento de los generadores termoeléctricos al panel fotovoltaico



Para este caso de estudio se ocupan dos bandejas en las que de forma individual caben 200 generadores termoeléctricos con dimensiones de 30mm*30mm*4mm, en este caso al tener dos bandejas se ocupan 400 generadores termoeléctricos; dentro de la figura 27 se presenta la estructura de aluminio con los paneles termoeléctricos montados en ella la sección (a) es la cara con la que tendrían contacto los generadores termoeléctricos, la sección (b) es la vista superior de como estarían montados los generadores termoeléctricos.

Figura 27

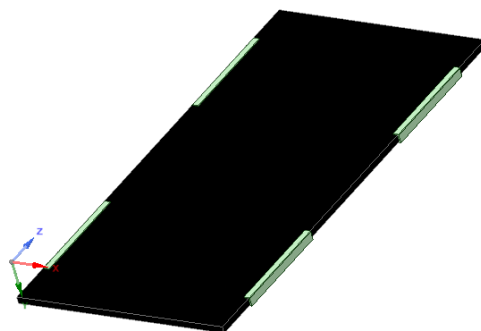
Modelo estructural del acoplamiento de los generadores termoeléctricos



En la figura 28 se describe como se ve el acoplamiento montado en el panel fotovoltaico de forma que afecte a la captación de luz visible por parte de las células fotovoltaicas, reduciendo la eficiencia de estas.

Figura 28

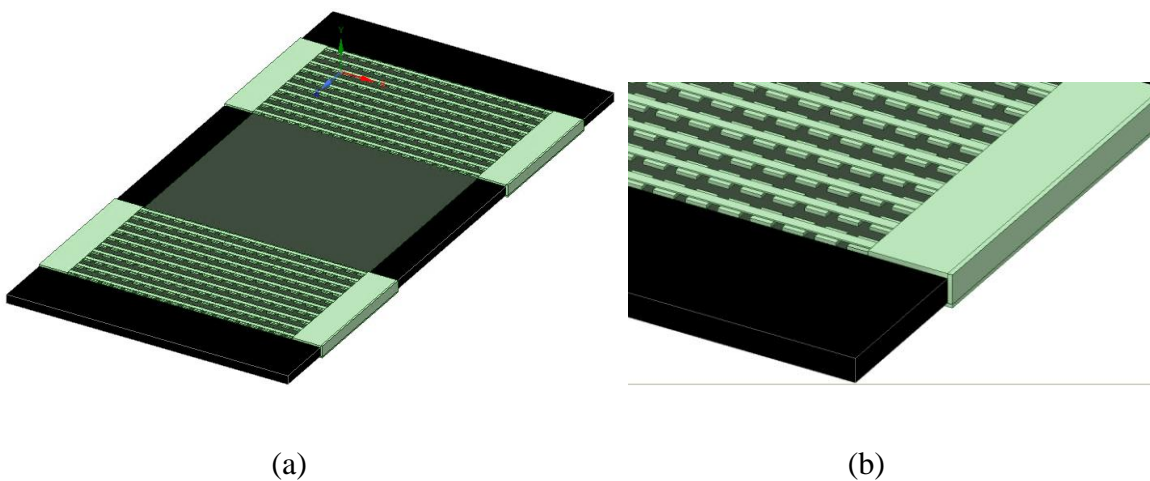
Modelo estructural del acoplamiento de los generadores termoeléctricos y el panel fotovoltaico lado superior



Mediante la Figura 29 en la sección (a) se detalla cómo se ve el acoplamiento de los 400 generadores termoeléctricos con el panel fotovoltaico desde la parte posterior contenidos en los acoplamientos tipo bandeja, la sección (b) refleja cómo se ve de forma cercana el acoplamiento.

Figura 29

Modelo estructural del acoplamiento de los generadores termoeléctricos y el panel fotovoltaico lado posterior



La estructura observable en las Figuras 26, 27, 28, 29 presentada dos bandejas que conecta 200 generadores termoeléctricos de forma individual a la parte posterior del panel fotovoltaico. Esta configuración permite aprovechar tanto la irradiación solar como el calor residual del panel, aumentando así la eficiencia y potencia de salida del sistema. Además, el diseño compacto de la

bandeja proporciona una mayor densidad de energía y un uso más eficiente del espacio. La combinación de generación de energía fotovoltaica y térmica proporciona un sistema híbrido versátil y flexible para diferentes climas, diversificando las fuentes de energía y maximizando la producción del sistema global. Estas características hacen que el generador termoeléctrico sea una solución para la producción de energía renovable, mediante el aprovechamiento de calor residual en el panel fotovoltaico.

2.19 Discusión de resultados

El modelo en Simulink de la Figura 18 obtenido a partir de las Ecuaciones de la 1 a la 15 permite la obtención de valores de potencia de acuerdo con variación de irradiación solar y temperatura ambiente de forma que mediante el modelo mencionado se puede analizar una gran cantidad de valores que permiten proyectar el comportamiento del panel en distintas condiciones.

Considerando que la potencia de salida del panel fotovoltaico está directamente relacionada con la temperatura en las células el modelo descrito en la Figura 19 evalúa la temperatura de las células en distintas condiciones de irradiación y temperatura, logrando así obtener un análisis de lo que está realmente ocurriendo con la temperatura interna del panel.

De acuerdo con el trabajo de Sánchez & Rodríguez, (2015) el modelo en Simulink que obtuvieron permitió el análisis de comportamiento del panel de forma que se pudo verificar los valores de salida comprobando así que el panel fotovoltaico TYN-85S5 tenía un comportamiento distinto de acuerdo con los valores ingresados de irradiación y temperatura.

Khanam & Foo (2018) en su trabajo de investigación “Modelado de una malla fotovoltaica en MATLAB Simulink y un seguidor de punto de máxima potencia usando redes neuronales”,

demuestran que el uso de Simulink permite observar el comportamiento de un módulo fotovoltaico con un arreglo de 60 celdas lo cual permite realizar distintas pruebas con varios valores lo que cuantifica el tiempo empleado en comparación, con experimentos físicos que requieren de varios equipos, presupuesto y tiempo.

Sarniak en 2017 a través de su trabajo “Modelado de módulos fotovoltaicos en Simulink y paquetes de Simscape del Software MATLAB” determino que los resultados obtenidos presentan errores que son relativos de menos de 1% lo cual demuestra que el uso de modelos en Simulink permite acercarse a los valores reales además al tener un modelo que se adapte a las condiciones necesarias permite evaluar distintas características y valores de salida de los paneles fotovoltaicos.

Revati & Natarajan en su trabajo “I-V and P-V characteristics analysis of a photovoltaic module by different methods using MATLAB software” (2020) detallan el modelado de módulos fotovoltaicos a través de diferentes métodos tales como modelos matemáticos, modelado en Simscape y código en MATLAB, presentado como resultados de la simulación valores con un error menor del 10% del valor real presentado en los módulos fotovoltaicos que estudiaron, lo cual demuestra que los métodos de simulación a través de MATLAB presentan una curva de rendimiento concordante.

Para el caso del generador termoeléctrico se consideró las Ecuaciones de la 17 a la 26 de las cuales surgen los modelos presentados en las Figuras 20 y 21 donde se analiza la potencia de salida del generador termoeléctrico de acuerdo con el diferencial de temperatura entre la cara caliente y la cara fría permitiendo evaluar distintas condiciones de operación.

Yilmaz, Cavus e Islamoglu en 2022 realizaron el estudio “Modelado de un módulo termoeléctrico bidireccional usando MATLAB/SIMULINK para la simulación de circuitos” con el cual determinaron que el uso de Simulink y Simscape para el modelado de módulos termoeléctricos representa una estrategia efectiva, los cuales brindan una plataforma versátil y precisa para construir modelos matemáticos detallados de los módulos termoeléctricos, permitiendo la simulación y análisis de comportamiento en diferentes condiciones de operación.

Las figuras 22 y 23 detallan de forma visual el generador termoeléctrico a través de SolidWorks la cual es una herramienta útil que permite evaluar el comportamiento físico del generador termoeléctrico a través de la simulación.

Charilaou, Kyratsi, y Louca, (2021) en su trabajo “Diseño de un sistema generador termoeléctrico enfriado por aire mediante modelado y simulaciones, para uso en industrias cementeras” describe que mediante el modelado y la simulación se puede evaluar de forma sistemática los generadores termoeléctricos lo cual puede ofrecer información útil para un estudio experimental a futuro.

Los generadores termoeléctricos requieren de un acoplamiento que los mantenga en contacto con el panel fotovoltaico para este caso el diseño seleccionado tiene una forma de bandeja el cual se observa en las Figuras 26, 27, 28, 29 mismo que considera la ley de Fourier descrita en la Ecuación 27 de forma que la temperatura en el acoplamiento no afecte a la producción del panel y a la producción de los generadores termoeléctricos.

En la Figura 25 se muestra el sistema que involucra tanto los generadores termoeléctricos como el panel fotovoltaico. Para este estudio, se optó por utilizar modelos en Simulink debido a

su versatilidad y capacidad para incorporar todos los modelos descritos anteriormente. De esta manera, se busca obtener un valor de potencia que se acerque a la potencia real que se obtendría a través de un experimento físico.

En el trabajo de investigación “Sistema híbrido PV-TEG de alta eficiencia con control inteligente para recolectar la máxima energía en diversas condiciones de funcionamiento no estáticas” por parte de Feroz, et.al (2021), presenta que un sistema híbrido entre un panel fotovoltaico y generadores termoeléctricos tienen una densidad de potencia mayor en comparación a la obtenida en un panel fotovoltaico convencional.

La información presentada destaca el uso de modelos en Simulink de sistemas donde se emplee generadores termoeléctricos y paneles fotovoltaicos. Estos modelos permiten evaluar el comportamiento de los sistemas en diversas condiciones operativas. Estudios previos respaldan la efectividad de los modelos en Simulink, que muestran resultados cercanos a los valores reales. Además, el uso de SolidWorks evalúa el comportamiento físico de distintos sistemas mediante modelos estructurales. En resumen, el uso de modelos en Simulink proporciona una herramienta efectiva y versátil para el análisis y diseño de sistemas que comprendan a generadores termoeléctricos y paneles fotovoltaicos, brindando información útil para futuros estudios experimentales y optimización de diseño.

CAPITULO III

Simulación del generador termoeléctrico acoplado al panel fotovoltaico

En el capítulo III se abordan los resultados obtenidos a través de las simulaciones del panel fotovoltaico, del generador termoeléctrico y del sistema acoplado, de forma que se harán pruebas de los modelos y cálculos realizados en el capítulo anterior para su correspondiente verificación, por lo cual se evalúa el comportamiento de los elementos del sistema acoplado de acuerdo a una variación de la irradiación solar así como de la variación de la temperatura ambiente buscando de esta forma el punto máximo de potencia generada de forma que se verifique si es viable o no el emplear generadores termoeléctricos para el aprovechamiento del aumento de temperatura en el módulo fotovoltaico.

3.1 Software computacional

3.1.1 *LabVIEW*

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un software de diseño de sistemas y desarrollo de aplicaciones. Este software emplea una técnica de programación gráfica conocida como "programación de diagramas de bloques" (G Programming) en lugar de lenguajes de programación basados en texto convencionales. LabVIEW se utiliza ampliamente en numerosas industrias para la ingeniería, control de sistemas, adquisición de datos, automatización y pruebas de laboratorio. (LabVIEW, 2023)

3.2 Determinación de temperatura promedio

3.2.1 *Temperatura promedio medida por Meteonorm 8.1*

Meteonorm 8.1 es un servicio que compila información confiable de datos meteorológicos el cual provee acceso a datos anuales a través de un historial establecido gracias a sus estaciones meteorológicas. La base de datos de Meteonorm 8.1 resume que la temperatura oscila entre 14 y 15 ° C en promedio tal como se observa en la Figura 13.

Tabla 13

Temperatura promedio Meteonorm 8.1 (2016-2021)

Valores Mes	Temperatura °C
Enero	14.8
Febrero	14.7
Marzo	14.7
Abril	14.4
Mayo	14.7
Junio	14.4
Julio	14.7
Agosto	14.9
Septiembre	14.8
Octubre	14.9
Noviembre	14.4
Diciembre	14.6
Anual	14.7

3.2.2 *Temperatura promedio medida por NASA-SSE*

NASA-SSE es un servicio que proporciona datos meteorológicos que apoyan a la búsqueda de energía renovable, eficiencia energética y necesidades agrícolas. De acuerdo con el sistema NASA-SSE la temperatura oscila entre 19 y 22 ° C en promedio lo cual puede observarse en la Tabla 14.

Tabla 14*Temperatura promedio NASA-SSE (1983-2005)*

Valores Mes	Temperatura °C
Enero	19.9
Febrero	20.3
Marzo	20.7
Abril	21.0
Mayo	21.3
Junio	21.1
Julio	21.2
Agosto	21.9
Septiembre	22.0
Octubre	21.3
Noviembre	20.4
Diciembre	19.9
Anual	20.9

3.2.3 Temperatura promedio medida por PVGIS TMY

PVGIS TMY es un servicio que proporciona datos meteorológicos típicos anuales, de cada hora en un año para una ubicación geográfica dada. De acuerdo con la base de datos de PVGIS TMY la temperatura oscila entre 12 y 13 °C en promedio valores observables en la Tabla 15.

Tabla 15*Temperatura promedio PVGIS TMY (2021)*

Valores Mes	Temperatura °C
Enero	12.3
Febrero	12.4
Marzo	12.5
Abril	12.6
Mayo	12.8
Junio	12.7
Julio	12.2
Agosto	12.2
Septiembre	12.3

Octubre	12.0
Noviembre	12.1
Diciembre	12.1
Anual	12.4

3.2.4 Temperatura promedio determinada mediante MATLAB

A través de la herramienta MATLAB y una compilación de datos proporcionados por los servicios de la NASA, PVGIS, METEONORM, se obtuvo las Figura 30 y 31 en la cuales se observa un rango de temperatura promedio de un día de invierno y en un día de verano respectivamente tomando en cuenta la latitud 0.3487 y longitud -78.1233 como punto de medición.

Figura 30

Temperatura de un día promedio de invierno en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233

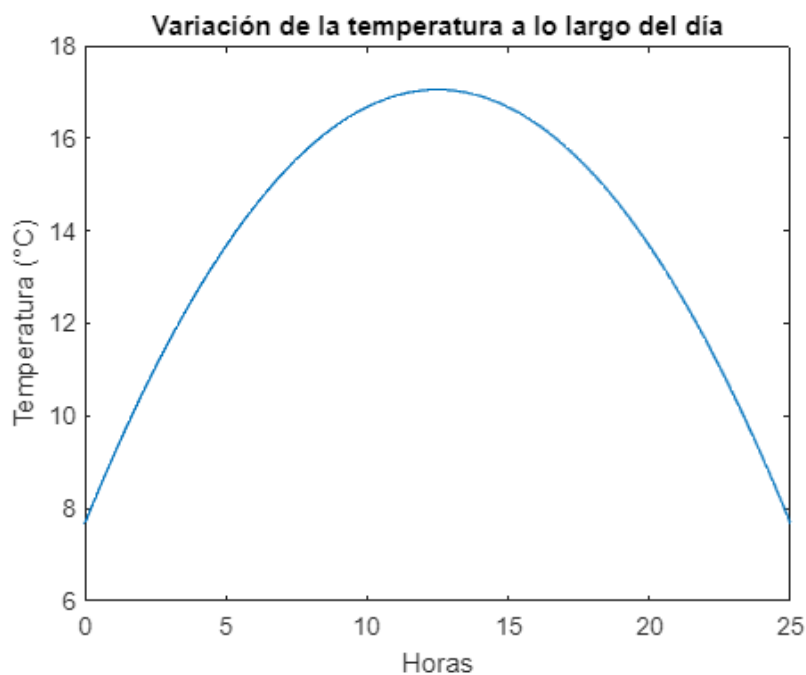
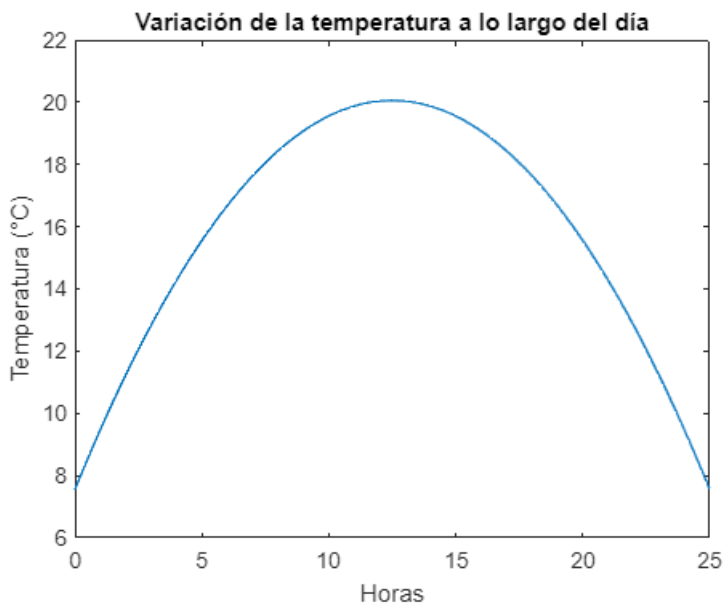


Figura 31

Temperatura de un día promedio de verano en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233



Las Figuras 30 y 31 están basadas en un promedio de días que conciernen al año 2021 los datos empleados para realizar las gráficas fueron extraídos de la base de datos de la NASA, para las fechas de verano se consideró las fechas comprendidas desde marzo hasta septiembre, para las fechas de invierno se consideró las fechas de octubre hasta febrero este periodo de tiempo se selección de forma arbitraria ya que Ecuador al encontrarse en la línea Ecuatorial su temporalidad climatológica depende de la región.

3.2.5 Temperatura determinada mediante LabVIEW

A través de LabVIEW obtuvo las Figura 33 en la cuales se observa un rango de temperatura promedio con picos máximos (24 °C) y mínimos (8 °C) de respectivamente tomando en cuenta la latitud 0.3487 y longitud -78.1233 como punto de medición, la cual fue obtenida mediante un diagrama de bloques que se observa en la Figura 32.

Figura 32

Diagrama de bloques en LabVIEW para la determinación de la temperatura

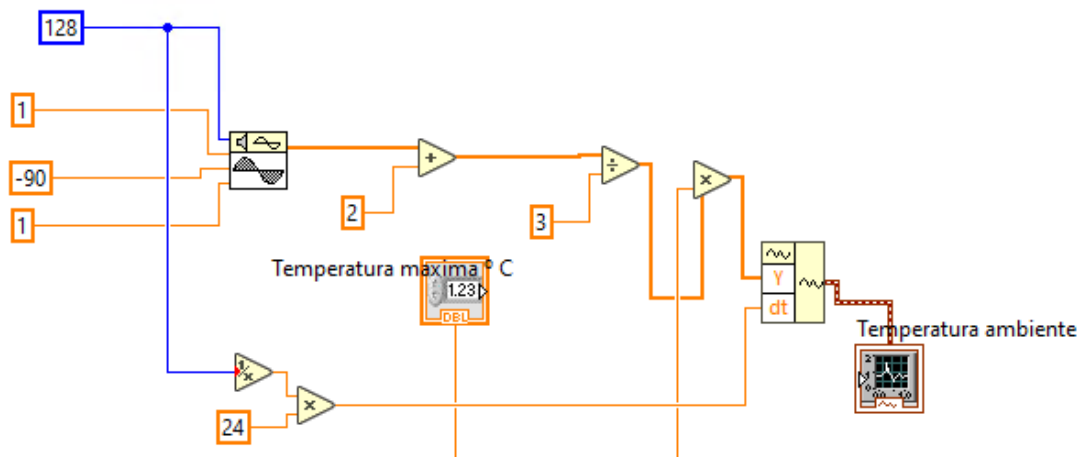
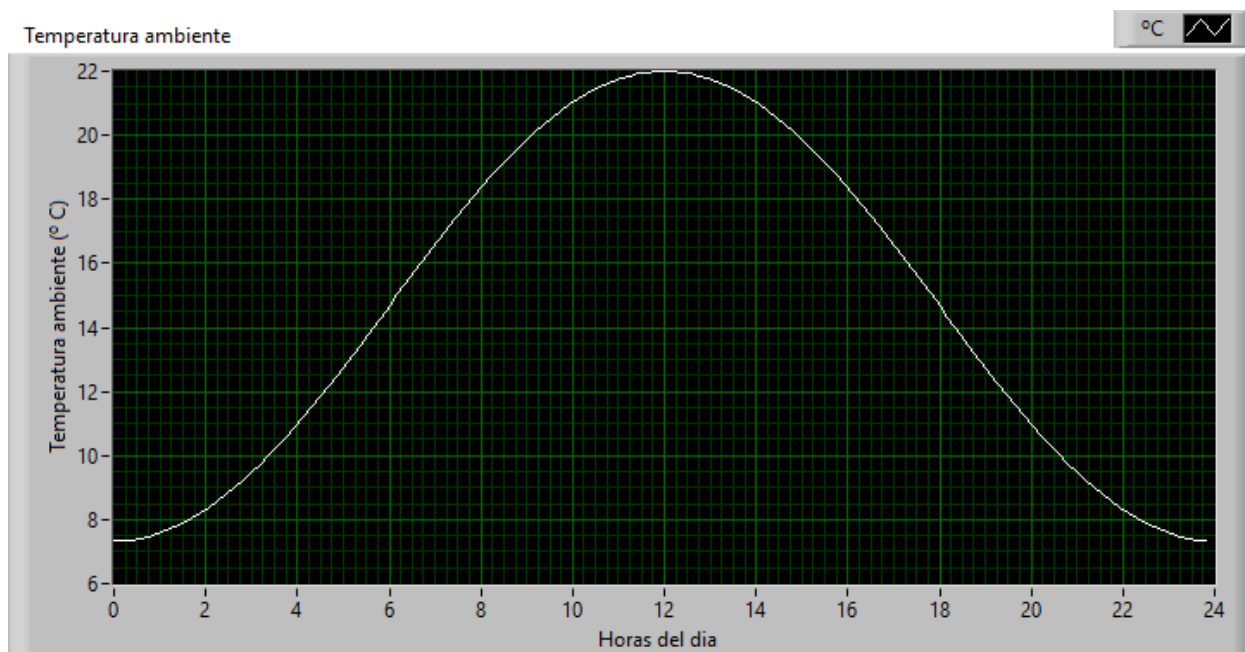


Figura 33

Temperatura promedio obtenida tras la simulación



3.3 Determinación de la Irradiación solar en Ecuador

3.3.1 Irradiación promedio medida por Meeonorm 8.1

De acuerdo con la base de datos de Meeonorm 8.1 la irradiación promedio Oscila entre 141 y 160 W/m² en promedio datos que puede visualizarse en la Tabla 16.

Tabla 16

Irradiación promedio Meeonorm 8.1 (2016-2021)

Valores Mes	GlobH kWh/m²
Enero	148.3
Febrero	123.7
Marzo	152.4
Abril	153.0
Mayo	161.1
Junio	154.3
Julio	156.1
Agosto	155.9
Septiembre	141.0
Octubre	137.2
Noviembre	138.2
Diciembre	142.5
Anual	1763.6

3.3.2 Irradiación promedio medida por NASA-SSE

A través del sistema NASA-SSE se compilan múltiples datos entre ellos la irradiación misma que oscila entre 110 y 130 W/m² en promedio, los datos mencionados están descritos claramente en la Tabla 17.

Tabla 17

Irradiación promedio NASA-SSE (1983-2005)

Valores Mes	GlobH kWh/m²
Enero	122.8
Febrero	114.5
Marzo	134.9
Abril	125.1
Mayo	121.2
Junio	114.0
Julio	124.9
Agosto	125.6
Septiembre	116.4
Octubre	119.7
Noviembre	112.2
Diciembre	114.4
Anual	1445.6

3.3.3 Irradiación promedio medida por PVGIS TMY

PVGIS TMY es un sistema meteorológico el cual capta una cantidad de datos tales como precipitación, velocidad del viento, entre otros. Uno de los más importantes es la irradiación que para este caso de acuerdo con las coordenadas seleccionadas oscila entre 120 y 170 W/m² en promedio.

Tabla 18

Irradiación promedio PVGIS TMY (2021)

Valores Mes	GlobH kWh/m²
Enero	172.4
Febrero	154.2
Marzo	140.4
Abril	135.9
Mayo	160.6
Junio	129.5
Julio	163.2
Agosto	160.7
Septiembre	158.8
Octubre	164.4
Noviembre	176.2

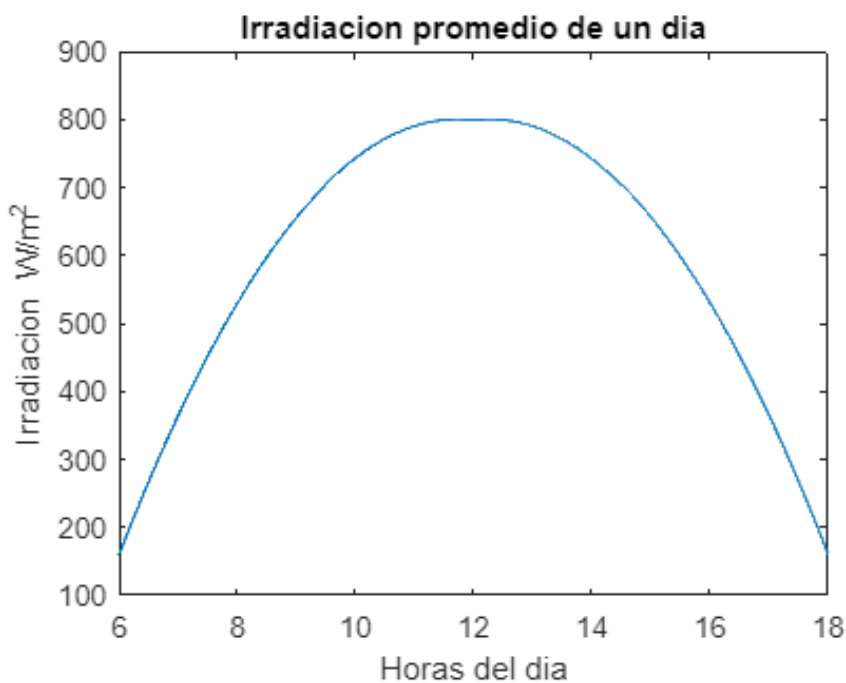
Diciembre	170.6
Anual	1886.8

3.3.4 Irradiación promedio determinada mediante MATLAB

A través de la herramienta MATLAB y una compilación de datos proporcionados por los servicios de la NASA, PVGIS, METEONORM y a el uso de los datos obtenidos en la Tabla 9 se obtuvo la Figura 34 en la cual se observa un rango de irradiación promedio de un día de tomando en cuenta la latitud 0.3487 y longitud -78.1233 como punto de medición.

Figura 34

Irradiación de un día promedio en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233



Mediante la Figura 34 se observa que la irradiación tiene una forma parábólica la cual concuerda con respecto a la elevación del sol durante el día considerando los datos de la Tabla 9 se considera que el rango de horas sol pico es de 6 por lo cual el valor máximo de irradiación sea

de 800 W/m^2 esto considerando que la irradiación de un día es de $4.8 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ lo cual concuerda con datos de ATLAS SOLAR del Ecuador (2015), donde se observa claramente que la radiación en la zona comprendida en las coordenadas latitud 0.3487 y longitud -78.1233 es de alrededor de $5 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$.

3.3.5 Irradiación determinada mediante LabVIEW

A través de LabVIEW obtuvo las Figura 36 en la cuales se observa una curva de irradiación promedio durante un día respecto a la irradiación máxima determinada en la Tabla de respectivamente tomando en cuenta la latitud 0.3487 y longitud -78.1233 como punto de medición, la cual fue obtenida mediante un diagrama de bloques que se observa en la Figura 37.

Figura 35

Diagrama de bloques en LabVIEW para la determinación de la irradiación

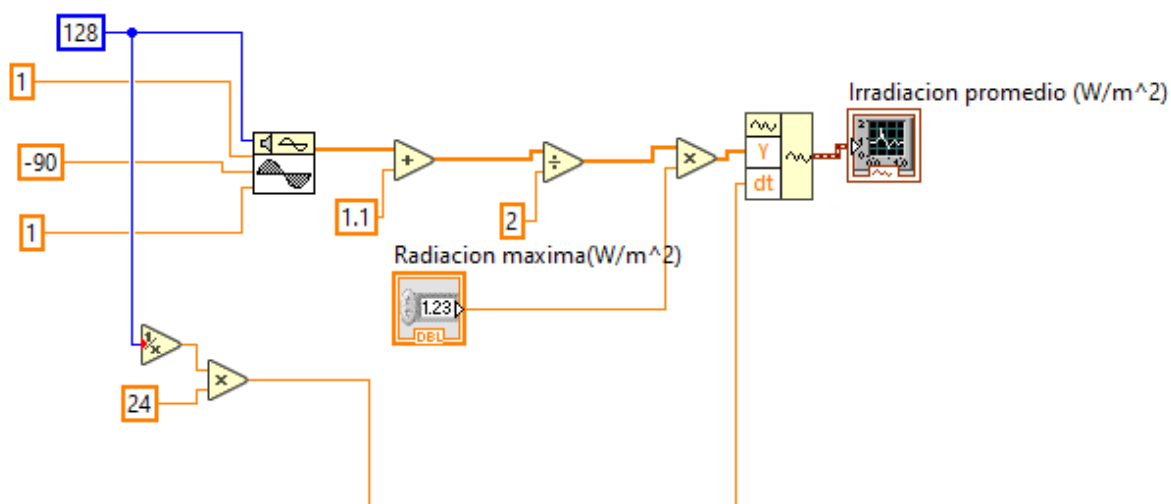
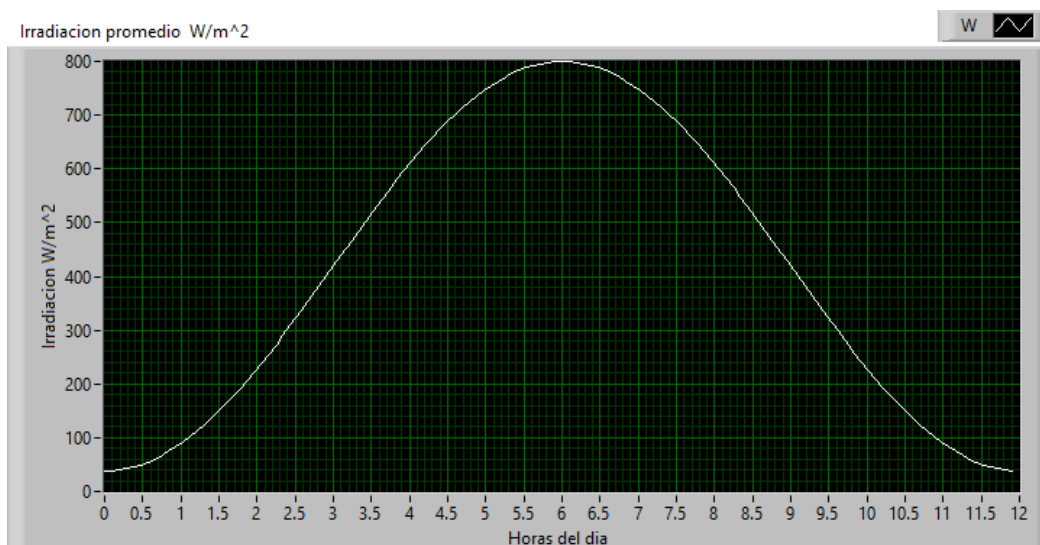


Figura 36

Irradiación promedio obtenida tras la simulación



En el caso de la simulación de LabVIEW se emplearon datos reales otorgados por entidades tales como la NASA, PVGIS, METONORM y los valores de horas sol pico al comparar los resultados con los datos de ATLAS SOLAR del Ecuador (2015) se obtuvieron valores que concuerdan con los datos de las que proporcionan las distintas entidades.

3.4 Valores óptimos vs valores reales de operación del panel fotovoltaico

El panel fotovoltaico M12 HJT GSM560 entrega una potencia ideal de 560 W en condiciones de prueba estándar de 800 W/m^2 y 20°C de temperatura ambiente valores suministrados por los fabricantes descritos en la Tabla 8.

En base a los valores mencionados se comprueba la veracidad de estos en la Tabla 19 a través de las Ecuaciones 14 y 16 de forma que se verifique cuáles son los valores reales de operación.

Tabla 19

Valores de operación reales vs ideales del módulo fotovoltaico

Parámetro	Valor
Potencia en condiciones ideales	560
Temperatura ambiente ideal	0 ° C
Temperatura ambiente real	10-23 ° C
Potencia con temperatura ambiente real	400-110W
Irradiación real	70-1200W/m ²
Potencia con temperatura ambiente e irradiación máxima	67-510W
Temperatura de operación del panel	12.5-57.5 ° C

Mediante los datos de temperatura e irradiación solar en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233 descritos a través de las Figura 15, 16 y 17 se calculó los valores que se encuentran en la Tabla 12 la cual manifiesta la diferencia entre de la potencia ideal y la potencia real del panel.

3.5 Valores óptimos vs valores reales de operación del generador termoeléctrico

El generador termoeléctrico TEG71-1.4-1.6 entrega una potencia ideal de 3.9 W en condiciones de estándar con una diferencia de temperatura de 110 ° C los cuales son datos entregados por el fabricante.

En base a los valores mencionados se comprueba la veracidad de estos en la Tabla 20 a través de las Ecuaciones 18, 22, 23 y 24 de forma que se verifique cuáles son los valores reales de operación.

Tabla 20

Valores de operación reales vs ideales del generador termoeléctrico

Parámetro	Valor
Potencia en condiciones ideales	3.9 W
Diferencial de temperatura ideal	110 ° C
Diferencial de temperatura real	2.5-37.5 ° C
Potencia con diferencial de temperatura real	0- 0.6W

Voltaje real	4-2V
Corriente real	0-1A
Temperatura en las células	15-57.5 ° C
Coefficiente de Seebeck del modulo	0.0349
Resistencia interna del modulo	0.9452

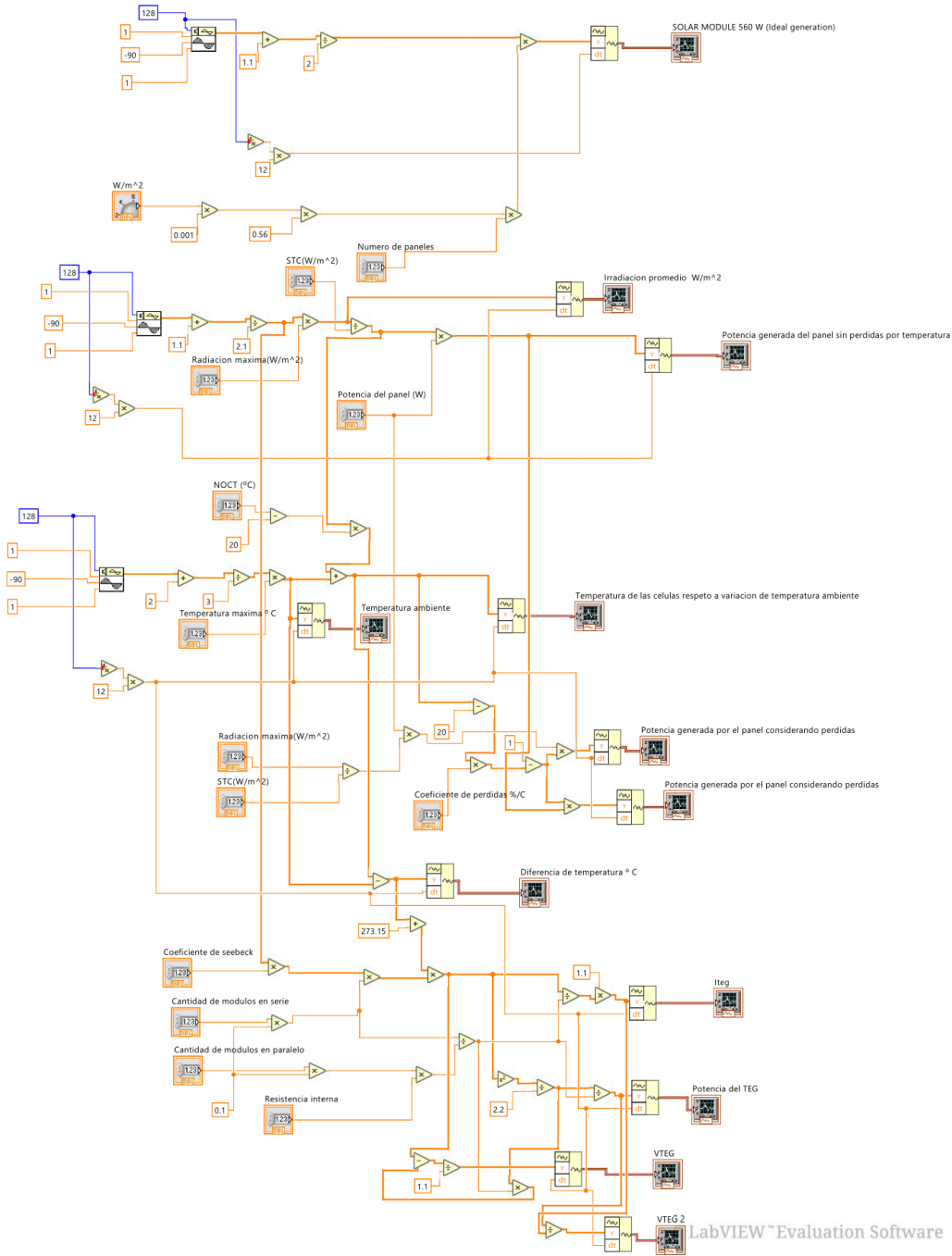
Mediante los datos de temperatura en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233 descritos a través de las Figura 16 y 17 se calculó el valor de temperatura en el módulo fotovoltaico que se encuentran las Figuras 30, 31 y 33 la cual manifiesta la diferencia entre de la potencia ideal y la potencia real del generador termoeléctrico.

3.6 Sistema acoplado desarrollado en LabVIEW

Mediante la función de bloques de LabVIEW se desarrolló un sistema el cual relaciona las variables de irradiación, temperatura, cantidad de módulos, coeficiente de Seebeck, resistencia interna entre otras variables de forma que se pueden evaluar diferentes módulos de igual forma se puede evaluar una gran cantidad de módulos, obteniendo valores de salida de potencia eléctrica del generador termoeléctrico y del panel fotovoltaico. El sistema desarrollado se puede observar en la Figura 45.

Figura 37

Sistema acoplado desarrollado en LabVIEW



3.7 Simulación de los generadores termoeléctricos acoplados a el panel fotovoltaico acuerdo a la variación de temperatura y radiación solar

3.7.1 Simulación en el entorno de MATLAB/SIMULINK

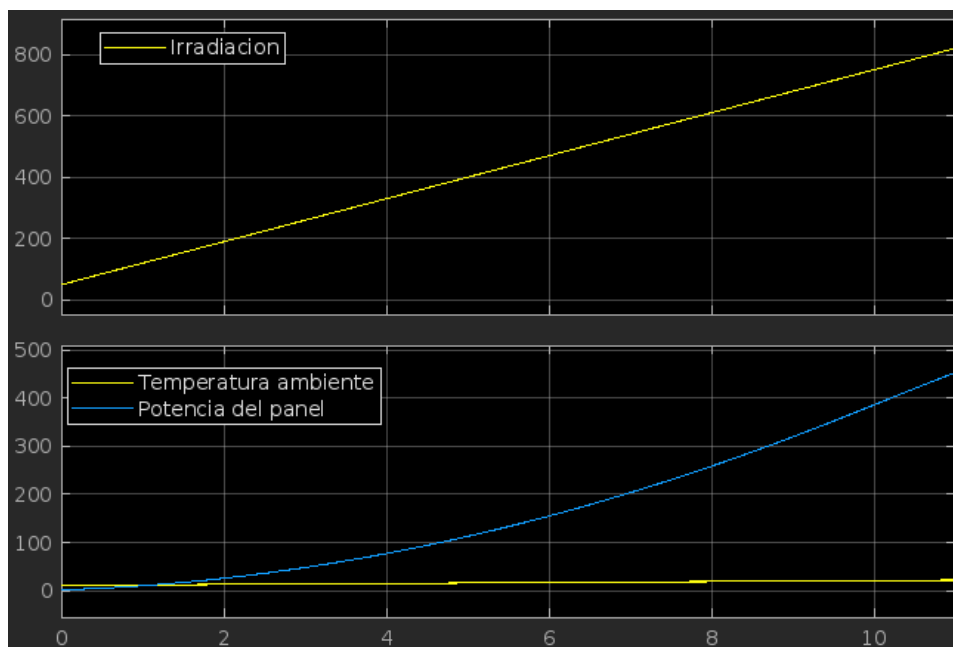
La determinación del funcionamiento del sistema requiere de una cantidad de parámetros y rangos definidos de temperatura, radiación solar, diferencial de temperatura entre el ambiente y las células y velocidad del viento, los cuales son necesarios para la simulación del sistema acoplado de generadores termoeléctricos y panel fotovoltaico, mismos que fueron determinados mediante cálculos y bases de datos a través de MATLAB.

3.7.1.1 Potencia generada por el panel fotovoltaico

Para la simulación se consideró los picos máximos de irradiación y temperatura de acuerdo con los valores obtenidos de las fuentes de la NASA, PVGIS, METEONORM, cálculos y simulaciones descritas en esta sección, los cuales son 800 W/m^2 y 22°C , de acuerdo con los valores descritos en la Tabla 19. La simulación arrojo los valores de 500 Wp considerando un aumento de temperatura e irradiación de forma exponencial a lo largo del tiempo. Estos valores se observan en la Figura 37.

Figura 38

Potencia entregada por el módulo fotovoltaico



3.7.1.2 Diferencial de temperatura entre la temperatura de las celdas y temperatura ambiente

La diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de las celdas solares son la parte vital del trabajo de investigación ya que de acuerdo con esto parámetros se determinó la potencia generada por el generador termoeléctrico valores requeridos para el análisis de resultados. Para este caso se consideró un rango de temperaturas de 10 a 22 °C como temperatura ambiente y mediante la Ecuación 16 se obtuvo los valores de la Tabla 21.

Tabla 21

Diferencia de la temperatura entre las celdas solares y la temperatura ambiente

Temperatura ambiente [° C]	Temperatura en las celdas fotovoltaicas [° C] con una irradiación de 1200[W/m ²]	Temperatura en las celdas fotovoltaicas [° C] con una irradiación de 800[W/m ²]	Temperatura en las celdas fotovoltaicas [° C] con una irradiación de 600[W/m ²]
10	47,5	35	28,75
11	48,5	36	29,75

12	49,5	37	30,75
13	50,5	38	31,75
14	51,5	39	32,75
15	52,5	40	33,75
16	53,5	41	34,75
17	54,5	42	35,75
18	55,5	43	36,75
19	56,5	44	37,75
20	57,5	45	38,75
21	58,5	46	39,75
22	59,5	47	40,75

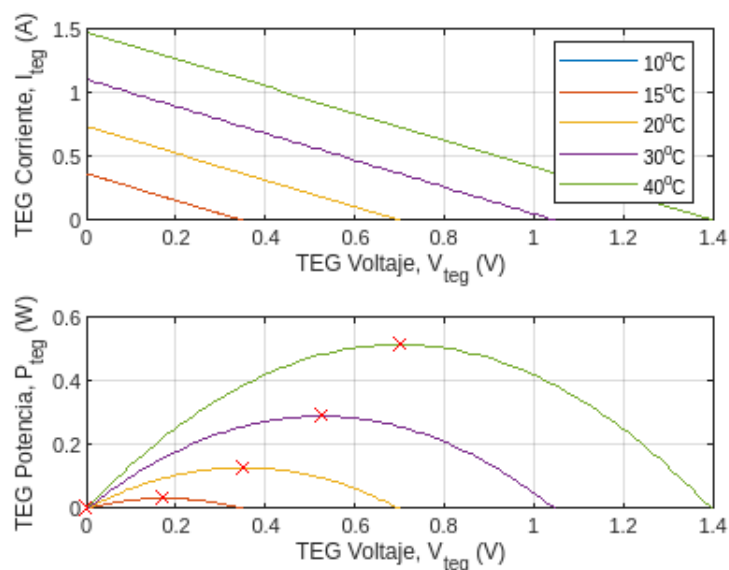
A través de la tabla 21 se puede interpretar que la temperatura varía en un rango de acuerdo con el nivel de irradiación del ambiente por lo que mediante estos resultados se determina que la diferencia de temperatura de operación del panel va de 1.5 a 37.5 ° C datos que fueron empleados para determinar la potencia generada por el generador termoeléctrico.

3.7.1.3 Potencia generada por el generador termoeléctrico

La potencia generada por el generador termoeléctrico se obtuvo a través del análisis de la variación de temperatura el cual fue determinado en la Tabla 21 empleado para la simulación de generación eléctrica por parte del generador termoeléctrico la cual puede ser visualizada en la Figura 38.

Figura 39

Potencia generada por el generador termoeléctrico



Mediante la Figura 38 se puede observar que la potencia entregada es de 0.4W en un diferencial de temperatura de 37.5 ° C, la cual concuerda con los valores de generación descritos por el fabricante del módulo.

3.7.2 Simulación en el entorno de LABVIEW

La determinación del funcionamiento del sistema requiere de una cantidad de parámetros y rangos definidos de temperatura, radiación solar, diferencial de temperatura entre el ambiente y las células, los cuales son necesarios para la simulación del sistema acoplado de generadores termoeléctricos y panel fotovoltaico, mismos que fueron determinados mediante cálculos y bases de datos a través de MATLAB.

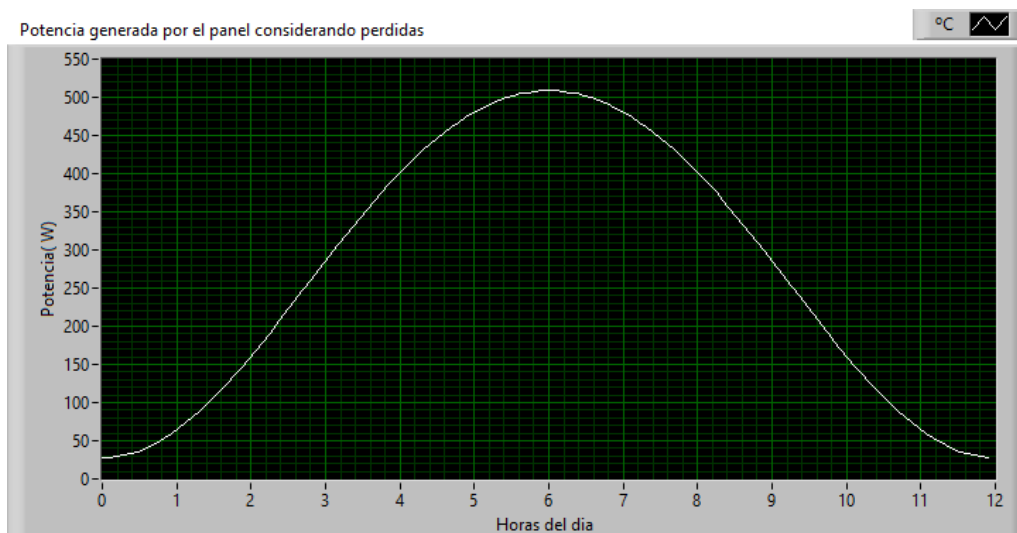
3.7.2.1 Potencia generada por el panel fotovoltaico

Respecto a la determinación de la potencia generada por el panel fotovoltaico se consideró que existe una irradiación de 800 W/m² con un rango de temperatura de 8 a 22 ° C, a través de estos valores mediante un diagrama de bloques en LabVIEW Figura 38, se obtuvo la Figura 39

donde se determina de forma clara como es la generación de un panel fotovoltaico respecto a un día promedio en la latitud 0.3487 y longitud -78.1233.

Figura 40

Potencia generada por el panel considerando perdidas por temperatura



3.7.2.2 Diferencial de temperatura entre la temperatura de las células y temperatura ambiente

Para la determinación de la diferencia de temperatura se empleó la herramienta de bloques del software LabVIEW los resultados tras la simulación se observan en la Figura 40, considerando una irradiación de 1200 W/m^2

Figura 41

Diferencia de temperatura

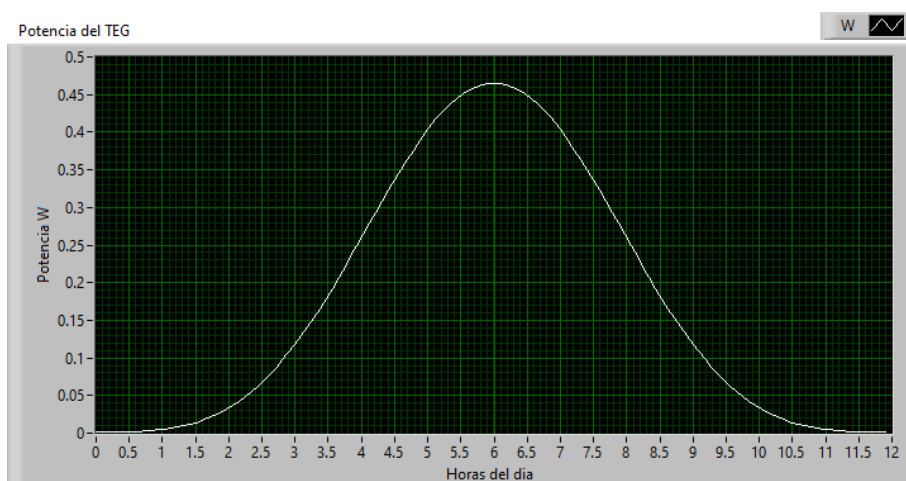


3.7.2.3 Potencia generada por el generador termoeléctrico

La potencia generada en el generador termoeléctrico tras una evaluación del diferencial de temperatura obtenido a través del cálculo en la Tabla 21 incluyendo la simulación en el software LabVIEW que se observa en la Figura 40 mediante los datos descritos se realizó la simulación para la generación de potencia por el generador termoeléctrico de la cual se obtuvo la Figura 41.

Figura 42

Potencia entregada por el TEG

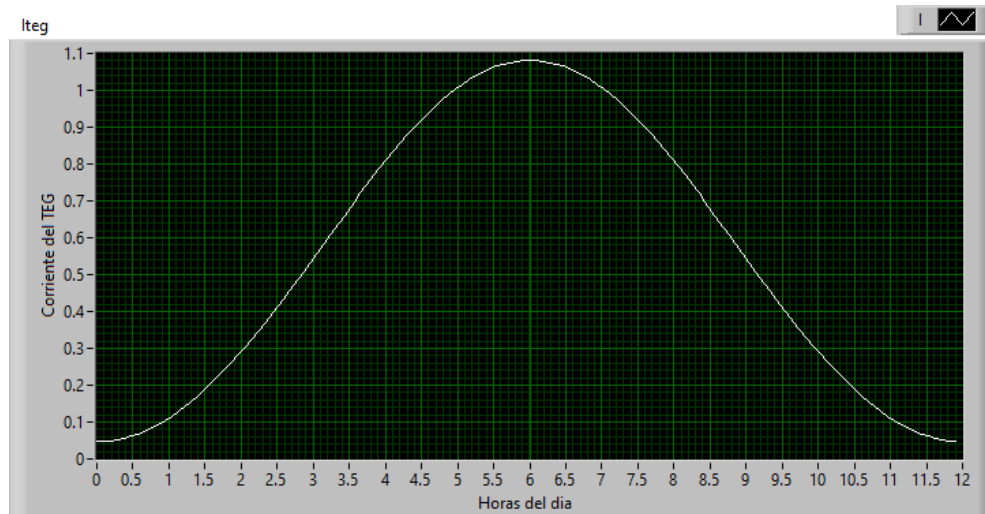


Para el caso de la corriente en el TEG esta fue determinada mediante los parámetros descritos en las Tabla 20 y 21 para su posterior simulación en el entorno de LabVIEW se obtuvo

la Figura 42 donde se observan una curva que describe el comportamiento de la corriente respecto a el diferencial de temperatura.

Figura 43

Corriente entregada por el TEG



3.7.3 Simulación en el entorno de SolidWorks

Los resultados obtenidos a través de la simulación en el entorno de SolidWorks revelaron una relación de flujo de calor de $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde el panel fotovoltaico Figura 45 hacia el generador termoeléctrico Figura 44. Estos resultados se obtuvieron considerando valores de radiación solar de 1200 W/m^2 y una temperatura ambiente de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. La simulación demuestra el flujo de calor entre el panel fotovoltaico y el generador termoeléctrico, sugiriendo que el generador termoeléctrico es capaz de aprovechar la temperatura generada por el panel fotovoltaico mediante conducción ya que están en contacto directo ambos dispositivos.

Figura 44

Simulación del flujo térmico del generador termoeléctrico

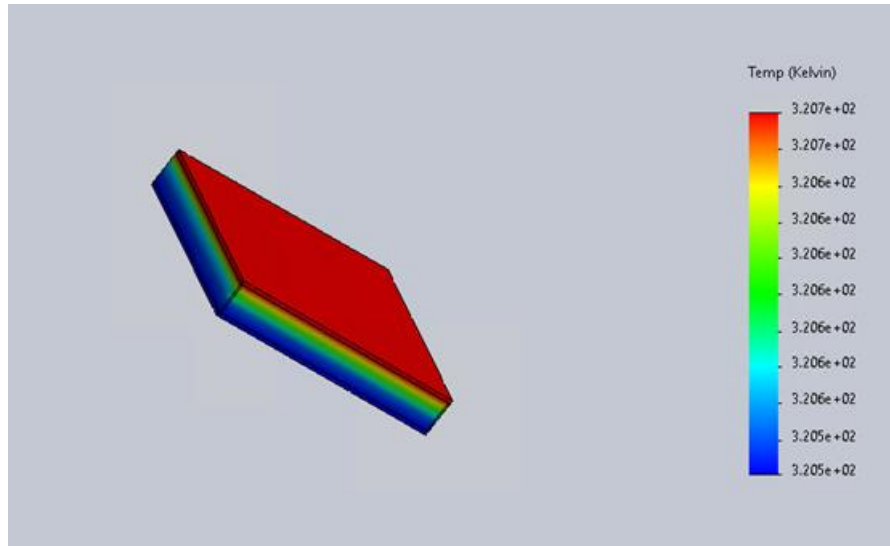
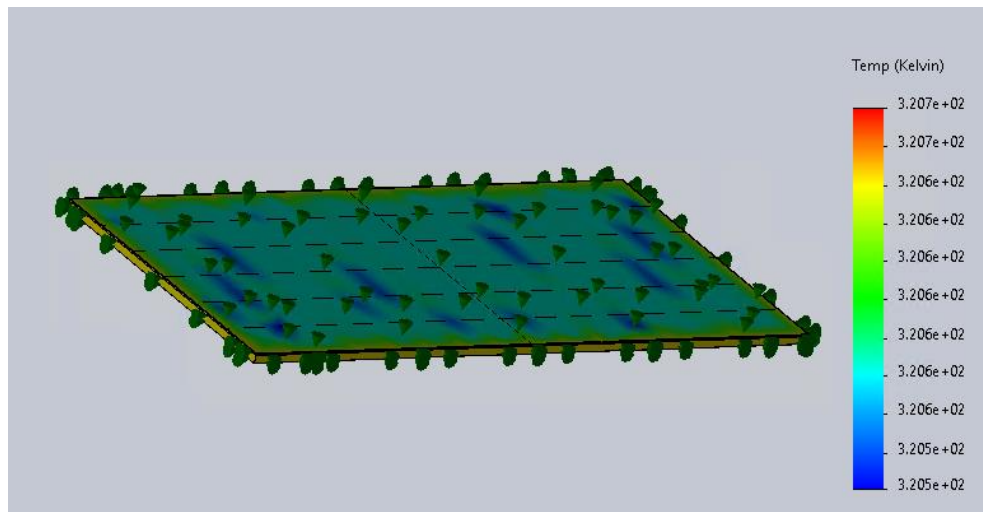


Figura 45

Simulación del flujo térmico del panel fotovoltaico



Como se observa en las Figuras 43 y 44 el flujo de temperatura considerando el diferencial de temperatura máximo entre el ambiente y la temperatura de las celdas solares se obtiene que el mismo oscila entre 320.5 y 330.5 Kelvin que en centígrados sería entre 47.5 a 59.5 ° C el cual coincide con los valores obtenidos en las Tablas 19, 20 y 21.

3.7.4 Relación de potencia generada de acuerdo con la cantidad de generadores

termoeléctricos

Mediante un análisis comparativo se evaluó el rendimiento de diferentes configuraciones de generadores termoeléctricos en términos de potencia generada. Para este propósito se construyó la Tabla 22 la cual muestra la potencia obtenida en función del número de generadores termoeléctricos conectados.

Tabla 22

Cantidad de generadores termoeléctricos vs potencia generada

Cantidad de generadores termoeléctricos	Potencia máxima [W] producida por el generador termoeléctrico. En condiciones de: $1200W/m^2$ y $22^{\circ}C$	Potencia máxima [W] producida por el generador termoeléctrico. En condiciones de: $800W/m^2$ y $22^{\circ}C$	Potencia máxima [W] producida por el generador termoeléctrico. En condiciones de: $600W/m^2$ y $22^{\circ}C$
1	0,4	0,2	0,11
10	4	2	1,1
20	8	4	2,2
30	12	6	3,3
40	16	8	4,4
50	20	10	5,5
60	24	12	6,6
70	28	14	7,7
80	32	16	8,8
90	36	18	9,9
100	40	20	11
200	80	40	22
400	160	80	44

Los resultados obtenidos en las Figura 38 y 41 indican que la potencia máxima generada es de alrededor de 0.4 W considerando un diferencial de temperatura de 37.5 ° C. A medida que se incrementa el número de generadores termoeléctricos conectados, la potencia total generada aumenta de manera significativa en comparación a la conexión de un solo generador termoeléctrico.

3.8 Análisis de los resultados

El sistema de generadores termoeléctricos acoplados al panel solar fotovoltaico presento los siguientes resultados.

En primer lugar, el panel solar fotovoltaico es un sistema integrado por varias celdas solares las cuales convierten la energía solar en energía eléctrica. Respecto al generador termoeléctrico se puede definir como un dispositivo eléctrico que convierte un diferencial de temperatura en energía eléctrica. Para este trabajo fueron seleccionados el módulo fotovoltaico M12 HJT GSM560 debido a su eficiencia y área que en comparación con otros módulos descritos en la Tabla 7 son superiores, para el caso del generador termoeléctrico se seleccionó el modelo TEG71-1.4-1.6 por la relación del diferencial de temperatura y el área las cuales que en comparación con otros modelos vistos en la Tabla 11 son superiores.

El panel solar fotovoltaico en su ficha técnica describe que su potencia en condiciones de prueba estándar es de 560Wp con una irradiación de 800W/m² y una temperatura en las celdas de 25 ° C. Tras una evaluación de los datos obtenidos mediante las simulaciones en el ambiente de Simulink y LabVIEW se observa en las Figuras 37 y 39 que el panel genera alrededor de 520Wp en punto máximo es decir con una irradiación de 800 W/m² y una temperatura ambiente de 22 ° C.

El generador termoeléctrico por su parte en su ficha técnica describe que su potencia máxima es de 3.9 W considerando un diferencial de temperatura de 110 °C. Sin embargo, mediante las simulaciones se observa en las Figuras 38 y 41 que la potencia entregada es de alrededor de 0.4W con un diferencial de temperatura de 37.5 °C máximo.

Teniendo en cuenta lo anterior mencionado se evaluó la relación del área de cada uno de los dispositivos. El panel solar fotovoltaico cuenta con un área de 2195mmx1098mm y los generadores termoeléctricos tienen un área de 30mmx30mm en base a las dimensiones del panel y del generador termoeléctrico se determinó que es posible el acople de múltiples generadores termoeléctricos al panel solar fotovoltaico de igual forma que se observa en el modelo de la Figura 29.

Mediante la simulación en el entorno de SolidWorks a través de los datos obtenidos en LabVIEW se llevó a cabo una evaluación del comportamiento térmico tanto del panel como del generador termoeléctrico de forma individual (Figuras 43 y 44) primordialmente para ver su capacidad de disipación del calor. Se observó que la composición del panel y su tamaño aportan a la temperatura que se obtiene del mismo tras la conversión de energía solar a eléctrica. De acuerdo con la hoja del fabricante la temperatura en la cual opera el panel va de rangos de -40 a 80 °C y considerando que el NOCT del panel es de 45 °C se determinó que la temperatura generada en el panel no afecta a su periodo de vida ya que los rangos de temperatura calculados en la Tabla 19 figuran dentro del rango de temperatura de operación.

En cuanto al generador termoeléctrico se evaluó el comportamiento en relación con el diferencial de temperatura, a través de la Figura 44 se observa que el comportamiento del generador termoeléctrico tiene afinidad con lo descrito en la ficha técnica.

Una vez determinado el comportamiento que presenta el panel solar fotovoltaico y el generador termoeléctrico se determinó que era necesario el agregar un elemento adicional que sirva como soporte para fijar los generadores termoeléctricos a la parte posterior del panel, el material seleccionado fue el aluminio por su capacidades térmicas descritas en la Tabla 12 mediante este elemento adicional en forma de bandeja tal como se observa en la Figura 26 se sujetó los generadores termoeléctricos a el panel solar fotovoltaico de forma que el contacto entre la superficie del panel y el generador termoeléctrico sea óptima.

Finalmente, una vez determinados los valores de cada uno de los elementos tanto de su parte eléctrica como térmica se realizó un análisis comparativo entre la potencia individual del panel y la potencia del sistema acoplado.

En comparación en picos máximos el sistema acoplado con una cantidad de 400 generadores termoeléctricos acoplados puede producir alrededor de 680W que es una mejora del 30% de la potencia que produce un panel de forma individual de 560Wp sin ningún sistema adicional, sin embargo, se debe considerar que el esto se da asumiendo un pico máximo del diferencial de temperatura en este caso 37.5°C considerando una irradiación de 800 W/m^2 . En base a lo anterior se puede decir que el sistema acoplado es más eficiente que un panel solar fotovoltaico convencional de forma teórica.

A pesar de que los resultados son netamente teóricos estos demuestran que el acoplar uno o varios generadores termoeléctricos a un panel solar fotovoltaico puede ser una solución a la problemática de la reducción de potencia en el panel solar debido al incremento de la temperatura en el mismo.

CONCLUSIONES

La evolución constante de la tecnología de paneles fotovoltaicos ha conducido a mejoras progresivas de módulos, optimizando la captación de energía solar. No obstante, se enfrentan a un desafío significativo relacionado con el aumento de la temperatura en las células solares lo cual disminuye la cantidad de energía eléctrica producida. Las soluciones convencionales para mitigar este problema recurren de fuentes de energía externas, aunque su efectividad no es total, dejando una reducción de la producción de energía eléctrica. En este contexto se planteó aprovechar el calor residual producido por el panel solar fotovoltaico mediante generadores termoeléctricos acoplados en la parte posterior de este.

El modelo matemático del sistema de generación termoeléctrica acoplado al panel solar fotovoltaico se realizó analizando las ecuaciones que describen el comportamiento eléctrico y térmico del panel solar fotovoltaico y del generador termoeléctrico, de los cuales se obtuvieron valores teóricos que concuerdan con los valores dados por el fabricante de los dispositivos. Tras los valores obtenidos se desarrollaron modelos computacionales en MATLAB/Simulink del panel solar, generador termoeléctrico y sistema acoplado, considerando variables climáticas y operativas (voltaje, corriente, potencia), además se desarrolló un modelo estructural en SolidWorks de dichos elementos permitiendo evaluar el sistema en diferentes condiciones de operación.

Tras la simulación realizada del sistema de generadores termoeléctricos acoplado al panel solar fotovoltaico en MATLAB/Simulink, LabVIEW y SolidWorks, se evaluó el comportamiento ante variaciones de irradiación solar y temperatura ambiente. Los resultados en Simulink muestran una potencia adicional de 0.4W por cada TEG con un diferencial de 37.5°C , al emplear una cantidad de 400 generadores termoeléctricos se obtiene una potencia de salida de 160W empleando el

mismo diferencial para cada generador termoeléctrico. En LabVIEW se obtuvo una curva de potencia del sistema acoplado. La simulación en SolidWorks analizó el flujo térmico entre dispositivos. En conjunto las simulaciones, sugieren un aumento de la producción de energía eléctrica a medida que se aumentan la cantidad de generadores termoeléctricos acoplados. Estos resultados teóricos verifican la mejora en la eficiencia del sistema propuesto para aprovechar la energía solar y térmica.

RECOMENDACIONES

La evaluación del sistema propuesto se llevó a cabo con una carga de prueba, lo que indica la posibilidad de que el sistema no alcance su potencia de salida teórica. Por consiguiente, se sugiere el emplear de dispositivos adicionales que optimicen la potencia de salida máxima. Asimismo, se recomienda utilizar este estudio como un punto de partida para llevar a cabo una validación experimental del sistema propuesto en condiciones reales de carga, con el objetivo de obtener una evaluación más precisa y práctica del rendimiento del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Paredes Chacón, G. A. (2018). Diseño de un sistema solar térmico para la sustitución de consumo de combustibles fósiles para la producción de derivados lácteos de la Quesera Santa Marta - San Juan - Chimborazo.
- Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency. IRENA. (2019).
- Basic Photovoltaic Principles and Methods, SERI/SP-290-1448, Solar Information Module 6213. (1982). Solar Information Module, 6213.
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world – A review. *Energy Procedia*, 33, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>
- Dr, S., Fraunhofer, I., & Warmuth, W. (2022). PSE Projects GmbH | Fassung vom 22.
- Adeeb, J., Farhan, A., & Al-Salaymeh, A. (2019). Temperature effect on performance of different solar cell technologies. *Inżynieria Ekologiczna*, 20(5), 249–254. <https://doi.org/10.12911/22998993/105543>
- Silverman, T. J., Deceglie, M. G., Subedi, I., Podraza, N. J., Slauch, I. M., Ferry, V. E., & Repins, I. (2018). Reducing operating temperature in photovoltaic modules. *IEEE journal of photovoltaics*, 8(2), 532–540. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2017.2779842>
- Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E., & Kirpichnikova, I. (2020). Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21(100674), 100674. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>
- Generadores termoeléctricos accionados por el calor humano para dispositivos portátiles. Estado del arte y modelado térmico sencillo - Repositorio Institucional de Documentos. (2017). Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/64157>
- CIRCE Institute - Department of Electrical Engineering, University of Zaragoza., BayodRújula, Á. A., Martínez-Gracia, A., Del Amo, A., Cañada, M., Usón, S., Uche, J., & Tejero, J. A. (2019). Integration of Thermoelectric generators (TEG) in Solar PVT panels. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 17, 495–499. <https://doi.org/10.24084/repqj17.355>
- Adeel Feroz Mirza, Majad Mansoor, Kamal Zerbakht, Muhammad Yaqoob Javed, Muhammad Hamza Zafar, Noman Mujeeb Khan, High-efficiency hybrid PV-TEG system with intelligent control to harvest maximum energy under various nonstatic operating conditions, *Journal of Cleaner Production*, Volume 320, 2021, 128643, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128643>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621028468>)
- Enescu, D. (2019). Thermoelectric energy harvesting: Basic principles and applications. En *Green Energy Advances*. IntechOpen

- Zaidi, B. (2018, July 11). Introductory chapter: Introduction to photovoltaic effect. IntechOpen. Retrieved February 11, 2023, from <https://www.intechopen.com/chapters/59428>.
- Rodríguez-Meza, M., & Cervantes-Cota, J. (2015). El efecto fotoeléctrico. *CIENCIA Ergo-sum*, 13(3), 303-311. Consultado de <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/7167>
- Franklin, E. (2018, May). Solar Photovoltaic (PV) System Components. Cooperative Extension-The University of Arizona. Retrieved February 12, 2023, from <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1742-2018.pdf>.
- Quaschnig, V. (2016, March 31). Understanding Renewable Energy Systems. Google Books. Retrieved February 12, 2023, from https://books.google.com/books/about/Understanding_Renewable_Energy_Systems.html?id=qyzeCwAAQBAJ.
- Safyanu, B. D., Abdullah, M. N., & Omar, Z. (2019, October 10). Review of Power Device for solar-powered aircraft applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*. Retrieved February 12, 2023, from <https://www.scielo.br/j/jatm/a/5SVDg4tSPpswhc8P6CscJNv/>.
- Yu, J., Xi, Y., Chueh, C.-C., Xu, J.-Q., Zhong, H., Lin, F., Jo, S. B., Pozzo, L. D., Tang, W., & Jen, A. K.-Y. (2017). Boosting performance of inverted organic solar cells by using a planar coronene based electron-transporting layer. *Nano Energy*, 39, 454-460. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.07.031>
- Xu, A. F., Wang, R. T., Yang, L. W., Liu, E. E., & Xu, G. (2020). An environmentally stable organic-inorganic hybrid perovskite containing py cation with low trap-state density. *Crystals*, 10(4), 272. <https://doi.org/10.3390/cryst10040272>
- Bozkurt Çırak, B., Eden, Ç., Erdoğan, Y., Demir, Z., Özdokur, K. V., Caglar, B., Morkoç Karadeniz, S., Kılınç, T., Ercan Ekinci, A., & Çırak, Ç. (2020). The enhanced light harvesting performance of dye-sensitized solar cells based on zno nanorod-tio2 nanotube hybrid photoanodes. *Optik*, 203, 163963. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163963>
- Cushicóndor Collaguazo, S. (2019, April 15). Estimación de Irradiancia Solar Basada en modelos matemáticos y medición de variables eléctricas de paneles fotovoltaicos. EPN. Retrieved February 13, 2023, from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20171>.
- Adeeb, J., Farhan, A., & Al-Salaymeh, A. (2019, April 9). Temperature effect on performance of different Solar Cell Technologies. *Journal of Ecological Engineering*. Retrieved February 13, 2023, from <https://doi.org/10.12911/22998993/105543>.
- Cornaglia de la Cruz, P. S. (2018, April 1). En busca del calor perdido: Efecto Seebeck y Materiales Termoeléctricos. Repositorio Institucional. Retrieved February 12, 2023, from <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/113925>
- Penalva, A. A. (2018, June). Efecto Peltier y Desarrollo de Posibles Aplicaciones técnicas. UPV. Retrieved February 12, 2023, from <https://riunet.upv.es/handle/10251/109025>.

- Tejedor, S. T., & Sotelo, A. E. (2006, April). Termoelectricidad, La Energía del Desequilibrio - Técnica Industrial. *Tecnica Industria*. Retrieved February 12, 2023, from <https://www.tecnicaindustria.es/wp-content/uploads/Numeros/22/41/a41.pdf>.
- Marx, H. W. (2019). Linseis thermoelectric devices - basics (webinar 2019). Linseis. Retrieved February 13, 2023, from <https://www.youtube.com/watch?v=se6C6sEpgBU>.
- Shi, X., Chen, L., & Uher, C. (2016). Recent advances in high-performance bulk thermoelectric materials. *International Materials Reviews*, 61(6), 379–415. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1183075>
- Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Axcell, B., Wrobel, L., & Dai, S. (2021). Thermoelectric Generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100063>
- Gainza, J. (2022, June 1). Materiales termoeléctricos, Calcogenuros y pnicturos, Con Nuevas Fenomenologías: Síntesis Y caracterización. DIGITAL.CSIC. Retrieved February 13, 2023, from <http://hdl.handle.net/10261/274663>
- Probadores Linseis Teg para los generadores termoeléctricos y peltier*. Linseis Messgeräte GmbH. (2022, August 17). Retrieved February 14, 2023, from <https://www.linseis.com/es/productos/termoelectrica/teg-tester/>.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Project.
- MATLAB - MathWorks. (n.d.). MATLAB - MathWorks. <https://www.mathworks.com/products/MATLAB.html>
- Descargar LabVIEW. (n.d.). Descargar LabVIEW - NI. <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/software-products/download.labview.html#477380>
- Software de diseño CAD 3D | SOLIDWORKS. (n.d.). SOLIDWORKS. <https://www.solidworks.com/es/home-page-2021>
- Vera-Dávila, A. G., Delgado- Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de MATLAB. *Rev.investig. desarro.innov*, 8(2), 343-356. doi: 10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972
- Cata Sánchez, J. E., & Rodríguez Sócola, F. M. (2015). Análisis matemático de un panel solar fotovoltaico de silicio (Bachelor's thesis).
- Kafui, A., Seres, I. & Farkas, I. (2019). Efficiency Comparison of Different Photovoltaic Modules. *Acta Technologica Agriculturae*, 22(1) 5-11. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0002>
- Mirza, A. F., Mansoor, M., Zerbakht, K., Javed, M. Y., Zafar, M. H., & Khan, N. M. (2021). High-efficiency hybrid PV-TEG system with intelligent control to harvest maximum energy under various non-static operating conditions. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128643. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128643

- Barrera-Ríos, F. J., Ramírez-León, S. A., Sánchez-Ángeles, E., Pérez-Trujillo, J. A., & Cruz-Álvarez, A. (2021). Mecanismos de Transferencia de Calor. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 8(16), 2007-7629.
- U. Yilmaz, T. F. Çavuş and Y. İslamoğlu, "Bidirectional Modeling of Thermoelectric Module Using MATLAB/Simulink for Circuit Simulations," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 82680-82696, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3195879.
- Lossec, M., Multon, B., Ben Ahmed, H., & Goupil, C. (2010, September 17). Thermoelectric generator placed on the human body: system modeling and energy conversion improvements. *The European Physical Journal Applied Physics*, 52(1), 11103. <https://doi.org/10.1051/epjap/2010121>
- M12 HJT Solar Module Monocrystalline 560W. (n.d.). GreenSunSolar. Retrieved June 2, 2023, from https://www.greensunpv.com/m12-hjt-solar-module-monocrystalline-500w-520w-550w-solar-panels-550watt-half-cut-half-cells-for-sale_p295.html.
- Khanam J, Foo SY (2018) Modeling of a Photovoltaic Array in MATLAB Simulink and Maximum Power Point Tracking Using Neural Network. *J Electr Electron Syst* 7: 263. doi: 10.4172/2332-0796.1000263
- Sarniak, M. (2017). Modeling of photovoltaic modules in Simulink and Simscape packages of MATLAB software. *ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes*, 6(1), 133–138.
- Revati, D., & Natarajan, E. (2020). I-V and P-V characteristics analysis of a photovoltaic module by different methods using MATLAB software. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.043
- K. Charilaou, Th. Kyratsi, L.S. Louca, Design of an air-cooled thermoelectric generator system through modelling and simulations, for use in cement industries. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.392>.
- CONELEC (2008). ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACION ELECTRICA. Retrieved from <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>.
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), Coverage of Solar Radiation Databases in PVGIS 5.2, European Union, 2022.
- Meteonorm. (2022). Meteonorm. <https://meteonorm.com/en/>

ANEXOS

Anexo 1: Código en MATLAB para la radiación solar

```

clc;
clear all;
RadiationMorning=linspace (-800,40,1008);

RadiationAfternoon=linspace (40,-800,1008);
Radiationaverage= [RadiationMorning RadiationAfternoon];
y=((1-Radiationaverage.^2)/1000)+800;

DayHours=linspace(6,18,2016);
plot(DayHours,y);
xlabel("Horas del dia");
ylabel("Irradiacion W/m^2");
title("Irradiacion promedio de un dia");

```

Anexo 2: Código de MATLAB para la variación de temperatura ambiente

```

clc;
clear all;
horas = 0:0.1:25
a = -8;
b = 8;
c = 3.5;
temperatura = a * (horas - 12).^2 + b * (horas - 12) + c;
temp=(temperatura+2000)/100
plot(horas, temp)
xlabel('Horas')
ylabel('Temperatura (°C)')
title('Variación de la temperatura a lo largo del día')

```

Anexo 3: Código de MATLAB para la determinación de variables del generador termoeléctrico

```

%%Variables para Simulink
%Th %Temperatura Lado caliente (Celsius)
Th = 160;
% Temperatura Lado caliente (Kelvin)
Th = Th + 273.15;

%Tc %Temperatura Lado frio (Celsius)
Tc = 50;
% Temperatura Lado frio (Kelvin)
Tc = Tc + 273.15;

%delta_T %Gradiente de temperatura
delta_T = Th - Tc;

%Vm %Voltaje coincidente
Vm = 1.92;

%Wm %Potencia coincidente
Wm = 3.9;

%R %Resistencia interna
%RL %Resistencia de la carga (coincidenete donde R=RL)
RL = (Vm^2)/Wm;
R = RL;

%Coefiiente de Seebeck calculado
alpha = 2*Vm/delta_T;

%if RL = mR [m es la relacion enre la resistencia interna y la resistencia de carga]
m = 1;

%I %Corriente electrica
Ie = (alpha*delta_T)/((1+m)*R);
% = (u(1)*u(3))/((1+m)*R)

%Im %Corriente respecto a la carga
Im = (alpha*delta_T)/(2*R);
% = (u(1)*u(3))/(2*R)

%Isc %Corriente de cortocircuito %Isc = 2*Im=(2*Wm)/Vm;
Isc = (2*Wm)/Vm;
Isc_1 = 2*Im;

%Voltaje de salida
V = -R*(Ie-Isc);
%Ecuacion de voltaje simulink
% = -u(2)*(u(1)-(Wm)/Vm)

%Temperatura en lado caliente
Lc= linspace (12,57,100);
Lf= linspace (8,20,100)

```

```
Ta= linspace(10,25,100);
```

Anexo 4: Código de MATLAB de los valores de generación del generador termoeléctrico

```
function initialization()
Steg=Ns*Steg_u;
Rint=Ns/Np*Rint_u;
dT=20:10:60;
N=100;
for j=1:length(dT)
    Isc=Steg*dT(j)/Rint;
    Iteg(:,j)=linspace(0,Isc,N);
    Pmp(j)=(Steg*dT(j))^2/4/Rint;
    Vmp(j)=Steg*dT(j)/2;
    for i=1:length(Iteg)
        Vteg(i,j)=Steg*dT(j)-Iteg(i,j)*Rint;
    end
end
subplot(2,1,1);
plot(Vteg,Iteg);
xlabel('TEG Voltaje, V_{teg} (V)');
ylabel('TEG Corriente, I_{teg} (A)');
grid on;
legend('10^{\circ}C', '15^{\circ}C', '20^{\circ}C', '25^{\circ}C', '30^{\circ}C');
subplot(2,1,2);
plot(Vteg,Iteg.*Vteg,Vmp,Pmp,'rx');
xlabel('TEG Voltaje, V_{teg} (V)');
ylabel('TEG Potencia, P_{teg} (W)');
grid on;
end
```

Anexo 5: Ficha técnica panel fotovoltaico HiKu7 Mono PERC 645 W – 675W







HiKu7 Mono PERC




645 W ~ 675 W

CS7N-645 | 650 | 655 | 660 | 665 | 670 | 675MS

MORE POWER

-  Module power up to 675 W
Module efficiency up to 21.7 %
-  Up to 3.5 % lower LCOE
Up to 5.7 % lower system cost
-  Comprehensive LID / LeTID mitigation technology, up to 50% lower degradation
-  Better shading tolerance

MORE RELIABLE

-  40 °C lower hot spot temperature, greatly reduce module failure rate
-  Minimizes micro-crack impacts
-  Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa*

 **Enhanced Product Warranty on Materials and Workmanship***

 **Linear Power Performance Warranty***

1st year power degradation no more than 2%
Subsequent annual power degradation no more than 0.55%

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001 : 2015 / Quality management system
ISO 14001 : 2015 / Standards for environmental management system
ISO 45001 : 2018 / International standards for occupational health & safety
IEC62941 : 2019 / Photovoltaic module manufacturing quality system

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730 / CE / INMETRO / MCS / UKCA
UL 61730 / IEC 61701 / IEC 62716 / IEC 63126 Level1 / IEC 60068-2-68
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1 / Take-e-way



* The specific certificates applicable to different module types and markets will vary, and therefore not all of the certifications listed herein will simultaneously apply to the products you order or use. Please contact your local Canadian Solar sales representative to confirm the specific certificates available for your Product and applicable in the regions in which the products will be used.

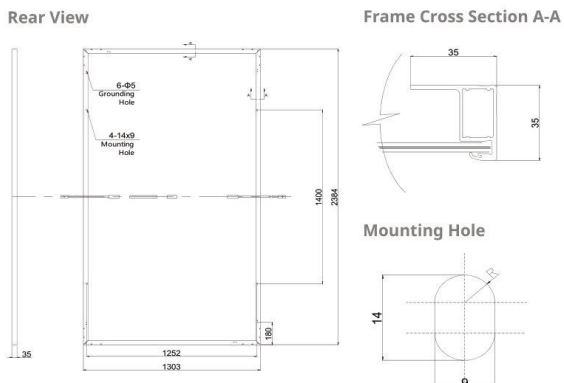
CSI Solar Co., Ltd. is committed to providing high quality solar photovoltaic modules, solar energy and battery storage solutions to customers. The company was recognized as the No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in the IHS Module Customer Insight Survey. Over the past 22 years, it has successfully delivered over 100 GW of premium-quality solar modules across the world.

* For detailed information, please refer to the Installation Manual.

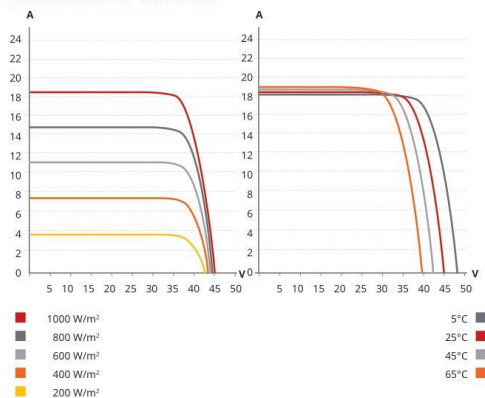
CSI Solar Co., Ltd.

199 Lushan Road, SND, Suzhou, Jiangsu, China, 215129, www.csisolar.com, support@csisolar.com

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS7N-650MS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS7N	645MS	650MS	655MS	660MS	665MS	670MS	675MS
Nominal Max. Power (Pmax)	645 W	650 W	655 W	660 W	665 W	670 W	675 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.7 V	37.9 V	38.1 V	38.3 V	38.5 V	38.7 V	38.9 V
Opt. Operating Current (Imp)	17.11 A	17.16 A	17.20 A	17.24 A	17.28 A	17.32 A	17.36 A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.8 V	45.0 V	45.2 V	45.4 V	45.6 V	45.8 V	46.0 V
Short Circuit Current (Isc)	18.35 A	18.39 A	18.43 A	18.47 A	18.51 A	18.55 A	18.59 A
Module Efficiency	20.8%	20.9%	21.1%	21.2%	21.4%	21.6%	21.7%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C						
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)						
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 61730 1500V) or TYPE 2 (UL 61730 1000V) or CLASS C (IEC 61730)						
Max. Series Fuse Rating	30 A						
Application Classification	Class A						
Power Tolerance	0 ~ + 10 W						

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS7N	645MS	650MS	655MS	660MS	665MS	670MS	675MS
Nominal Max. Power (Pmax)	484 W	487 W	491 W	495 W	499 W	502 W	506 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	35.3 V	35.5 V	35.7 V	35.9 V	36.1 V	36.3 V	36.5 V
Opt. Operating Current (Imp)	13.72 A	13.74 A	13.76 A	13.79 A	13.83 A	13.85 A	13.88 A
Open Circuit Voltage (Voc)	42.3 V	42.5 V	42.7 V	42.9 V	43.1 V	43.3 V	43.5 V
Short Circuit Current (Isc)	14.80 A	14.83 A	14.86 A	14.89 A	14.93 A	14.96 A	14.99 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m² spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	132 [2 x (11 x 6)]
Dimensions	2384 x 1303 x 35 mm (93.9 x 51.3 x 1.38 in)
Weight	33.9 kg (74.7 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass with anti-reflective coating
Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4 mm² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	410 mm (16.1 in) (+) / 250 mm (9.8 in) (-) or customized length*
Connector	T6 or T4 or MC4-EVO2 or MC4-EVO2A
Per Pallet	31 pieces
Per Container (40' HQ)	558 pieces

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.34 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.26 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	41 ± 3°C

PARTNER SECTION

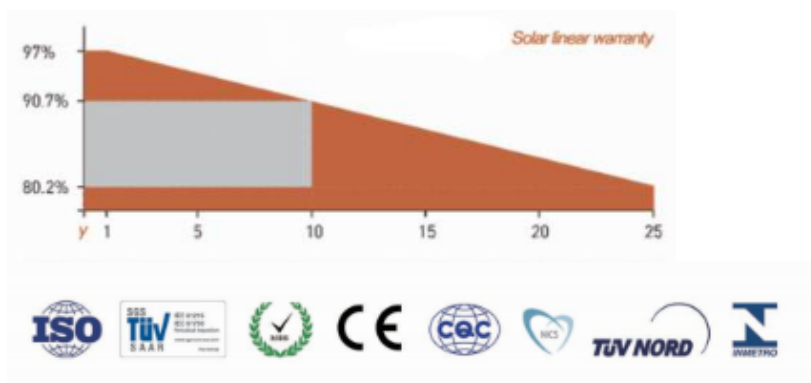


* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. CSI Solar Co., Ltd. reserves the right to make necessary adjustment to the information described herein at any time without further notice. Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

CSI Solar Co., Ltd.

199 Lushan Road, SND, Suzhou, Jiangsu, China, 215129, www.csisolar.com, support@csisolar.com

Anexo 6: Ficha técnica panel fotovoltaico Mono Solar Module 5BB 410W

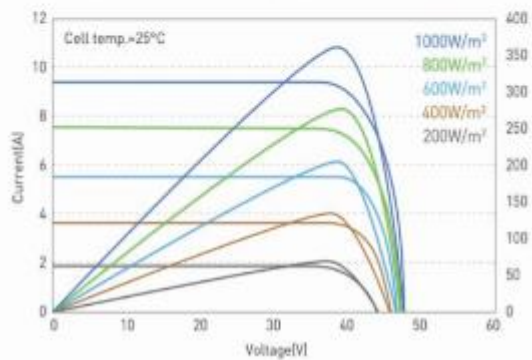
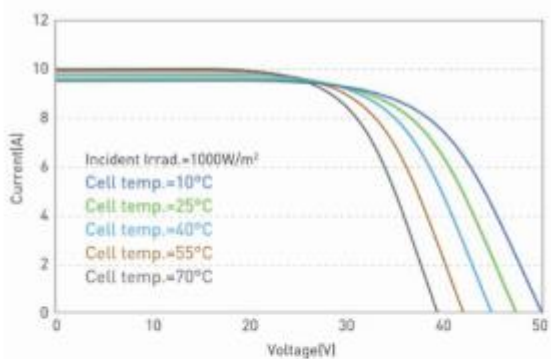
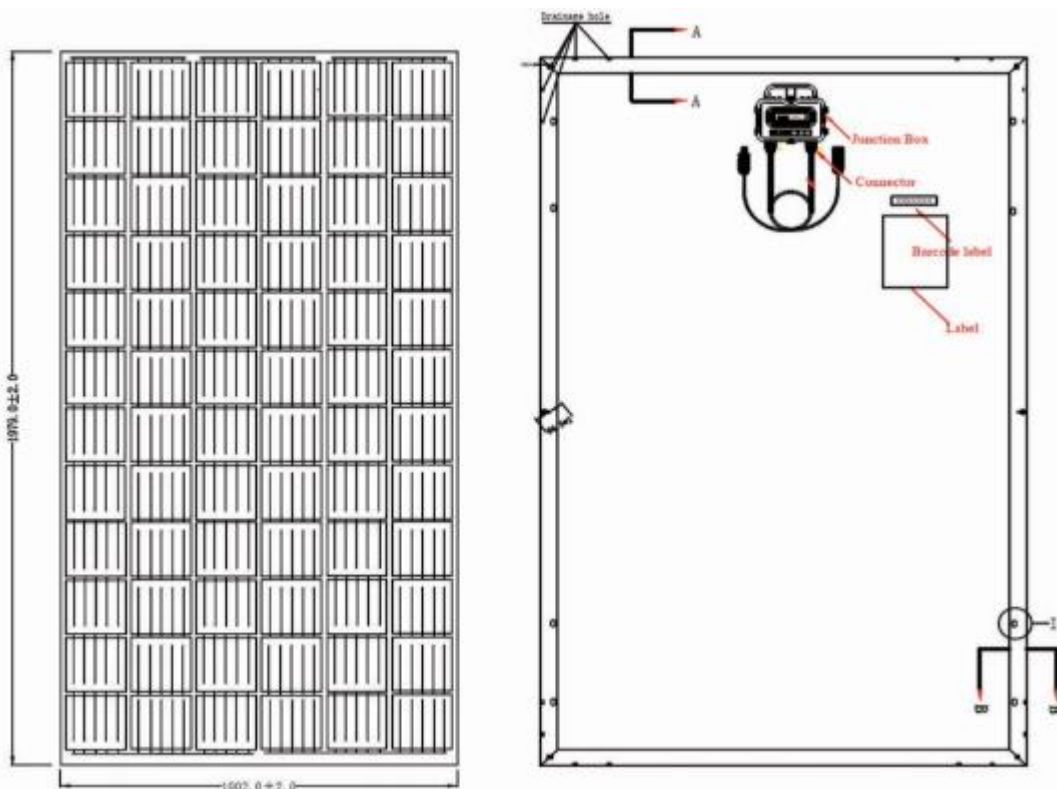


ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Max.Power (Pmax)	340W	350W	360W	370W	380W	390W	400W	410W
Optimum Operating Voltage (Vm)	38.20V	38.60V	39.00V	39.40V	39.80V	40.20V	40.60V	41.00V
Optimum Operating Current (Im)	8.90A	9.07A	9.23A	9.39A	9.55A	9.76A	9.88A	10.01A
Open-circuit Voltage (Voc)	46.60V	47.00V	47.40V	47.80V	48.20V	48.60V	49.00V	49.40V
Short-circuit Current (Isc)	9.49A	9.65A	9.81A	9.89A	10.13A	10.39A	10.57A	10.75A
Module Efficiency	17.50%	18.00%	18.60%	19.10%	19.60%	19.30%	19.90%	20.50%

Note: the specifications are obtained under the Standard Test Condition(STC): 1000W/m² solar irradiance, AM 1.5, Cell Temperature 25°C.

Solar Cell size :	Mono-crystalline: 156.75x156.75mm for 340-380W Mono-crystalline: 158.75x158.75mm for 390-410W
Output Tolerance (Pmax):	0~+5%
Number of cells:	72 cells in series
Module Dimension:	1956x992x35mm for 340-380W 1979x1002x35mm for 390-410W
Weight:	21.00kg for 340-380W 22.10kg for 390-410W
Max. System Voltage:	1000V DC
Max. Series Fuse Rating:	20A
Output Cable:	PV 4mm ²
Cable Length:	1100mm(43.3inches)
Number of Bypass Diodes:	3
Temperature cycling range:	(-40~+85°C)
NOTC:	45°C±2°C
Temperature coefficients of Isc:	+0.06%/°C
Temperature coefficients of Voc:	-0.30%/°C
Temperature coefficients of Pmax:	-0.39%/°C
Packing and Load Capacity:	31/pallet,338/20ft,828/40hq for 340-380W
	31/pallet,350/20ft,748/40hq for 390-410W



Anexo 7: Ficha técnica panel fotovoltaico Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 555-575 Watt

www.jinkosolar.com



Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 555-575 Watt MONO-FACIAL MODULE

N-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

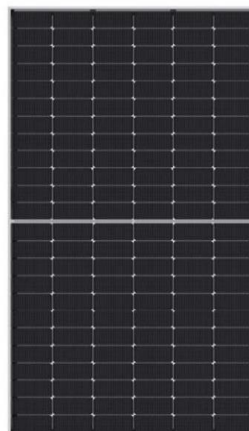
IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018

Occupational health and safety management systems



Key Features



SMBB Technology

Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



PID Resistance

Excellent Anti-PID performance guarantee via optimized mass-production process and materials control.



Durability Against Extreme Environmental Conditions

High salt mist and ammonia resistance.



Hot 2.0 Technology

The N-type module with Hot 2.0 technology has better reliability and lower LID/LETID.



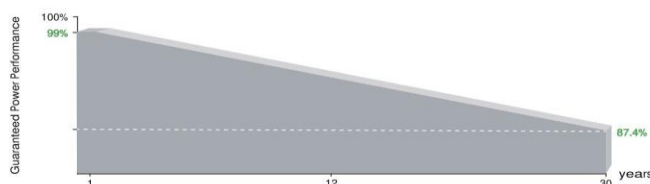
Enhanced Mechanical Load

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



POSITIVE QUALITY™
Continuous Quality Assurance

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

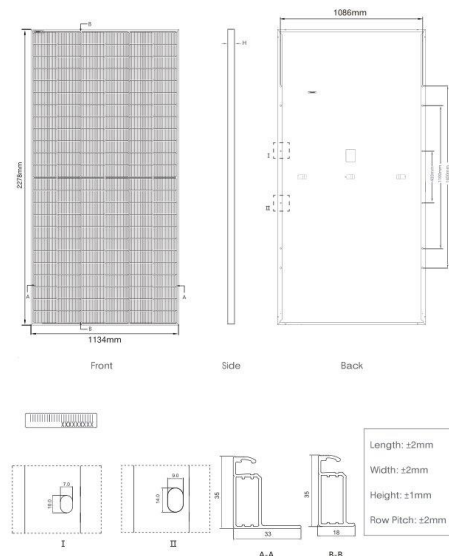


12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

0.40% Annual Degradation Over 30 years

Engineering Drawings



Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2278×1134×35mm (89.69×44.65×1.38 inch)
Weight	28 kg (61.73 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)
 31pcs/pallets, 62pcs/stack, 620pcs/ 40'HQ Container

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM555N-72HL4 JKM555N-72HL4-V		JKM560N-72HL4 JKM560N-72HL4-V		JKM565N-72HL4 JKM565N-72HL4-V		JKM570N-72HL4 JKM570N-72HL4-V		JKM575N-72HL4 JKM575N-72HL4-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	555Wp	417Wp	560Wp	421Wp	565Wp	425Wp	570Wp	429Wp	575Wp	432Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.64V	39.12V	41.77V	39.25V	41.92V	39.38V	42.07V	39.51V	42.22V	39.60V
Maximum Power Current (Imp)	13.33A	10.67A	13.41A	10.73A	13.48A	10.79A	13.55A	10.85A	13.62A	10.92A
Open-circuit Voltage (Voc)	50.34V	47.82V	50.47V	47.94V	50.60V	48.06V	50.74V	48.20V	50.88V	48.33V
Short-circuit Current (Isc)	14.07A	11.36A	14.15A	11.42A	14.23A	11.49A	14.31A	11.55A	14.39A	11.62A
Module Efficiency STC (%)	21.48%		21.68%		21.87%		22.07%		22.26%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.30%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.25%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.046%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

^{*}STC: Irradiance 1000W/m² Cell Temperature 25°C AM=1.5
 NOCT: Irradiance 800W/m² Ambient Temperature 20°C AM=1.5 Wind Speed 1m/s

Anexo 8: Ficha técnica panel fotovoltaico Cheetah HC 60M-V 325-345 Watt

www.jinkosolar.com



Cheetah HC 60M-V 325-345 Watt

MONO PERC HALF CELL MODULE

Positive power tolerance of 0~+3%

- Half Cell
- Mono PERC 60 Cell

PERC

KEY FEATURES



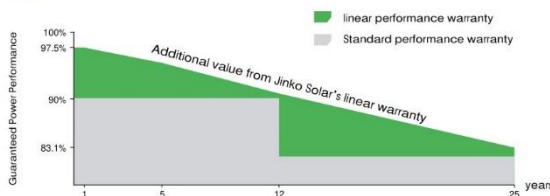
- 5 Busbar Solar Cell**
 5 busbar solar cell adopts new technology to improve the efficiency of modules, offers a better aesthetic appearance, making it perfect for rooftop installation.
- High Voltage**
 UL and IEC 1500V certified; lowers BOS costs and yields better LCOE
- High Efficiency**
 Higher module conversion efficiency (up to 20.45%) benefit from half cell structure (low resistance characteristic).
- PID Resistance**
 Excellent Anti-PID performance guarantee limited power degradation for mass production.
- Low-light Performance**
 Advanced glass and cell surface textured design ensure excellent performance in low-light environment.
- Severe Weather Resilience**
 Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).
- Durability Against Extreme Environmental Conditions**
 High salt mist and ammonia resistance certified by TUV NORD.

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

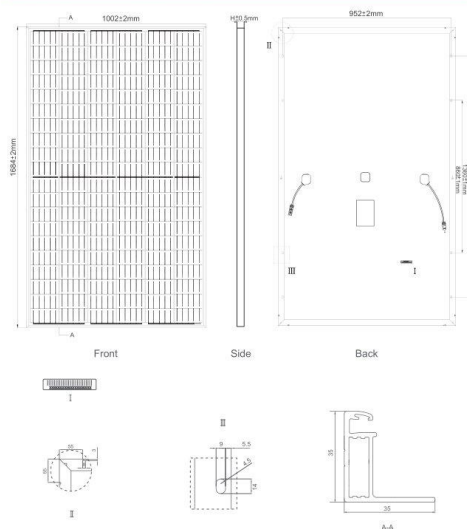
12 Year Product Warranty • 25 Year Linear Power Warranty



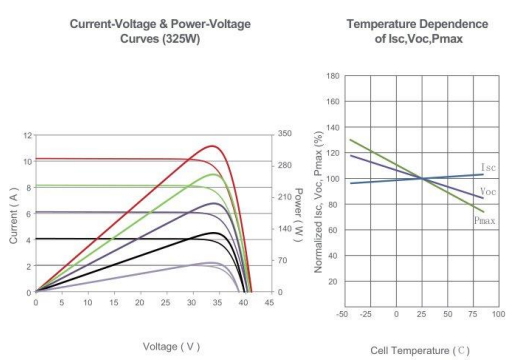
- ISO9001:2008, ISO14001:2004, OHSAS18001 certified factory
- IEC61215, IEC61730, UL1703 certified product



Engineering Drawings



Electrical Performance & Temperature Dependence



Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)
 31pcs/pallet, 62pcs/stack, 806pcs/40'HQ Container

Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono PERC 158.75×158.75mm
No. of Half-cells	120 (6×20)
Dimensions	1684×1002×35mm (66.30×39.45×1.38 inch)
Weight	19.0 kg (41.9 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1x4.0mm ² , (+) 290mm, (-) 145mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM325M-60H-V		JKM330M-60H-V		JKM335M-60H-V		JKM340M-60H-V		JKM345M-60H-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	325Wp	242Wp	330Wp	246Wp	335Wp	250Wp	340Wp	253Wp	345Wp	257Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	33.6V	31.6V	33.8V	31.8V	34.0V	32.0V	34.2V	32.2V	34.4V	32.4V
Maximum Power Current (Imp)	9.68A	7.66A	9.77A	7.74A	9.87A	7.82A	9.96A	7.86A	10.04A	7.94A
Open-circuit Voltage (Voc)	41.1V	38.0V	41.3V	38.2V	41.5V	38.4V	41.7V	38.6V	41.9V	38.8V
Short-circuit Current (Isc)	10.20A	8.54A	10.31A	8.65A	10.36A	8.74A	10.55A	8.86A	10.64A	8.97A
Module Efficiency STC (%)	19.26%		19.56%		19.85%		20.15%		20.45%	
Operating Temperature (°C)	-40°C~+85°C									
Maximum System Voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum Series Fuse Rating	20A									
Power Tolerance	0~+3%									
Temperature Coefficients of Pmax	-0.36%/°C									
Temperature Coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature Coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C									

STC: ☀ Irradiance 1000W/m² 📏 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5

NOCT: ☀ Irradiance 800W/m² 📏 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌀 Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: ± 3%

Anexo 9: Ficha técnica panel fotovoltaico M12 HJT GSM 560

GSM520W-550W/100H**Half Cell Mono Solar Panel****PID Resistance**

Excellent Anti-PID performance guarantee limited power degradation for mass production.

**Low-light Performance**

Advanced glass and cell surface textured design ensure excellent performance in low-light environment.

**Severe Weather Resilience**

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).

**Durability Against Extreme Environmental Conditions**

High salt mist and ammonia resistance



Model	GSM520	GSM530	GSM540	GSM550	GSM560
Maximum Power[Pmax]	520W	530W	540W	550W	560W
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	29.6	30.0	30.4	30.8	31.2
Open Circuit Voltage [Voc]	35.3	35.8	36.3	36.8	37.2
Short Circuit Current(Isc) [A]	18.87	19.03	19.19	19.35	19.51
Maximum Power Current(Imp) [A]	17.6	17.72	17.84	17.96	18.08
Module Efficiency [%]	21.7	22.1	22.5	21.9	23.3
Power Tolerance	0~+5W				
Temperature Coefficient of Isc(α_{Isc})	+0.040%/°C				
Temperature Coefficient of Voc(β_{Voc})	-0.250%/°C				
Temperature Coefficient of Pmax(γ_{Pmp})	-0.340%/°C				
STC	Irradiance 800W/m ² , Ambient Temperature 20°C				
Size	2185*1098*35mm				
Weight	25.6kg				

Anexo 10: Ficha técnica panel generador termoeléctrico TEG71-1.4-1.6

TEG P/N	Dimensions(mm)		V/K	Open circuit V	Matched load Ohm	Matched output Voltage	Matched output Power W	λ -W/°C	Heat Flow through module W
	Hot side	Cold							
TEG31-2.8-1.2	30×30	30×30	0.02273	2.5	0.3	0.84	6.5	1	154.8
TEG49-4.5-2.0	62×62	62×62	0.03091	3.4	2	1.33	13	1.3	220.3
TEG49-4.5-2.5	62×62	62×62	0.03091	3.4	0.24	1.33	12.2	1	200.0
TEG71-1.4-1.6	30×30	30×30	0.04636	5.1	1.9	1.92	3.9	0.5	84.8
TEG127-1.4-1.0	40×40	40×40	0.05818	6.4	1.8	3.2	5.2	2	104.0
TEG127-2.0-1.3	50×50	50×54	0.05818	6.4	1.3	3.2	7.9	2.02	143.6
TEG127-2.0-1.6	50×50	50×54	0.05818	6.4	1.6	3.2	6.4	1.62	114.3
TEG161-1.2-2.0	40×40	40×40	0.05818	6.4	6.8	4.04	3.7	0.85	77.1
TEG161-1.2-4.0	40×40	40×40	0.05727	6.3	13.4	4.04	3	0.6	54.5
TEG241-1.0-1.2	40×40	40×40	0.11000	12.1	10	6	3.6	1	72.0
TEG241-1.4-1.2	54×54	54×57	0.10455	11.5	4.5	7	7	2.18	120.7
TEG254-1.4-1.2	40×80	44×80	0.10455	11.5	4.8	7	7	2.3	125.0
TEG254-1.4-1.6	40×80	44×80	0.11636	12.8	7.2	6.7	6.2	1.6	101.6
TEG450-0.8-1.0	54×54	54×57	0.19091	21	28	12	5	1.45	83.3

Anexo 11: Diagrama de bloques del panel fotovoltaico acoplado al generador termoelectrico

