



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO
MATEMÁTICAS



**IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MENSUAL DE
TRES GENERADORES FOTOVOLTAICOS CON TECNOLOGÍAS
PERC, HIT Y CIGS, EN CONDICIONES DE IRRADIANCIA
SOLAR Y TEMPERATURA AMBIENTE PROPIOS DE LA
REGIÓN PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

PEDRO YULIAN PUMA ROQUE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS:
CON ESPECIALIDAD EN FÍSICA**

PUNO - PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MENSUAL DE TRES GENERADORES FOTOVOLTAICOS CON TECNOLOGÍAS PERC, HIT Y CIGS, EN CONDICIONES DE IRRADIANCIA SOLAR Y TEMPERATURA AMBIENTE PROPIOS DE LA REGIÓN PUNO

AUTOR

PEDRO YULIAN PUMA ROQUE

RECuento de palabras

22951 Words

RECuento de caracteres

130181 Characters

RECuento de páginas

132 Pages

Tamaño del archivo

8.4MB

Fecha de entrega

Sep 25, 2024 11:50 AM GMT-5

Fecha del informe

Sep 25, 2024 11:52 AM GMT-5

● **8% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 6% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)

Ricardo Romero Loayza
Ricardo Romero Loayza
DNI 25304031



Adelaida Otazu Conza
Adelaida Otazu Conza
LIC. CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICA
Dir. MATEMÁTICA APLICADA

Resumen



DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, por Su guía y bendiciones, y por mantener mi fe inquebrantable en que siempre estará conmigo. Agradezco profundamente a mis padres y hermanas, especialmente a mi madre Martha, cuyo amor y apoyo constantes han sido fundamentales para mí. También dedico este logro a mi familia, en particular a mi hija Leila Marie, quien ha llenado mi vida de alegría y me ha mostrado la grandeza de Dios, dándome la fuerza necesaria para alcanzar mis objetivos.

Pedro Yulian Puma Roque.



AGRADECIMIENTOS

Mi reconocimiento especial al director de tesis, Dr. Ricardo Romero Loaiza, por su interés, colaboración y dar viabilidad al presente trabajo de tesis.

A los docentes de la EP Físico Matemáticas por las exigencias durante la formación en pre grado; hoy en día son el cimiento de mi formación profesional.

Agradecimiento a los responsables de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables, por las facilidades brindadas para el trabajo dentro de sus instalaciones, así como la utilización de equipos e instrumentos los cuales permitieron el desarrollo de la presente tesis.

De manera especial, al Dr. Jan Amaru Palomino Tofflinger, docente de la Pontificia Universidad Católica del Perú, responsable principal del proyecto N°013-2020-FONDECYT-BM, auspiciada por PROCENCIA, desarrollando en distintas regiones del país; una de ellas Juliaca.

Pedro Yulian Puma Roque



ÍNDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ANEXOS

RESUMEN 14

ABSTRACT 15

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA..... 18

1.2. ENUNCIADOS DEL PROBLEMA 19

1.2.1. Problema general..... 19

1.2.2. Problemas especificos 19

1.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN..... 19

1.3.1. Hipótesis general 19

1.3.2. Hipótesis especificas 20

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO..... 20

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 23

1.5.1. Objetivo general 23

1.5.2. Objetivos específicos 23

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	25
2.1.1. Efecto fotovoltaico	31
2.1.2. Efecto fotoelctrico	32
2.1.3. Dopaje... ..	37
2.1.4. Panel solar	43
2.1.5. Tipos de células fotovoltaicas	44
2.1.5.1. Las células de silicio cristalino	45
2.1.5.2. Células de película delgada:.....	45
2.1.5.3. Células multiunión	46
2.1.5.4. Células orgánicas e híbridas:.....	46
2.1.6. Proceso de fabricación celulas de silicio cristalino.....	48
2.1.7. Parametros elementales de las paneles solares.....	49
2.1.8. Influencia de la Temperatura y la Radiación	51
2.1.9. Potencia del generador fotovoltaico.....	53
2.1.10. Tecnología PERC.....	57
2.1.11. Tecnología HIT(HJT).....	58
2.1.12. Tecnología CIGS.....	59
2.1.13. Clasificacion de los sistemas fotovoltaicos.....	60
2.1.14. Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR)	60
2.1.15. SFCR topologias mayormente utilizadas	61
2.1.16. Factor de dimensionamiento del inversor (FDI)	62
2.1.17. Rendimiento del módulo e inversor FV	63
2.1.17.1. Rendimiento del módulo η_m	63
2.1.17.2. Rendimiento del inversor	64
2.1.18. Comportamiento energético de una SFCR.....	64



2.1.18.1.Productividad Final (RF)	65
2.1.18.2.Rendimiento Referencial (RR).....	65
2.1.18.3.Rendimiento Global (RG).....	66

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE ESTUDIO	67
3.1.1. Características de los sistemas fotovoltaicos en estudio	68
3.1.1.1. Generador Fotovoltaico PERC.....	68
3.1.1.2. Generador Fotovoltaico HIT	68
3.1.1.3. Generador Fotovoltaico CIGS	69
3.1.2. Inversor Fotovoltaico	70
3.1.3. Instrumentación para registro de datos	75
3.1.3.1. Medicion de irradiancia	75
3.1.3.2. Medición de temperatura de los módulos fotovoltaicos	76
3.1.3.3. Medición de otros parámetros ambientales.....	78
3.1.3.4. Medición de parameteros eléctricos en DC y AC.....	79
3.1.3.5. Tarjeta de adquisición de datos (DAQ).....	81
3.1.3.6. Software de instrumentacion virtual LabView.	82
3.1.3.7. Acceso remoto a la computadora de monitoreo.....	84
3.2. POBLACIÓN	85
3.3. MUESTRA	85
3.4. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	85
3.4.1. Tipo de investigación	86
3.4.2. Variables	87
3.4.2.1. Variable independiente	87



3.4.2.2. Variable dependiente	87
3.4.2.3. Operacionalización de las variables	87
3.5. METODOLOGIA SEGÚN OBJETIVOS ESPECÍFICOS PLANTEADOS .	89
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. ANÁLISIS DE TEMPERATURA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	92
4.1.1. Temperatura mínima de los tres sistemas FV	92
4.1.2. Temperatura máxima de los tres sistemas FV	93
4.1.3. Temperatura promedio anual de los tres sistemas FV	94
4.2. COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS SISTEMAS FV	97
4.2.1. Irradiación incidente por unidad de área	97
4.2.2. Rendimiento de los generadores FV	98
4.2.3. Comportamiento energético de los sistemas	99
4.2.4. Sobre irradiancias en el plano inclinado	103
4.2.5. Situaciones de sobre irradiancia e irradiancia extrema año 2023	105
4.2.6. Energía disponible	106
4.2.7. Determinación de la potencia activa y potencia calculada	107
V. CONCLUSIONES	110
VI. RECOMENDACIONES	111
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
ANEXOS	117

TEMA: Generadores fotovoltaicos con distintas tecnologías.

ÁREA: Física.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Recursos Energéticos Solares y Eólica.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 30 de setiembre de 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Función trabajo en diferentes materiales	35
Tabla2 Clasificación de módulos fotovoltaicos comerciales.....	47
Tabla 3 Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico PERC.....	68
Tabla 4 Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico HIT/HJT	69
Tabla 5 Características eléctricas del módulo fotovoltaico CIGS	69
Tabla 6 Características del inversor SUNNY BOY modelo SB 1.5-VL-40.....	72
Tabla 7 Cumplimiento de normas técnicas del inversor SE3000H	73
Tabla 8 Resumen del arreglo fotovoltaico en estudio.....	74
Tabla 9 Sensor de temperatura pt-1000	77
Tabla 10 Operacionalización de variables	88
Tabla 11 Técnicas e instrumento de recolección de datos	90
Tabla 12 Área de captación y potencia instalada.....	97



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Efecto fotovoltaico de Bequerel 1839	31
Figura 2 Botella de vacío para efecto fotoeléctrico	32
Figura 3 Efecto fotoeléctrico en una placa	33
Figura 4 Potencial de frenado	34
Figura 5 Longitud de onda mínima	36
Figura 6 Línea histórica del desarrollo de la fotovoltaica	36
Figura 7 Átomos de silicio boro y fosforo	38
Figura 8 Láminas de silicio andes del dopaje	39
Figura 9 Longitud de onda mínima	40
Figura 10 Región de agotamiento	41
Figura 11 Efecto fotovoltaico en una célula solar	42
Figura 12 Composición interna de un panel solar	44
Figura 13 Curva I-V, P-V	51
Figura 14 Parámetros eléctricos del panel solar	52
Figura 15 Efecto de la irradiancia en la curva I-V	55
Figura 16 Efecto de la temperatura en la curva I-V	55
Figura 17 Tecnología PERC	57
Figura 18 Tecnología HIT/HJT	58
Figura 19 Tecnología CIGS	59
Figura 20 Esquema general de un SFCR	60
Figura 21 Tipos de inversores FV	62
Figura 22 Área de estudio	67
Figura 23 Inversores fotovoltaicos instalados en instituto EPIER	70



Figura 24	Inversor SB 1.5-VL-40.....	71
Figura 25	Esquema de instalación fotovoltaica con los tres sistemas SFCR	74
Figura 26	Instalación fotovoltaica real con los tres generadores FV.....	75
Figura 27	Piranómetro Eko MS-80.....	76
Figura 28	Sensor de temperatura RTD	77
Figura 29	Estación meteorológica WS500	78
Figura 30	Comunicación local entre inversor y PC.....	79
Figura 31	Plataforma de monitoreo Sunny Portal	80
Figura 32	Distribución de instrumentación del sistema DAQ.....	81
Figura 33	Diagrama de flujo del Software LabView asociado al SFCR.....	83
Figura 34	Software AnyDesk para acceso remoto al computador	83
Figura 35	Sincronización de las carpetas en el Google drive.....	84
Figura 36	Registro de temperatura mínima anual y mensual	92
Figura 37	Registro de temperatura anual máxima en los tres sistemas	93
Figura 38	Registro de temperatura promedio anual en los tres sistemas.....	94
Figura 39	Registro de temperatura promedio en los tres sistemas octubre 2022	95
Figura 40	Resumen de temperatura promedio mensual	95
Figura 41	Caracterización térmica día 10 octubre 2022.....	96
Figura 42	Energía solar incidente por cada m ² de área.....	98
Figura 43	Rendimiento de los generadores fotovoltaicos.....	98
Figura 44	Rendimiento energético del sistema FV.....	99
Figura 45	Datta Logger de temperatura, para los 03 inversores.....	100
Figura 46	Comportamiento de temperatura de los inversores fotovoltaicos	101
Figura 47	Tensión y corriente DC registrada en inversores	102
Figura 48	Sobre Irradiancias incidentes en el plano del generador	103



Figura 49 SFCR sobredimensionado y expuesto a sobre irradiancia	104
Figura 50 Irradiancia extrema e incidencia en el tiempo periodo 2023.....	105
Figura 51 Energía solar incidente en forma de irradiación.....	106
Figura 52 Potencia activa real y calculada para el sistema PERC.....	107
Figura 53 Potencia medida y calculada sistema HIT.....	108
Figura 54 Potencia medida y calculado sistema CIGS	109



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Monitoreo del sistema fotovoltaicos (Irradiancia y temperaturas).....	117
ANEXO 2 Monitoreo del sistema fotovoltaicos (Parámetros eléctricos)	117
ANEXO 3 Generación de gráficos e interpolación en programa Origin	118
ANEXO 4 Monitoreo del sistema fotovoltaicos (Parámetros meteorológicos).....	118
ANEXO 5 Álbum fotográfico	118
ANEXO 6 Ficha técnica del módulo FV CIGS-CdF-1150A1 ETERGRIGHT.....	118
ANEXO 7 Ficha técnica del módulo HIT. VBHN330SJ53 PANASONIC	118
ANEXO 8 Ficha técnica del módulo FV PERC. N/330.....	118
ANEXO 9 LabView características de programación utilizada.....	118
ANEXO 10 Constancia de la PUCP.....	118
ANEXO 11 Declaración Jurada de Autenticidad de Tesis.....	118
ANEXO 12 Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional....	118



RESUMEN

La inserción de nuevas tecnologías en módulos fotovoltaicos plantea investigar su desempeño en el altiplano Puneño, donde las condiciones climáticas, como la temperatura e irradiancia solar, son factores determinantes para su rendimiento energético. Este estudio tiene como objetivos: Evaluar el comportamiento de temperatura de los sistemas fotovoltaicos PERC, HIT y CIGS en las condiciones de Puno; y realizar un análisis comparativo sobre el rendimiento anual de estos sistemas fotovoltaicos, en función de la irradiancia global. La metodología es experimental, con la instalación de tres generadores fotovoltaicos usando tecnologías PERC (1675Wp), HIT (1650Wp) y CIGS (1540Wp), cada uno conectado a un inversor de 1500W. Los datos ambientales y eléctricos se recogen desde mayo de 2021 hasta la actualidad, se ha tomado como data de estudio el periodo anual 2022. A 3822 msnm, bajo un clima frío y seco. Los resultados muestran que el sistema CIGS alcanza la mayor temperatura (40°C), seguido por PERC (38°C) y HIT (33°C), con variaciones entre 15°C y 21°C. El sistema CIGS tiene una eficiencia entre 8.5% y 11%, HIT entre 14% y 18.25%, y PERC entre 15.5% y 18.5%. El rendimiento global (PR) de CIGS varía entre 58% y 74%, PERC entre 68% y 88%, y HIT, el más eficiente, entre 75% y 90%. Los resultados indican que HIT es el más adaptable y eficiente bajo las condiciones del altiplano de Puno.

Palabras clave: Altiplano Puneño, Comportamiento térmico, Irradiancia, Rendimiento energético, Tecnologías fotovoltaicas.



ABSTRACT

The introduction of new technologies in photovoltaic modules suggests investigating their performance in the Puno highlands, where climatic conditions such as temperature and solar irradiance are determining factors for their energy performance. This study aims to: evaluate the temperature behavior of PERC, HIT, and CIGS photovoltaic systems under the conditions of Puno; and conduct a comparative analysis of the annual performance of these photovoltaic systems, based on global irradiance. The methodology is experimental, with the installation of three photovoltaic generators using PERC (1675Wp), HIT (1650Wp), and CIGS (1540Wp) technologies, each connected to a 1500W inverter. Environmental and electrical data have been collected since May 2021, with the annual period of 2022 used as study data. The installation is located at 3822 meters above sea level, in a cold and dry climate. The results show that the CIGS system reaches the highest temperature (40°C), followed by PERC (38°C) and HIT (33°C), with temperature variations between 15°C and 21°C. The CIGS system has an efficiency between 8.5% and 11%, HIT between 14% and 18.25%, and PERC between 15.5% and 18.5%. The global performance ratio (PR) of CIGS ranges from 58% to 74%, PERC from 68% to 88%, and HIT, the most efficient, ranges from 75% to 90%. The results indicate that HIT is the most adaptable and efficient under the conditions of the Puno highlands.

Keywords: Puno Highlands, Thermal behavior, Irradiance, Energy performance, Photovoltaic technologies.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La energía fotovoltaica se ha convertido en una fuente clave para la generación de electricidad sostenible y limpia (García et al., 2018), Los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red (SFCR) han ganado relevancia como una opción importante en la transición hacia energías renovables. No obstante, es fundamental analizar el rendimiento de estos sistemas en condiciones extremas, como las altitudes elevadas, donde factores climáticos, especialmente la temperatura y la irradiancia, pueden afectar considerablemente su desempeño. De acuerdo con (García et al., 2018), la tensión y la corriente generadas por los módulos están directamente relacionadas con estos factores.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una investigación que incluye la implementación, evaluación y caracterización de tres sistemas fotovoltaicos, utilizando tecnologías PERC (celdas de emisor pasivo posterior), HIT (celdas de heterounión de silicio amorfo-cristalino) y CIGS (celdas de cobre, indio, galio, selenio/azufre). Estos sistemas están expuestos a las condiciones climáticas de la región de Puno, específicamente en el centro de investigación en energías renovables y eficiencia energética de la Universidad Nacional de Juliaca, a una altitud de aproximadamente 3827 msnm, con coordenadas -15.49° de latitud sur y -70.13° de longitud. La instrumentación instalada en el sitio revela altos niveles de irradiancia y bajas temperaturas, por lo que el estudio busca entender cómo estas condiciones extremas afectan el rendimiento del sistema fotovoltaico en la conversión de energía solar en electricidad (Benitez et al., 2019).

Este estudio se centra en la recolección de datos a lo largo de un del año 2021, 2022 y también parte del año 2023, obtenidos de los Sistemas Fotovoltaicos Conectados



a Red (SFCR), teniendo en cuenta factores como las condiciones climáticas, la radiación solar y la temperatura, Al analizar las interacciones entre el rendimiento del generador fotovoltaico, la temperatura y la irradiancia propias del entorno, junto con el desempeño del inversor, se busca proporcionar recomendaciones útiles para optimizar el diseño y funcionamiento de estos sistemas en climas extremos (Pascual et al., 2021).

El objetivo siguiente de este estudio es identificar experimentalmente la relación entre el rendimiento energético de los tres sistemas fotovoltaicos y los parámetros ambientales que tienen mayor impacto en su funcionamiento.

Este estudio busca contribuir al avance del conocimiento científico y técnico en el ámbito de la energía fotovoltaica, proporcionando datos valiosos para la toma de decisiones en el diseño y planificación de sistemas de generación de energía renovable en regiones con climas extremos (Mendoza et al., 2018). Además, se espera que los resultados puedan aplicarse en contextos similares, con el fin de optimizar la eficiencia y sostenibilidad de la generación de energía solar fotovoltaica a nivel global (Martínez et al., 2019).

La investigación se desarrolla de la siguiente manera:

En el Capítulo I: Introducción, se presenta el planteamiento del problema, la hipótesis y la justificación del trabajo de investigación. El Capítulo II: Revisión de la literatura, expone los antecedentes relacionados con el estudio y desarrolla el marco teórico y conceptual. El Capítulo III detalla los materiales y métodos utilizados, incluyendo la ubicación, población, muestra y los métodos empleados. En el Capítulo IV se muestran los resultados y la discusión según los objetivos de la investigación. Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos que respaldan la investigación.



1.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

Dentro del contexto peruano en el año 2006 se crea la ley 28832 que considera generación eficiente de la energía eléctrica, tomándose en consideración distintas fuentes tales como el agua, gas, entre otros así mismo entra las energías renovables; principalmente el viento y sol. debido a las condiciones geográficas del Perú, cuenta con ambos recursos en la zona sur y norte respectivamente. posteriormente en el año 2008 la ley 1002, se promueve puntualmente el uso de energías renovables para la generación de eléctrica, creándose centrales solares en el sur peruano y eólicas en el norte. posterior a ello entra en detalle el tema de generación distribuida lo cual implica la creación de pequeñas y medianas unidades de generación fotovoltaica con el proposito de inyectar a la red eléctrica, a la actualidad todavía sigue en discusión el aspecto normativo y reglamentario; no obstante el uso de la energía solar fotovoltaica va en aumento primordialmente por la disminución del costo de paneles solares, inversores y controladores, y la falta de acceso de redes eléctricas a zonas alejadas, en el Perú se tiene distintas unidades de generación fotovoltaicas aisladas y conectas a red todavía como plantas piloto, se puede observar en islas del lago Titicaca y también en universidades.

Sin embargo, la variabilidad del clima peruano y sobre todo en los Andes del altiplano presentan condiciones especiales de temperatura y altos niveles de irradiancia; los mismos que se involucran en la operatividad de estos sistemas fotovoltaicos, así mismo se ha detectado pocos estudios sobre el uso de este tipo de energía bajo las condiciones del altiplano Puneño.

En tal sentido la presente tesis se enfoca en el estudio de tres instalaciones fotovoltaicas conectadas a red e instaladas en la ciudad de Juliaca a más de 3800 msnm.



no existe estudios en el cual se comparen el desempeño de son de gran interés para masificar instalaciones fotovoltaicas en esta zona del Perú.

1.2. ENUNCIADOS DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cómo afectan las condiciones específicas de irradiancia solar y temperatura ambiente; propios de la región de Puno, a la operación mensual de tres generadores fotovoltaicos con tecnologías PERC, ¿HIT y CIGS?

1.2.2. Problemas especificos

- ¿Cómo impactan las fluctuaciones mensuales de la temperatura en la región de Puno, en la eficiencia de los generadores fotovoltaicos PERC, HIT y CIGS?
- ¿Cuál es el efecto de la variabilidad mensual de la irradiancia solar en Puno en la producción de energía y eficiencia de los generadores fotovoltaicos PERC, HIT y CIGS?

Ante la falta de estudios exhaustivos en este contexto, la respuesta a estas interrogantes es esencial para desarrollar estrategias efectivas que optimicen la implementación de sistemas fotovoltaicos y promuevan la sostenibilidad en entornos del Altiplano puneño.

1.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

La implementación y caracterización mensual de generadores fotovoltaicos PERC, HIT y CIGS, bajo condiciones específicas de irradiancia



solar y temperatura en Puno, Permite identificar el desempeño del rendimiento de cada tecnología, contribuyendo al diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos adaptados a dicha región, con este tipo de tecnologías emergentes.

Se espera que este estudio facilite la selección adecuada de tecnologías fotovoltaicas en entornos similares, promoviendo el desarrollo sostenible y la eficiencia energética en regiones de altiplano.

1.3.2. Hipótesis específicas

- El comportamiento de la temperatura en los sistemas de generación fotovoltaica PERC, HIT, y CIGS, instalados bajo condiciones propios del altiplano puneño, demuestran un rendimiento favorable una estas tecnologías.
- El comportamiento de la Irradiancia global en el Altiplano puneño, contribuye en el rendimiento anual de los sistemas de generación fotovoltaica PERC, HIT, y CIGS

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El crecimiento veloz de la población global y la expansión del sector industrial han generado un significativo incremento en la demanda de energía eléctrica. Los recursos energéticos no renovables, como el petróleo, el carbón y el gas, son comúnmente empleados en los sistemas de generación eléctrica convencionales. Sin embargo, el uso de estos recursos conlleva la emisión de dióxido de carbono (CO₂) y otros contaminantes perjudiciales para el medio ambiente. Esta situación, junto con la fluctuación impredecible de los combustibles fósiles, impulsa a las naciones a explorar nuevas fuentes de energía.



Por consiguiente, en la actualidad, investigadores, ecologistas y líderes políticos a nivel mundial están explorando grandes fuentes de energía renovable como alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles convencionales. Se espera que esto conduzca a una disminución gradual en las emisiones. Según estudios, para mitigar el impacto ambiental, se requiere aumentar la proporción de electricidad generada a partir de fuentes renovables al 37% para el año 2040,

El fenómeno de transformar la radiación solar en energía eléctrica, conocido como efecto fotoeléctrico, se produce cuando los fotones interactúan con un material semiconductor, generando pares de electrones y huecos. Cuando la energía de un fotón supera un umbral específico, los portadores de carga se elevan a niveles energéticos más altos. En la estructura de la unión p-n de los semiconductores, se capturan estos portadores de carga, facilitando su movimiento y generando corriente eléctrica. Este proceso es fundamental en el funcionamiento de las células solares fotovoltaicas, caracterizadas por su alta eficiencia en la conversión de energía solar en eléctrica.

En la actualidad, se dispone de una amplia gama de tecnologías para la conversión de energía solar. Aunque los concentradores solares han sido utilizados durante mucho tiempo para generación térmica, su uso ha disminuido en los últimos años. Esta tendencia se debe a la adopción de nuevas tecnologías, como la energía fotovoltaica a gran escala, que presentan un menor riesgo y una mayor eficiencia. Durante mucho tiempo, la tecnología de oblea de silicio ha dominado el mercado de paneles solares, pero las células solares de película delgada (TFSC) representan una alternativa prometedora. Estas células, con un espesor mínimo y un diseño optimizado para el espectro solar, ofrecen una alta eficiencia en diversas condiciones ambientales y pueden aplicarse en una variedad de superficies, lo que las convierte en una opción versátil para múltiples aplicaciones.



La introducción de una nueva tecnología de deposición promete reducir tanto el costo como el tiempo de fabricación en el sector. Entre las tecnologías de película delgada disponibles se encuentran CdTe, silicio amorfo (a-Si) y CIGS, siendo estas últimas reconocidas por su alta eficiencia en la conversión solar. Investigaciones detalladas, como las de Katee et al. y Tossa et al., han explorado exhaustivamente el rendimiento de diferentes tecnologías fotovoltaicas bajo diversas condiciones ambientales, revelando que los módulos micromorph muestran el mejor comportamiento, con un rendimiento promedio del 92%. Además, se han llevado a cabo evaluaciones de seis tecnologías fotovoltaicas en varias regiones de Brasil, destacando la degradación significativa experimentada por los módulos de silicio cristalino en áreas con altas temperaturas y humedad relativa. Investigadores en diferentes países como India, Pakistán, Perú y Grecia han llevado a cabo estudios similares para evaluar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos en distintos entornos ambientales.

Este estudio de investigación se centró en comparar el rendimiento de diversos módulos fotovoltaicos con el propósito de analizar cómo ciertos parámetros operativos afectan su eficiencia. Se evaluaron la temperatura del módulo y la intensidad de la irradiancia para comprender en profundidad su impacto, especialmente en relación con la desviación de las condiciones estándar de prueba (STC). Además, se llevó a cabo una caracterización exhaustiva de las condiciones de funcionamiento de los módulos fotovoltaicos para comprender mejor la influencia de la variación de las condiciones STC en su rendimiento. Todas las pruebas se realizaron en Bagdad, Irak, durante un período de aproximadamente siete meses, desde septiembre de 2020 hasta mayo de 2021, con el objetivo principal de describir las condiciones operativas en Bagdad y resaltar los hallazgos clave obtenidos.



1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Implementar y realizar una caracterización mensual de los generadores fotovoltaicos PERC, HIT y CIGS bajo condiciones específicas de irradiancia solar y temperatura ambiente de la región de Puno, con el fin de evaluar comparativamente su rendimiento energético y determinar la tecnología más eficiente y adaptada a las condiciones climáticas del altiplano puneño.

1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento mensual de temperatura en los sistemas de generación fotovoltaica PERC, HIT y CIGS, instalados en condiciones climatológicas propios del altiplano puneño a fin de verificar su influencia en el rendimiento energético de los mismos.
- Evaluar el comportamiento mensual de la irradiancia global incidente en los generadores fotovoltaicos PERC, HIT y CIGS, instalados en condiciones climatológicas propios del altiplano puneño con el propósito de verificar su influencia en el rendimiento energético de los mismos, dentro del altiplano puneño.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se abordan en profundidad los fundamentos que sustentan el desarrollo de la tesis, revisando de manera concisa los conceptos clave relacionados con la generación de electricidad mediante Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR). Se analizan de forma detallada los aspectos más importantes de una instalación fotovoltaica, con especial énfasis en el generador fotovoltaico, formado por varios módulos o paneles solares, y el inversor, encargado de convertir la energía de corriente continua (CC) en corriente alterna (CA) dentro del contexto de sistemas conectados a la red.

Adicionalmente, se realiza un análisis pormenorizado de la implementación y caracterización mensual de tres generadores fotovoltaicos PERC, HIT y CIGS en condiciones de irradiancia solar y temperatura ambiente propias de la región de Puno. Este enfoque minucioso permite obtener una comprensión más completa y detallada de los comportamientos específicos de cada tipo de generador frente a las condiciones climáticas particulares de la región. Es trascendental destacar que, en la zona de Puno, se presenta una combinación ideal de niveles de irradiancia elevados, así como temperaturas ambientes consistentemente por debajo de los 25°C, factores sumamente propicios para el óptimo rendimiento de los sistemas FV.

Se resalta que las condiciones estándar de prueba (STC, por sus siglas en inglés) especifican una temperatura de 25°C y una irradiancia de 1000W/m², definiendo las condiciones ideales para que los SFCR operen de manera eficiente.



2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En el artículo titulado: “Effect of temperature and solar irradiance on the performance of 50 hz photovoltaic wireless power transfer system”, desarrollado por (Irwanto et al., 2023) se examinó cómo la temperatura y la irradiancia solar afectan el rendimiento del sistema de transferencia de energía inalámbrica fotovoltaica (PVWPT) de 50 Hz. Los hallazgos indicaron que un aumento en la irradiación solar mejoraba el rendimiento, y se encontró que la eficiencia máxima se obtenía al posicionar la bobina del relé magnético entre el TC y el RC.

En el artículo titulado: “Impact of high temperature on PV productivity in hot desert climates”, (Hashim & Hassan, 2022) desarrollaron un informe donde se examina cómo la alta temperatura ambiente y la intensa irradiación solar afectan el rendimiento global de los sistemas fotovoltaicos en regiones con climas desérticos cálidos. Se llega a la conclusión de que, aunque la temperatura elevada tiene un efecto adverso, la producción anual de energía del sistema tiende a mantenerse constante gracias a la compensación proporcionada por la alta radiación solar de la zona y el clima relativamente frío durante el invierno.

En el artículo titulado: “Analysis of The Impact of Wind and The Environmental Temperature on The Performance of a Rooftop Solar PV System: A Case Study of 52,2 kWp PT PLN Research and Development Center Rooftop PV Systems”, (Agussalim, 2023) desarrollaron un informe donde se examina cómo la temperatura y la irradiancia afectan el funcionamiento de un sistema fotovoltaico en un tejado. Se señala que una mayor exposición solar mejora la eficiencia del inversor, mientras que temperaturas más bajas durante los días lluviosos aumentan la eficiencia de los paneles solares. Además, se evalúa cómo los parámetros climáticos, como la irradiancia, la temperatura ambiente, la



temperatura del módulo fotovoltaico, la velocidad y dirección del viento, influyen en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en tejados, siguiendo las pautas de la norma IEC 61724-1:2017.

En el artículo titulado: “Effect of Temperature on Solar cell performance in a Sri Lankan context”,(De Silva & Sachintha, 2022) analizaron cómo la temperatura afecta el rendimiento de las células solares en Sri Lanka, pero no aborda explícitamente el impacto conjunto de la temperatura y la irradiancia en los sistemas fotovoltaicos. Se examinó cómo la temperatura del panel fotovoltaico influye en la eficiencia de conversión de energía solar en condiciones reales específicas de Sri Lanka. Los resultados experimentales sugieren que el voltaje, la corriente y la potencia pueden disminuir con el tiempo a medida que la temperatura del panel solar aumenta.

En el artículo titulado: “Comparative Analysis of PV System Performance in Different Environmental Conditions”, (Azaz et al., 2020) examinaron cómo la fluctuación de la temperatura y la irradiancia solar impacta en el rendimiento de un panel fotovoltaico de 240 V, considerando factores como la potencia máxima, la eficiencia y el factor de llenado. A través de simulaciones y resultados, se presenta el porcentaje de cambio en estos parámetros debido a las variaciones en la temperatura y la irradiancia solar. Se investigaron los efectos de estas variaciones en la potencia máxima, la eficiencia y el factor de llenado del panel fotovoltaico de 240 V utilizando el software Simulink/Matlab. Los resultados indican una variación porcentual en la potencia máxima, la eficiencia y el factor de llenado en respuesta a cada cambio de temperatura de un grado centígrado y a cada cambio de 20 W/m² en la irradiancia solar.

En el artículo titulado: “Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells”, (Cotfas et al., 2018) examinaron cómo la temperatura y la irradiancia



afectan los parámetros clave de las células fotovoltaicas, como la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. Se presenta un análisis sobre el impacto de la temperatura y la irradiancia en estos parámetros para cuatro tipos de células fotovoltaicas comerciales: silicio monocristalino (MSi), policristalino (PSi), silicio amorfo (AsI) y la unión múltiple de IngAP/InGaaSGe (Emcore).

En el artículo titulado: “Evaluating the Impacts of Ground and Atmospheric Conditions on the Efficiency of Solar Energy System and Its Economic Analysis”, (Saleh et al., 2018) examinaron cómo la temperatura y la radiación solar influyen en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos (PV). Se destaca que la temperatura incide en la temperatura de las células de los paneles fotovoltaicos, mientras que la radiación solar se ve afectada por la pendiente y el acimut de los módulos fotovoltaicos. Se presenta un diseño completo de un sistema fotovoltaico y de baterías independiente para abastecer de energía eléctrica a una estación base móvil en Choman, Erbil, Irak. Se enfatiza que la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos se ve afectada por la temperatura y la radiación solar, así como por la reflectancia del suelo y la temperatura ambiente, lo que a su vez influye en su rendimiento económico. Por lo tanto, varios factores, incluyendo la temperatura y la radiación solar, tienen un impacto significativo en la eficiencia y el rendimiento económico de los sistemas fotovoltaicos.

En el artículo titulado: “Power Generation Simulation and Comparison of p-PERC and HIT Bifacial Modules”, (Jiang et al., 2021) examinaron la producción de energía de los módulos bifaciales P-PERC y HIT en diversos entornos de instalación. Se observa que los efectos de diferentes entornos de instalación en estos módulos, en términos de energía generada en Beijing, muestran una ventaja notable en la producción de energía debido a un coeficiente de temperatura más bajo y un factor de bifacialización más alto. Se nota que la producción de energía de ambos tipos de módulos bifaciales sigue patrones



similares en distintos entornos de instalación, aunque los módulos bifaciales HIT destacan por su menor coeficiente de temperatura y mayor factor de bifacialización.

En el artículo titulado: “Recent Progress in Large-Area Perovskite Photovoltaic Modules(Wang et al., 2022)” examinaron diversas técnicas de deposición de soluciones para películas de perovskita de gran área, así como los efectos de las condiciones operativas y los diferentes diseños estructurales de los sistemas de película delgada de perovskita (PSM), que incluyen tecnologías de procesamiento y arquitecturas de dispositivos. Se destaca la escalabilidad de los métodos de deposición basados en soluciones para películas de perovskita. Se abordan los desafíos que enfrentan las aplicaciones a gran escala y se proponen áreas de investigación futura. Aunque las células solares de perovskita (PSC) exhiben una alta eficiencia, su integración en módulos a gran escala plantea desafíos adicionales. Se subraya la importancia de los métodos de fabricación y los diseños estructurales en la mejora de los PSM. Además.

En el artículo titulado: “Experimental Evidence of PID Effect on CIGS Photovoltaic Modules”, (Boulhidja et al., 2020), abordaron la evidencia experimental del fenómeno de degradación potencial inducida (PID) en los módulos fotovoltaicos de CIGS. Se destaca que el PID puede tener un impacto significativo en el rendimiento de las cadenas fotovoltaicas (PV) compuestas por múltiples módulos de silicio cristalino, especialmente en climas cálidos y húmedos. Se observa que los módulos CIGS también son susceptibles a la degradación inducida por PID, particularmente bajo altos voltajes negativos. Sin embargo, se plantea que es posible mitigar parcialmente el efecto de PID aplicando un voltaje positivo.

En el artículo titulado: “Performance of different photovoltaic technologies for amorphous silicon (a-si) and copper indium gallium di-selenide (cigs) photovoltaic



modules”, (Kadia et al., 2022), examinaron el desempeño de los módulos fotovoltaicos de silicio amorfo (a-Si) y diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) en el contexto de las condiciones climáticas de Iraq. Sin embargo, no se incluye información específica sobre los módulos fotovoltaicos "PERC" o de "impacto". En el estudio, se comparó el rendimiento de dos tipos de tecnologías fotovoltaicas (PV), a saber, el silicio amorfo (a-Si) y el diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), en las condiciones climáticas de Bagdad, Iraq. Se observó que el módulo solar CIGS exhibió la mayor eficiencia, alcanzando un 7.3%, mientras que el módulo solar amorfo registró la eficiencia más baja, con un 5.5%.

En el artículo titulado: "Physics-based electrical modelling of CIGS thin-film photovoltaic modules for system-level energy yield simulations," (Ramesh et al., 2022) presentaron un modelo eléctrico fundamentado en principios físicos para la tecnología CIGS, con el propósito de permitir a profesionales en todos los niveles de la cadena de valor fotovoltaica simular el rendimiento energético a nivel de sistema. Este modelo ha sido validado mediante mediciones de varios módulos comerciales y se destaca por tener un error de estimación de potencia nRMSE significativamente bajo, alcanzando tan solo el 1.2%. Además, se resalta que el error de estimación de potencia del modelo se mantiene dentro del rango de 5 en todas las condiciones de operación, lo que subraya su robustez y precisión.

En el artículo titulado: "Performance analysis of crystalline silicon and CIGS photovoltaic modules in outdoor measurement", (Luboń et al., 2017) muestran en detalle las mediciones al aire libre realizadas tanto en el silicio fotovoltaico como en los módulos CIGS, junto con la simulación de la producción de energía durante el período experimental. Los resultados obtenidos revelaron una marcada influencia de la irradiancia y la temperatura en la producción de energía de los paneles fotovoltaicos. Se observó que



la producción de energía de los módulos de silicio multicristalino fue superior a la de los módulos CIGS. Además, se encontró que el coeficiente de potencia de temperatura del módulo CIGS es inferior al del módulo de silicio multicristalino. Se llevó a cabo una comparación exhaustiva de las características constructivas y eléctricas entre los módulos CIGS y el silicio multicristalino.

Angulo y Conde (2019) evaluaron métodos para estimar la eficiencia y predecir la energía generada por sistemas fotovoltaicos en climas de Perú. Aplicaron modelos empíricos y físicos para comprender el comportamiento de dichos sistemas, pero estos modelos no se ajustaron correctamente a los datos debido a la histéresis presente antes y después del mediodía, lo que exigió modificaciones. Como solución, se planteó una metodología nueva que fusiona el modelo de Osterwald con algoritmos de filtrado computacional, mejorando significativamente la precisión en la predicción de energía y en la estimación de la potencia máxima bajo condiciones STC.

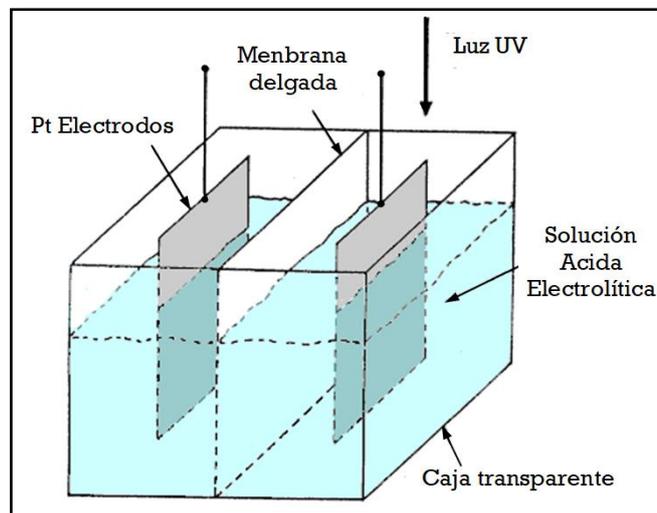
Zamalloa et al. (2021) realizan un análisis detallado sobre la ocurrencia de eventos de sobreirradiación extrema en la ciudad de Lima, Perú. Durante un evento notable que tuvo lugar el 23 de marzo de 2020, se registró un impresionante pico de irradiancia de 1543 W/m^2 . Este valor se obtuvo a partir de mediciones realizadas por cuatro instrumentos independientes, todos los cuales lograron captar simultáneamente este máximo histórico. En su estudio, los autores llevaron a cabo una comparación exhaustiva de la distribución espectral de este evento extremo con la de condiciones de cielos despejados y nublados. Los resultados evidencian una mejora significativa en la irradiación durante el evento de sobreirradiación, particularmente en las regiones del espectro correspondiente a la luz visible y la infrarroja cercana, que abarca un rango de longitud de onda de 450 nm a 1100 nm.

2.1.1. Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico, observado por el Físico de nacionalidad Francesa Alexandre Edmond Becquerel en 1839, convierte la energía luminosa en electricidad mediante ciertos materiales semiconductores. Estos materiales absorben la energía de los fotones, rompen enlaces químicos y liberan cargas eléctricas que se pueden utilizar para realizar trabajo.

Figura 1

Efecto fotovoltaico de Bequerel 1839



Nota: la figura detalla una pequeña batería en su forma básica (Lamigueiro, 2020)

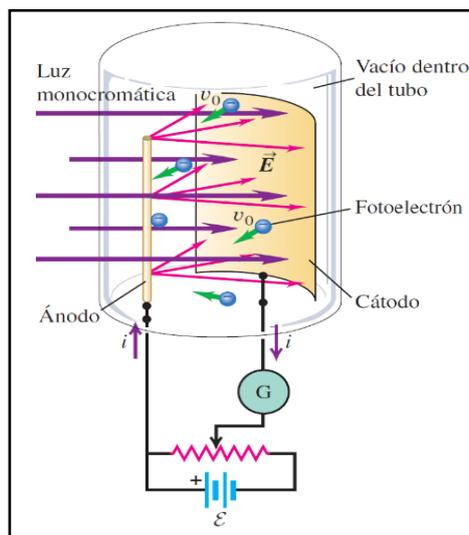
Los semiconductores en dispositivos fotovoltaicos, como silicio (Si) monocristalino, policristalino y amorfo; arseniuro de galio (GaAs); diseleniuro de cobre e indio (CuInSe_2); diseleniuro de cobre, galio e indio (CuInGaSe_2); y telururo de cadmio (CdTe), son elegidos por su capacidad de absorción de la radiación solar, costo y impacto ambiental.

2.1.2. Efecto fotoeléctrico

Heinrich Hertz fue el primero en descubrir el efecto fotoeléctrico al notar que ciertos metales liberan electrones al ser expuestos a la luz ultravioleta. Este fenómeno no podía explicarse adecuadamente con las teorías clásicas de la época. Para que un electrón logre escapar de la superficie del metal, debe absorber una cantidad suficiente de energía de la luz incidente que le permita vencer la atracción ejercida por los iones positivos en el material. Esta atracción genera una barrera de energía potencial que mantiene a los electrones dentro del material (Fredman & Zemansky, 2021).

Figura 2

Botella de vacío para efecto fotoeléctrico



Nota: la figura detalla una botella de vidrio al vacío (Fredman & Zemansky, 2021)

En 1905 Einstein explicó de manera teórica el análisis correcto del efecto fotoeléctrico. Describe con la teoría cuántica del Planck, que establece que la radiación electromagnética está compuesta por fotones que transportan energía.

La energía de un fotón se calcula con la ecuación $E_F = h.c/\lambda$, donde h es la constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J·s), C es la velocidad de la luz ($2,998 \times 10^8$

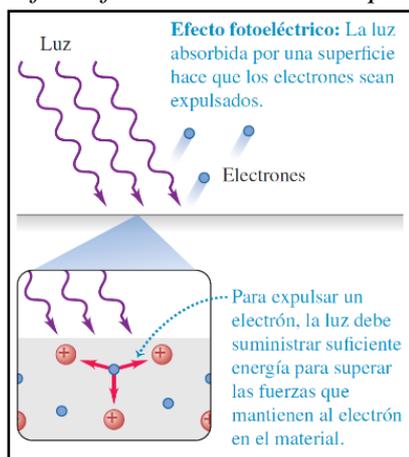
m/s), y λ es la longitud de onda en metros. La energía, medida en electronvoltios (eV), se convierte con E_F (eV) = $1,24/\lambda$, mostrando que la energía de un fotón varía inversamente con la longitud de onda.

Cuando un fotón golpea una superficie, es absorbido por un electrón, transfiriendo su energía de forma completa, a diferencia del proceso continuo descrito por la teoría clásica. El electrón recibe toda la energía del fotón o ninguna. Si esta energía excede la función trabajo (Φ), el electrón tiene la capacidad de escapar de la superficie. Una mayor intensidad de luz a una frecuencia específica significa que se absorben más fotones por segundo, lo que conduce a un aumento proporcional en la cantidad de electrones emitidos y, en consecuencia, a una mayor corriente eléctrica.

$$E_F = h\nu = \phi + K_m \quad (1)$$

Figura 3

Efecto fotoeléctrico en una placa



Nota: la figura detalla una placa con emisión de electrones (Fredman & Zemansky, 2021)

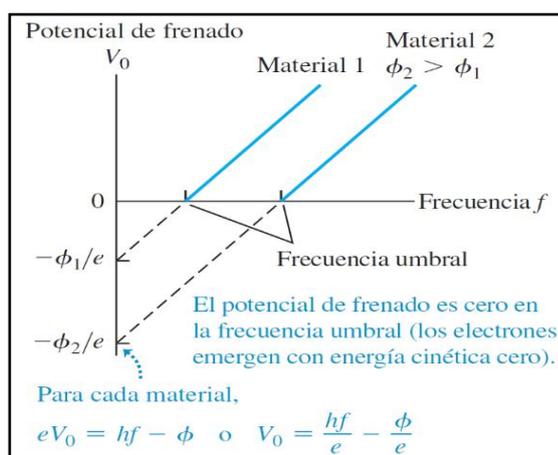
La función trabajo ϕ , es la energía mínima necesaria para liberar un electrón de la superficie. Aplicando el principio de conservación de energía, Einstein determinó que la energía cinética máxima de un electrón emitido es igual a la energía $K_{\text{máx}} = \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2 = hf - \phi$, además: $K_{\text{máx}} = eV_0$ se tendrá la siguiente ecuación:

$$K_{\text{máx}} = \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2 = eV_0 = hf - \phi \quad (2)$$

La ecuación, muestra que el potencial de frenado V_0 aumenta conforme aumenta con la frecuencia ν , siendo V_0 independiente de la intensidad. Esta independencia se confirma midiendo V_0 para diferentes frecuencias en un material de cátodo específico, obteniendo una gráfica lineal que verifica la ecuación. A partir de esta gráfica, se puede determinar la función trabajo ϕ y la relación h/e . Tras la medición de la carga $-e$ del electrón por Robert Millikan en 1909, es posible determinar la constante de Planck, h a partir de estas mediciones.

Figura 4

Potencial de frenado



Nota: la figura detalla el potencial de frenado y frecuencia umbral (Fredman & Zemansky, 2021)

Las energías y funciones de trabajo se expresan comúnmente en electrón-volts (eV). con cuatro cifras significativas: $1\text{eV}=1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ así mismo la constante de Planck: $6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}=4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

Tabla 1

Función trabajo en diferentes materiales

Elemento	Función trabajo (eV)
Níquel	5.1
Plata	4.3
Oro	5.1
Aluminio	4.3
Silicio	4.8
Cobre	4.7
Sodio	2.7
Carbono	5.0

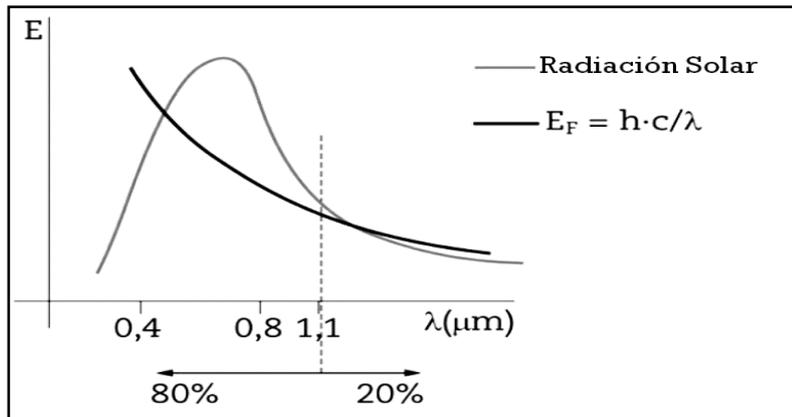
Nota: el material más utilizado por su abundancia es el silicio (Fredman & Zemansky, 2021)

La energía necesaria para que los electrones cambien de banda se llama energía de gap (EG), expresada en electronvoltios (eV), y varía según el material. En dispositivos monocristalinos ($EG = 1,1 \text{ eV}$), solo los fotones con longitud de onda menor a $1,1 \mu\text{m}$ pueden generar pares electrón-laguna y, por lo tanto, contribuir a la conversión solar fotovoltaica.

La relación entre la energía del band gap (EG) y la longitud de onda se describe mediante la fórmula $EG(\text{eV}) = 1.24/\lambda (\mu\text{m})$. Esta ecuación indica que solo los fotones que poseen una energía suficiente son capaces de participar en el proceso de conversión de energía solar en electricidad. En otras palabras, para que se produzca el efecto fotovoltaico, es imprescindible que se alcance una frecuencia mínima de los fotones, lo que a su vez implica la existencia de una longitud de onda máxima que no debe ser superada. Por lo tanto, este principio establece las condiciones necesarias para que la conversión fotovoltaica tenga lugar de manera efectiva, resaltando la importancia de la energía de los fotones en este proceso.

Figura 5

Longitud de onda mínima

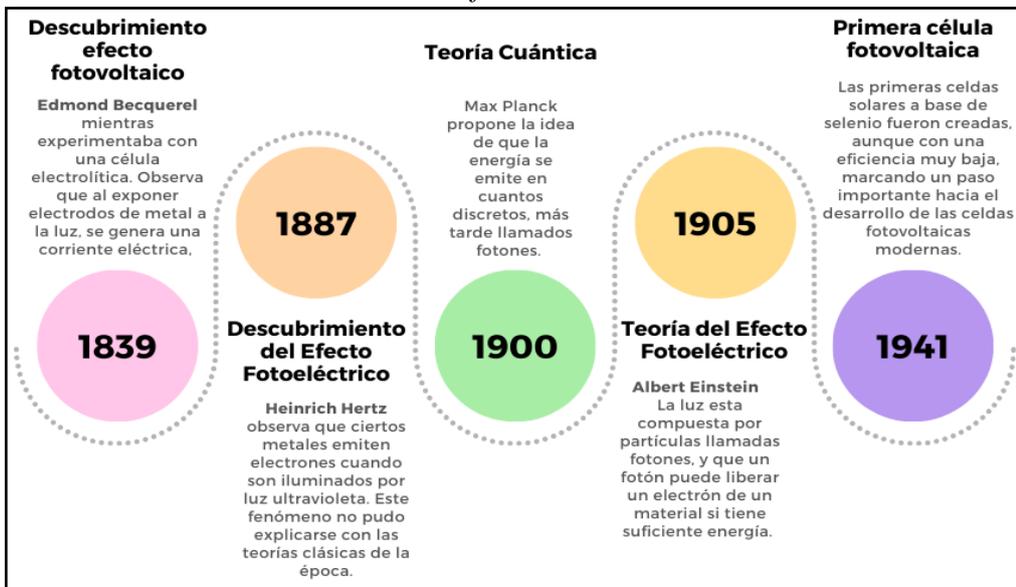


Nota: la figura detalla la frecuencia mínima para la existencia del efecto fotovoltaico

Para el silicio (usado en células solares), la función de trabajo es alrededor de 4.85 eV, lo que corresponde a una frecuencia mínima de aproximadamente 1.17×10^{15} Hz y una longitud de onda máxima de 1100 nm.

Figura 6

Línea histórica del desarrollo de la fotovoltaica



Nota: La figura muestra el proceso evolutivo en el tiempo sobre la fotovoltaica.



El efecto fotovoltaico fue descubierto por Edmond Becquerel en 1839, al observar la generación de corriente eléctrica al exponer electrodos metálicos a la luz. En 1887, Heinrich Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico, donde ciertos metales emitían electrones al ser iluminados, aunque no pudo explicarlo teóricamente. En 1900, Max Planck introdujo la teoría cuántica, que ayudó a Albert Einstein en 1905 a explicar el efecto fotoeléctrico, postulando que la luz está formada por fotones, lo que le valió el Premio Nobel en 1921. En 1941 se crearon las primeras celdas solares de selenio, y en 1954 Bell Labs desarrolló la primera célula fotovoltaica de silicio, con una eficiencia del 6%, marcando el inicio de la tecnología fotovoltaica moderna.

2.1.3. Dopaje

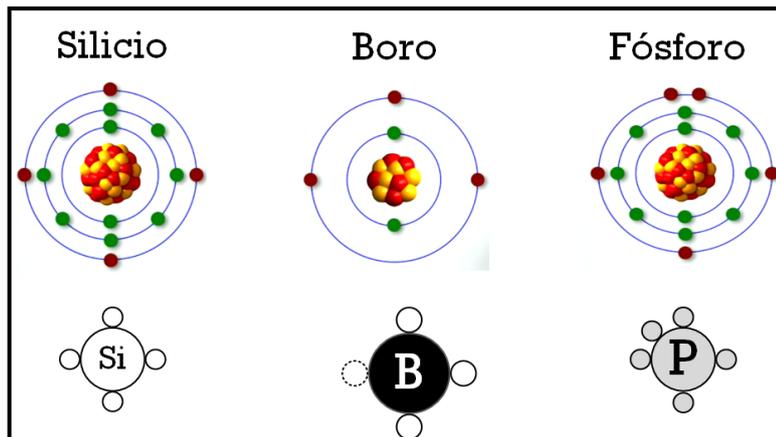
Aunque los fotones liberan cargas eléctricas en dispositivos fotovoltaicos, su aprovechamiento no es inmediato debido a la rápida recombinación de estas cargas. Para evitarlo y mejorar la eficiencia, se realizan tratamientos físico-químicos en el material, transformándolo en un dispositivo capaz de generar electricidad. Para que las cargas generadas por la luz puedan ser utilizadas, deben ser extraídas del semiconductor y dirigidas a un circuito eléctrico externo; de lo contrario, los electrones volverían a su estado original. Esta extracción se logra mediante una unión en el semiconductor que crea un campo eléctrico interno, separando las cargas negativas de las positivas, gracias al proceso de dopaje.

El dopaje electrónico, o simplemente dopaje, es el proceso de adición de impurezas químicas (usualmente boro o fósforo) en un elemento químico semiconductor puro (germanio o silicio, notablemente este último), con la finalidad de dotarlo de propiedades de semiconducción. La adición de boro, un

elemento trivalente, provoca la aparición de cargas positivas (o “lagunas”) mientras que la adición de fósforo, un elemento pentavalente, provoca la aparición de cargas negativas (electrones libres).

Figura 7

Átomos de silicio boro y fosforo

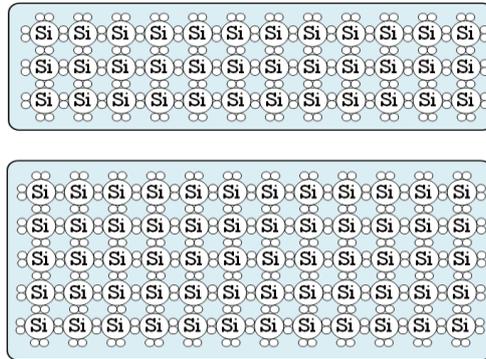


Nota: La figura muestra el silicio, material en abundancia proveniente de la arena de los grandes desierto, tiene 4 electrones de valencia, formando enlaces covalentes entre si, mientras que el boro posee 3 electrones de valencia en su ultima capa orbital, asi mismo el fosforo muestra un total de 5 electrones de valencia para formar enlaces. Fuente: (Zilles et al., 2021)

En la figura 7 se muestra, primero el semiconductor intrínseco, es decir, en su estado puro, es dopado para la formación de la región tipo P. Se añade material dopante del tipo receptor, lo que lleva a una deficiencia de electrones, conocida como “lagunas” o “huecos”, en la banda de valencia, caracterizando una región con una densidad de carga positiva. Posteriormente, para la formación de la región tipo N, se añade material dopante del tipo donador, lo que ocasiona la aparición de electrones libres. Entre las regiones tipo P y tipo N se forma la unión P-N, cuya función principal es crear un campo eléctrico interno que es responsable de la consolidación de la conversión fotovoltaica.

Figura 8

Láminas de silicio andes del dopaje



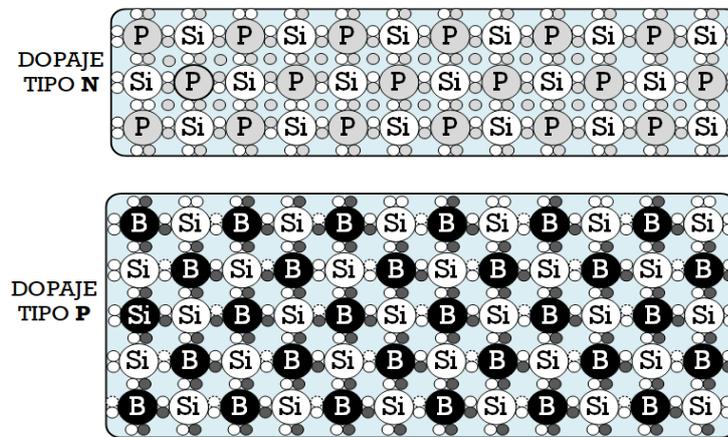
Nota: las dos placas mostradas son de silicio de alta pureza, sin embargo este posee solamente enlaces covalentes dado que el silicio tiene 4 electrones de valencia en su última capa, por lo cual surge la necesidad de realizar modificaciones en su estructura.

Con el dopaje, la región N queda con una alta concentración de electrones que tienden a migrar hacia la región P. Concomitantemente, en la región P, que tiene una alta concentración de lagunas, habrá un flujo de estas hacia la región N. Sin embargo, cuando el electrón se desplaza del lado N al lado P, deja atrás un ion donador positivo en el lado N, precisamente en la unión.

De manera similar, cuando una laguna deja el lado P para ir al lado N, deja atrás un ion aceptor negativo en el lado P. Si un gran número de electrones y lagunas atraviesan la unión, un gran número de cargas, iones positivos y negativos fijos, queda en los límites de la unión. Estos iones fijos, como resultado de la ley de Gauss, producen un campo eléctrico que se origina en los iones positivos y termina en los iones negativos. Por lo tanto, el número de iones positivos en el lado N de la unión debe ser igual al número de iones negativos en el lado P de la unión.

Figura 9

Longitud de onda mínima

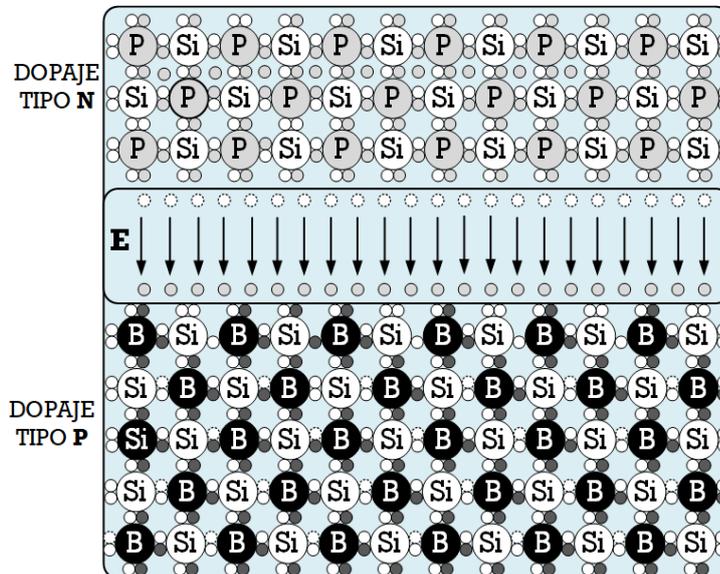


Nota: Las placas de silicio después del dopaje quedan definidas de tal manera que en una de ellas se presenta espacios vacíos disponibles mientras que la placa posterior muestra electrones libres capaces de movilizarse.

En la unión p-n, se crea un campo eléctrico como consecuencia de la difusión de electrones desde el lado n y de huecos desde el lado p. Este campo eléctrico actúa en sentido opuesto a la difusión original de las cargas, estableciendo una barrera de potencial en la zona de transición entre las capas p y n. Esta zona se denomina región de depleción, en referencia a la reducción de la movilidad de los portadores de carga (electrones y huecos) dentro de esa área. En esta situación, la corriente generada por el flujo de electrones y huecos queda compensada por la corriente inducida por el campo eléctrico, lo que conduce a un equilibrio entre ambas corrientes. De esta manera, el campo eléctrico impide que las cargas sigan difundándose libremente, estabilizando la región de depleción y manteniendo la estructura de la unión p-n.

Figura 10

Región de agotamiento



Nota: Las placas de silicio después del dopaje quedan definidas de tal manera que en una de ellas se presenta espacios vacíos disponibles mientras que la placa posterior muestra electrones libres capaces de movilizarse.

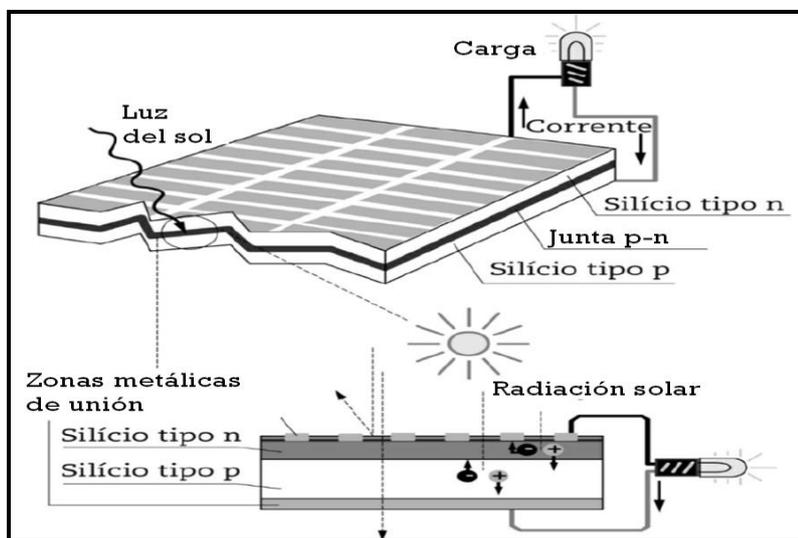
Cuando el semiconductor es iluminado, ese estado de equilibrio se rompe. Cuando un electrón de la banda de valencia es alcanzado por un fotón, absorbe la energía de este y, si esa energía es suficiente para liberarlo de su enlace químico, pasa a la banda de conducción, creando un par electrón-laguna. El campo eléctrico mencionado anteriormente atrae al electrón hacia la región n al mismo tiempo que la laguna es atraída hacia la región p. Con la incidencia de más fotones, se forman más pares electrón-laguna que son separados por el campo, lo que provoca un desequilibrio en las corrientes de la unión y el establecimiento de una diferencia de potencial debido a la acumulación de portadores de carga en cada lado de la unión (electrones en la región n y lagunas en la región p).

La fabricación de la primera célula solar de selenio con una eficiencia del 1% no ocurrió hasta 1941. Desde entonces, ha habido avances significativos,

especialmente impulsados por la carrera espacial, lo que ha convertido a la tecnología fotovoltaica en una opción madura y confiable. Se han logrado rendimientos superiores al 30% en células especiales de laboratorio y bajo radiación concentrada, mientras que la tecnología de silicio monocristalino se ha destacado como líder, alcanzando rendimientos de hasta el 17% en células comerciales sin concentración.

Figura 11

Efecto fotovoltaico en una célula solar



Fuente: (Zilles et al., 2021)

El dopante apropiado para el silicio es el Boro, que tiene un electrón de enlace menos que el silicio. Cada átomo de Boro puede unirse con solo tres átomos de silicio, creando así un hueco donde normalmente estaría el cuarto electrón de enlace. Esta estructura resultante se conoce como semiconductor tipo P.

Otro dopante posible para el silicio es el fósforo, que tiene un electrón de enlace adicional en comparación con el silicio. Al sustituir un átomo de fósforo por uno de silicio en la red cristalina, el electrón adicional queda libre, lo que convierte al semiconductor en tipo N.

2.1.4. Panel solar

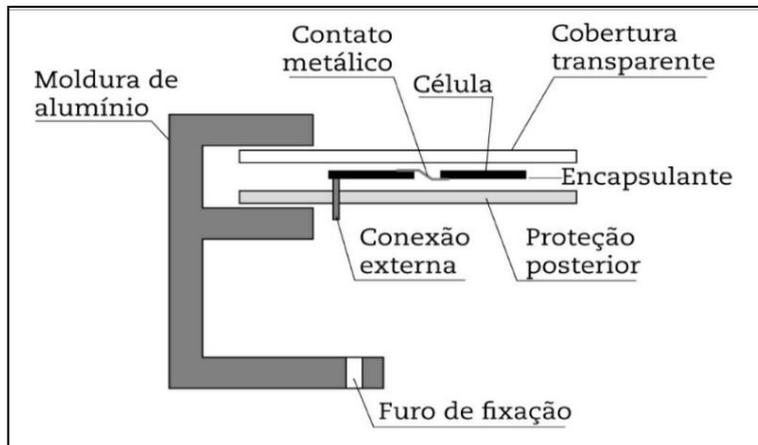
Generalmente, la tensión producida por una única célula fotovoltaica no resulta útil, ya que alcanza alrededor de 0.6 voltios en circuito abierto en células de silicio, mientras que la mayoría de los sistemas de corriente continua requieren al menos 5 voltios. Por esta razón, es necesario conectar varias células para lograr tensiones utilizables. Los paneles fotovoltaicos más comunes están compuestos por un número de células conectadas en serie, que típicamente varía entre 30 y 36. Además, estos paneles deben ser conectados en serie o en paralelo para proporcionar la tensión y la corriente nominales requeridas por la instalación, formando así el generador fotovoltaico. En la figura se ilustran las curvas características de una célula y de sus configuraciones en serie y paralelo.

Un módulo fotovoltaico o también llamado panel fotovoltaico es la unión de varias células fotovoltaicas conectadas en arreglos en serie y paralelo, así mismo se define principalmente por su potencia pico, que representa la cantidad de energía que puede generar en el punto de máxima eficiencia y bajo condiciones estándar de operación. Estas condiciones incluyen una irradiancia de 1000 W/m^2 , una temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y un espectro de 1.5 AM. Es importante mencionar que, generalmente, el rendimiento máximo de un panel fotovoltaico es ligeramente inferior al de las células individuales que lo componen, con una diferencia que suele variar entre uno y dos puntos porcentuales. Esta discrepancia se debe, en parte, a los espacios que quedan inevitablemente sin cubrir con material fotovoltaico, lo que reduce la superficie efectiva de captura de energía solar. Además, la variabilidad en los parámetros característicos de las células implica que la potencia máxima del conjunto no es simplemente la suma de las potencias máximas de cada célula. Por lo tanto, resulta crucial considerar el

rendimiento del sistema en su totalidad para obtener una evaluación precisa de su eficiencia general.

Figura 12

Composición interna de un panel solar



Fuente: (Zilles et al., 2021)

Las células fotovoltaicas son bastante delicadas y vulnerables a la humedad y al polvo. Por esta razón, es esencial protegerlas adecuadamente para su uso e instalación, utilizando una cubierta transparente, que generalmente es de vidrio templado con bajo contenido de hierro, y un material de encapsulado que evite la entrada de agua y polvo. Además, el panel fotovoltaico incluye un marco, que suele estar hecho de aluminio, lo que proporciona mayor protección y facilita su instalación en diferentes sistemas.

2.1.5. Tipos de células fotovoltaicas

De acuerdo a la literatura universal correspondiente a los módulos fotovoltaicos se considera, por su material en abundancia y por el costo de fabricación factible son las cuatro siguientes: Células de película delgada, Células de silicio cristalino, Células multiunión y Células orgánicas e híbridas.



2.1.5.1. Las células de silicio cristalino

Los paneles de silicio cristalino son los más producidos, dominando aproximadamente el 90% del mercado, mientras que el 10% restante está casi completamente reservado para la tecnología de película delgada. Se prevé que esta situación no cambie en los próximos años, por lo que esta tesis se enfoca en estas dos tecnologías, aunque es importante señalar que las investigaciones sobre las células de perovskita y grafeno están avanzando de manera positiva. Esta categoría se divide en dos grupos: las monocristalinas, que consisten en un solo cristal, y las policristalinas, que están formadas por varios cristales, todos de silicio. Históricamente, las células policristalinas eran más económicas, pero menos eficientes que las monocristalinas. En la actualidad, ambas tecnologías presentan costos y eficiencias similares, oscilando entre el 15% y el 18%, lo que resulta en una producción igual de ambos tipos..

2.1.5.2. Células de película delgada:

Las células de película delgada, también llamadas células de segunda generación, se caracterizan por un grosor mucho menor que el de las células de silicio cristalino y por la necesidad de contar con un sustrato donde depositar la película del material semiconductor utilizado. este sustrato puede elaborarse a partir de diferentes materiales como, por ejemplo, el cristal, el acero inoxidable o algunos tipos de plástico. Dependiendo del sustrato utilizado existe la posibilidad de fabricar células flexibles, al contrario que las células de silicio cristalino, que son siempre rígidas. además, con este tipo de tecnología se puede fabricar células de casi



cualquier tamaño. existen varios tipos de células de película delgada, los cuales pueden ser englobados en dos grupos: Células con homo unión y células con hetero-unión.

2.1.5.3. Células multiunión

Se basan en el apilamiento de dos o más células también llamadas sub-células de diferente Rango espectral en un mismo dispositivo fotovoltaico. de esta manera los fotones que sean transparentes para la primera sub-célula alcanzarán a la segunda y así sucesivamente. el objetivo que se pretende con estas células es mejorar la eficiencia de conversión eléctrica ampliando el rango de la respuesta espectral del conjunto a todo el espectro de la radiación solar.

2.1.5.4. Células orgánicas e híbridas:

Los más recientes tipos de células son de carácter eminentemente experimental, todavía tardarán algún tiempo en incorporarse al mercado, no obstante, cabe mencionar que las células de polímeros, que son un tipo de células orgánicas, es decir basadas en carbono. estas células presentan algunas ventajas como son la poca energía necesaria para su fabricación, la flexibilidad y ligereza de los materiales que la componen y la posibilidad de hacerlas parcial o totalmente transparentes; sin embargo, su limitada vida y su baja eficiencia de conversión eléctrica hacen que sea todavía necesario investigar en ellas para que puedan llegar a ser relevantes en el sector de la generación eléctrica convencional.

Tabla2

Clasificación de módulos fotovoltaicos comerciales

Tipo de material	Eficiencia eléctrica de conversión		
	Máximo Teórico	Células	Módulos
Silicio monocristalino (m-Si)	27.0%	25.6%	22.9%
Silicio Policristalino (p-Si)	27.0%	20.8%	18.5%
Arsenurio de Galio (GaAs)	29.0%	28.8%	24.1%
Teluro de Cadmio (CdTe)	28.5%	21.5%	14.4%
CIGS	26.0%	23.3%	17.8%
Silicio Microamorfo (a-Si)	35.0%	12.7%	11.9%
Mj de 3 celulas (con	61.0%	40.4%	32.0%
Mj de 4 celulas (con concentración	65.1%	46.0%	---

Fuente: (Lamigueiro, 2020)

Otro tipo de células alternativas son las denominadas híbridas, las cuales están basadas en heteroniones entre un material inorgánico y otro orgánico. entre ellas la más destacada son las llamadas células sensibilizadas por colorantes sus ventajas más significativas son teóricamente bajo costo de producción la posibilidad de fabricarlas de cualquier color y transparencia su flexibilidad e incluso la facultad de poder ser apiladas sobre múltiples superficies de forma análoga a una pintura convencional. Recientemente se han desarrollado células híbridas a partir de algunos minerales del grupo 4 pertenecientes a la familia de la perovskita caracterizados por su especial estructura cristalina estas células son muy baratas de fabricar e, incluso, teóricamente se podrían comercializar en forma de spray además, al contrario que las células sensibilizadas por colorantes las células de perovskita presentan una eficiencia de conversión eléctrica muy aceptable alrededor del 20%



desgraciadamente al igual que el resto de las células híbridas son muy inestables por lo que todavía es inviable su producción en serie.

2.1.6. Proceso de fabricación celulas de silicio cristalino

Generalmente, el material utilizado para fabricar las células, el semiconductor base, es silicio en forma monocristalina, policristalina o amorfa. La primera modalidad presenta una eficiencia mejor y su coste es más elevado, mientras que la tercera es más barata pero menos eficiente. además del silicio, pueden utilizarse otros materiales, Como por ejemplo galio Arsénico o cadmio-telurio. dado que cada uno de estos materiales tiene una banda de absorción distinta captan electrones de distinta longitud de onda se han intentado incrementar la eficiencia del dispositivo construyendo células formadas por capas de distintos materiales y ampliar el campo de captación de la radiación solar. Para fabricar las células de silicio, que son las habituales hoy en día, se utiliza como materia prima arena o cuarcita, y en su proceso de fabricación se recorren las etapas siguientes:

- Tratamiento en horno de arco, donde la materia prima se funde y se reduce; se utiliza carbón como reductor y se obtiene silicio con una pureza de 99% coma llamado silicio metalúrgico o de grado metalúrgico.
- Tratamiento con ácido clorhídrico coma para obtener clorosilanos, hasta alcanzar un nivel de pureza del orden de 99.99 %., adecuada para las aplicaciones fotovoltaicas.
- Reducción de los clorosilanos con hidrógeno y fusión para obtener silicio policristalino.
- Fusión y proceso de crecimiento de la barra del cristal de silicio.



- Obtención de las obleas de silicio, por corte de la barra y pulimentado de las mismas. el espesor de las células fotovoltaicas suele estar comprendido entre las 200 y 400 micras.
- Obtención de la unión P-N y fabricación de las células solar.
- Construcción del panel apto para ser comercializada.

La etapa de fusión del silicio de alta pureza y crecimiento del cristal es la más cara, del orden de \$50 el kilo., y es determinante para la eficiencia de la célula resultante.

2.1.7. Parametros elementales de las paneles solares

La respuesta eléctrica de un panel se basa casi en su totalidad en la irradiancia que incide, la distribución espectral de esta y la temperatura a la que están expuestas las células que lo integran. Para caracterizar la respuesta eléctrica, se suelen emplear los parámetros definidos a continuación:

- **I_{cc}**: (Corriente de cortocircuito), La corriente de corto circuito es la máxima corriente que un módulo fotovoltaico puede generar cuando sus terminales están conectados directamente, lo que significa que la tensión es cero. Esta corriente es fundamental para evaluar el rendimiento del módulo bajo condiciones de luz máxima. I_{sc} se mide en amperios (A) y se ve afectada por la irradiancia y la temperatura.
- **V_{oc}**: (Voltaje a circuito abierto), La tensión en circuito abierto es la máxima tensión que un módulo fotovoltaico puede alcanzar cuando no hay carga conectada, es decir, los terminales están abiertos. V_{oc} se mide en voltios (V) y representa el potencial máximo del módulo. Esta tensión

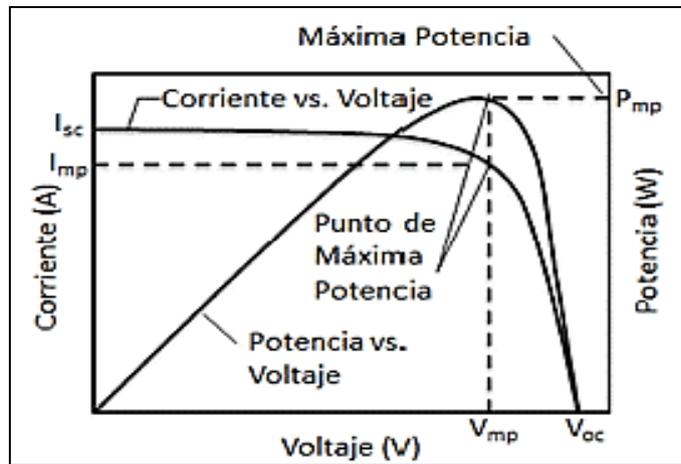


también varía con la temperatura y la irradiancia, y es un parámetro clave para el diseño de sistemas fotovoltaicos.

- **I_m** : (Corriente máxima), La corriente máxima es la corriente que el módulo fotovoltaico produce en el punto de máxima potencia (MPP). Se mide en amperios (A) y es un indicador de la capacidad de producción del módulo bajo condiciones óptimas. I_m es importante para dimensionar inversores y otros componentes del sistema.
- **P_m** : (Potencia máxima), La potencia máxima es el producto de la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia (MPP) del módulo fotovoltaico. Este punto se encuentra en un estado óptimo de operación, donde se obtiene la mayor energía posible del módulo. P_{max} se expresa en vatios (W) y es crucial para determinar el rendimiento general del sistema.
- **η_{FV}** : (Eficiencia de conversión eléctrica del panel La eficiencia de un módulo fotovoltaico es la relación entre la potencia máxima que puede generar y la potencia de la irradiancia solar que incide sobre su superficie. Se expresa como un porcentaje (%) y proporciona una medida de qué tan efectivamente un módulo convierte la energía solar en energía eléctrica. La eficiencia es un factor determinante en la selección de módulos para instalaciones solares.
- **FF** : (Factor de forma), Es el concepto teórico útil para medir la forma de la curva definida por las variables I-V.

Figura 13

Curva I-V, P-V



Fuente: (Costejon & Santamaria, 2010)

La gráfica 13 muestra la curva, obtenida experimentalmente, de un panel fotovoltaico típico de silicio cristalino bajo condiciones constantes de radiación y temperatura. Al variar la resistencia externa desde un valor cero hasta el infinito, se pueden registrar diferentes pares de valores (I,V), conocidos como puntos de irradiancia. Estos puntos se combinan para formar las curvas características del panel, o curva de corriente-tensión (en abreviatura, curva I-V), que presenta un aspecto bastante parecido entre distintos paneles..

2.1.8. Influencia de la Temperatura y la Radiación

La ecuación matemática que relaciona la intensidad i con el voltaje V de un módulo o panel fotovoltaico puede expresarse, de manera aproximada, como:

$$i = i_{sc}[1 - e^{B(V-V_{oc}+Ai)}] \quad (3)$$

O bien, despejando V en función de i :

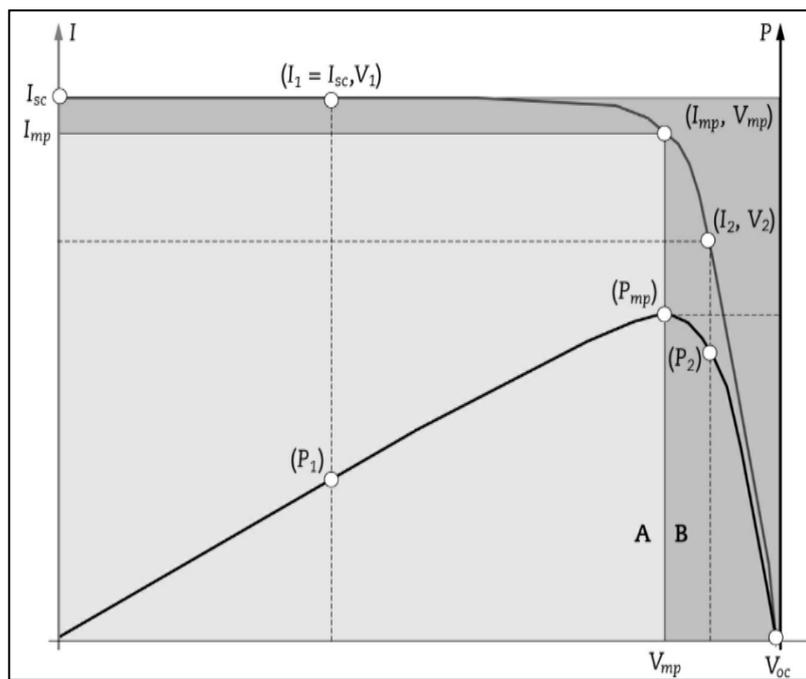
$$V = V_{oc} - Ai + (1/B)\ln(1 - i/i_{sc}) \quad (4)$$

Dónde los parámetros A y B dependen de las características del módulo y de las condiciones a las que está sometido.

Una manera de determinar el valor de estas constantes en cada caso específico es realizar mediciones experimentales utilizando un voltímetro y un amperímetro para obtener los valores de V e i que el módulo proporciona bajo las mismas condiciones de intensidad solar y temperatura, modificando la resistencia de las cargas del circuito externo. Las mediciones deben efectuarse en puntos donde el valor de V no sea significativamente menor que el nominal o habitual de operación del módulo, y siempre en puntos distantes de la situación de cortocircuito, ya que en esa área las ecuaciones anteriores no son aplicables.

Figura 14

Parámetros eléctricos del panel solar



Fuente: (Lamigueiro, 2020)

Se necesita al menos cuatro pares de puntos (V,i), con el fin de poder plantear un sistema de cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas: (V_{oc} , I_{sc} , A y B). Una vez calculadas y sustituidas en las ecuaciones anteriormente escritas, se habrá

obtenido una relación entre V e I válidamente única para el valor de intensidad bajo la cual se haya efectuado las medidas dicha relación debido al carácter aproximado que tiene, no es válida para cálculos que requieran precisión.

Las curvas I-V y P-V, son de mucha importancia ya que identifican de primera mano el comportamiento eléctrico de un panel fotovoltaico o un arreglo de varios paneles.

2.1.9. Potencia del generador fotovoltaico

La potencia que suministra un panel fotovoltaico bajo cualquier condición de trabajo puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$P = P_{STC} I / I_{STC} K_S k_G \quad (5)$$

En este contexto, I_{STC} y P_{STC} se refieren, respectivamente, a la irradiancia incidente y a la potencia bajo condiciones estándar de medición, mientras que I representa la irradiancia real. Por otro lado, K_S es el factor de pérdidas espectrales y k_G es el factor de pérdidas relacionadas con la temperatura. En general, para la mayoría de los paneles convencionales, las pérdidas espectrales son tan pequeñas que se puede considerar K_S igual a uno sin afectar la exactitud. Sin embargo, las pérdidas causadas por la diferencia entre la temperatura real y las condiciones estándar de medición son significativas y deben ser evaluadas. Una fórmula que describe adecuadamente estas pérdidas térmicas es:

$$k_G = 1 + \gamma_C (T_C - 25^\circ\text{C}) \quad (6)$$

Dónde γ_C se le conoce como coeficiente por pérdidas por temperatura, mide la reducción en la potencia generada debido al aumento de temperatura sobre un valor de referencia, generalmente 25°C . Se expresa en porcentaje por grado

Celsius ($^{\circ}\text{C}$), T_c es la temperatura de las células. de este modo, la ecuación de la potencia del panel queda como:

$$P = P_{STC} I / I_{STC} [1 + \gamma_c (T_c - 25^{\circ}\text{C})] \quad (7)$$

Es igualmente valioso para el instalador y proyectista de energía fotovoltaica entender cómo varían la corriente y el voltaje en respuesta a cambios en la irradiancia y la temperatura. Para ello, se pueden emplear las siguientes fórmulas:

$$V_{OC} = V_{OC,STC} [1 + \beta_c (T_c - 25^{\circ}\text{C})] \quad (8)$$

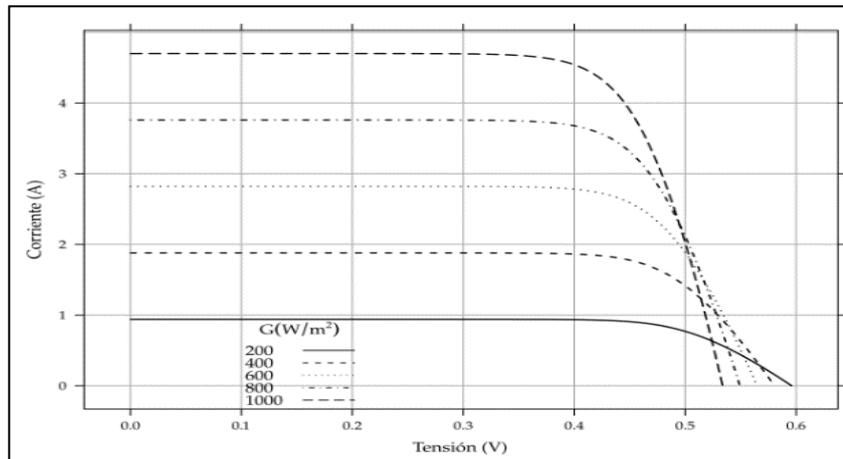
$$i_{SC} = i_{SC,STC} I / I_{STC} [1 + \alpha_c (T_c - 25^{\circ}\text{C})] \approx i_{SC,STC} I / I_{STC} \quad (9)$$

Donde β_c y α_c corresponden, respectivamente, a los coeficientes de variación del voltaje en circuito abierto y de la corriente en cortocircuito respecto a la temperatura. El coeficiente β_c suele ser alrededor de diez veces mayor que el valor absoluto de α_c , por lo que este último generalmente no se considera. Teniendo en cuenta lo anterior y que α_c es siempre negativo, se puede deducir que:

- En la figura 15 se puede verificar que El área de la curva I-V y con ella la potencia aumenta hacia la derecha, si la temperatura decrece, mientras que se reduce hacia la izquierda, si la temperatura se acrecienta, la tensión tiene una variabilidad en función de la temperatura, se puede apreciar que a mayor temperatura la tensión tiende a disminuir, y de manera viceversa
- En la figura 16 el área de la curva I-V con ella la potencia se agranda o se achica, en el sentido del eje vertical, si la irradiancia aumenta o disminuye respectivamente.

Figura 15

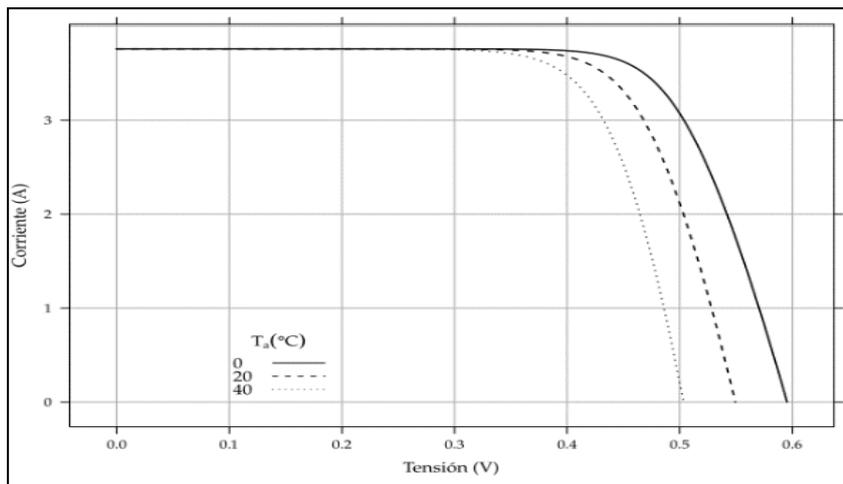
Efecto de la irradiancia en la curva I-V



Fuente: (Castejon & Santamaria, 2015)

Figura 16

Efecto de la temperatura en la curva I-V



Fuente: (Castejon & Santamaria, 2015)

La corriente eléctrica es casi proporcional a la intensidad de la radiación incidente, lo cual es lógico, ya que si, por ejemplo, se duplica el número de fotones que inciden en las células, se duplicará, hasta cierto punto, el número de interacciones con los electrones. El voltaje también se incrementa con la irradiancia, pero sigue una curva exponencial que es muy distinta a la de la



corriente. Además, a partir de un nivel de irradiancia relativamente bajo, por debajo de 300 W/m^2 , ya no afecta al voltaje, por lo que su influencia generalmente no se considera.

Si no se cuenta con los coeficientes ni con las curvas de variación de las características del panel en función de la temperatura (las cuales deben ser proporcionadas por el fabricante o proveedor), es útil disponer de algunas variaciones medidas, como las siguientes:

- Para paneles fotovoltaicos con células de silicio cristalino, el la tensión disminuye a razón de 2.3×10^{-3} voltios por cada célula del módulo y por cada grado centígrado de incremento en la temperatura de la célula por encima de los $25 \text{ }^\circ\text{C}$. La intensidad aumenta a una tasa de 15×10^{-6} amperios por cada centímetro cuadrado de área de células y por cada grado centígrado de aumento de la temperatura por encima de los $25 \text{ }^\circ\text{C}$..
- Con respecto a los módulos fotovoltaicos con tecnologías de películas delgadas las variaciones son, respectivamente, de menos 2.8×10^{-3} voltios por célula y 1.3×10^{-5} $1,3 \text{ A/cm}^2$ por cada grado centígrado de aumento.

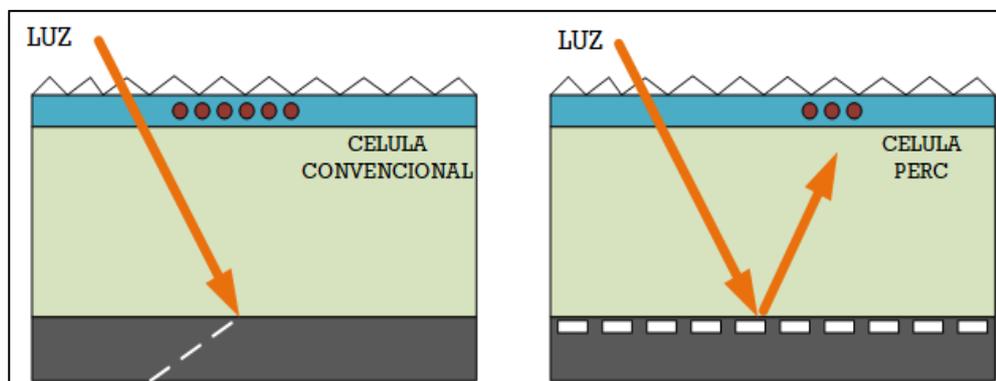
Con fines prácticos se considera que la potencia de los módulos fotovoltaicos tiende a disminuir de manera aproximada en un 0.5% por cada grado centígrado que excede a la temperatura estándar que usualmente se considera 25°C , precisamente por ese comportamiento se considera que los módulos fotovoltaicos requieren ventilación a fin de garantizar su funcionamiento adecuado.

2.1.10. Tecnología PERC

La tecnología PERC (Passivated Emitter Rear Cell) incorpora una capa dieléctrica reflectante en la parte posterior de las células solares para maximizar el uso de la radiación solar. En esencia, este proceso se agrega una capa adicional en la parte posterior del módulo, con el objetivo de que los electrones sobrantes tengan una nueva oportunidad y se reflejen para producir efecto fotoeléctrico.

Figura 17

Tecnología PERC



Nota: La tecnología PERC agrega una capa reflectante en la parte posterior del panel

En los paneles solares que emplean esta tecnología, las células cuentan con una capa en la parte posterior que aumenta la captación de la luz solar. Además, una lámina reflectante permite que los fotones no absorbidos inicialmente reboten dentro de la célula, logrando que se reaproveche esa energía, algo que no ocurre en los paneles fotovoltaicos convencionales.

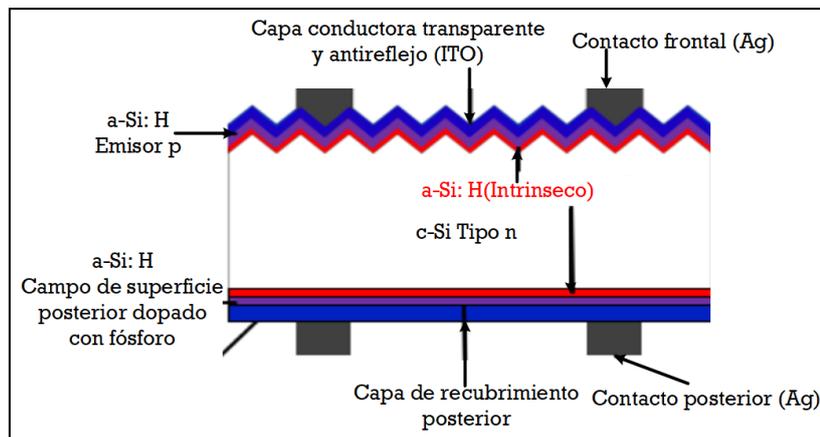
Gracias a esta mejora, se incrementa la eficiencia de las células solares respecto a paneles tradicionales con una configuración similar, lo que también contribuye a reducir los costos generales de los paneles.

2.1.11. Tecnología HIT(HJT)

La estructura de las células HJT, también conocida como HIT (Heterounión con Capa Fina Intrínseca), se distingue por su diseño simétrico y de doble cara. En el núcleo de la célula se encuentra una oblea de silicio cristalino de tipo N. En su lado frontal, se depositan sucesivamente una delgada capa de silicio amorfo intrínseco y una capa de silicio amorfo tipo P, que en conjunto forman una unión P-N.

Figura 18

Tecnología HIT/HJT



Nota: La tecnología PERC agrega una capa reflectante en la parte posterior del panel

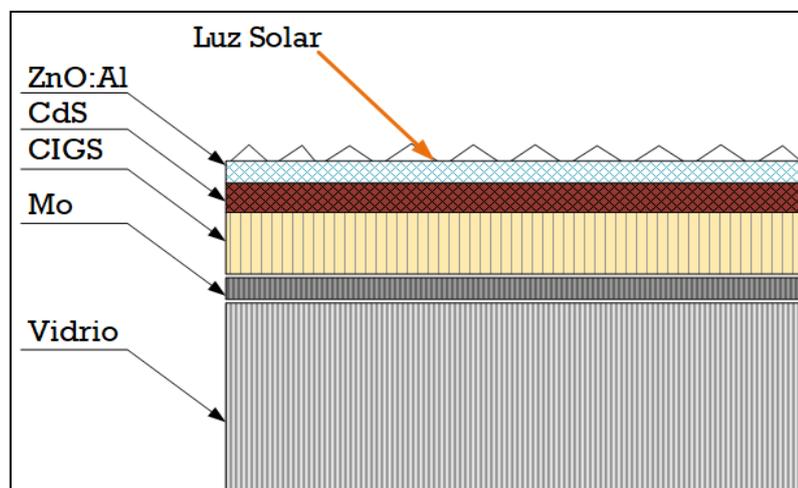
En la parte posterior de la oblea, se añade una capa de silicio amorfo intrínseco y otra de silicio amorfo tipo N, creando un campo posterior que mejora la recolección de energía. Debido a la baja conductividad del silicio amorfo, se aplican óxidos conductores transparentes (TCO) en ambas caras de la célula para optimizar la conducción eléctrica. Finalmente, los electrodos en ambas superficies se fabrican mediante tecnología de impresión en pantalla, completando el diseño eficiente y avanzado de la célula.

2.1.12. Tecnología CIGS

Células solares de película delgada basadas en calcopirita, como el seleniuro de indio y cobre, o seleniuro y sulfuro de indio y cobre, abreviadas como CIGS. la combinación de estos elementos produce una mejor absorción de la luz de manera más eficiente que el silicio policristalino o monocristalino, lo que permite que se apliquen en capas delgadas sobre un sustrato, generalmente vidrio.

Figura 19

Tecnología CIGS



Nota: La tecnología CIGS utiliza cobre, indio galio y selenio, para optimizar su captación.

La radiación solar genera portadores de carga dentro de la célula solar, los cuales se desplazan hacia los electrodos, creando una corriente y voltaje fotovoltaicos. Los portadores de carga tienen una vida útil limitada dentro del semiconductor. A medida que las capas son más delgadas, los portadores de carga llegan más fácilmente a los electrodos, lo que aumenta la eficiencia de la célula solar, las células con tecnología de películas delgadas actualmente tienen bastante aceptación debido a que su proceso de fabricación tiende a reducir costos.

2.1.13. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos

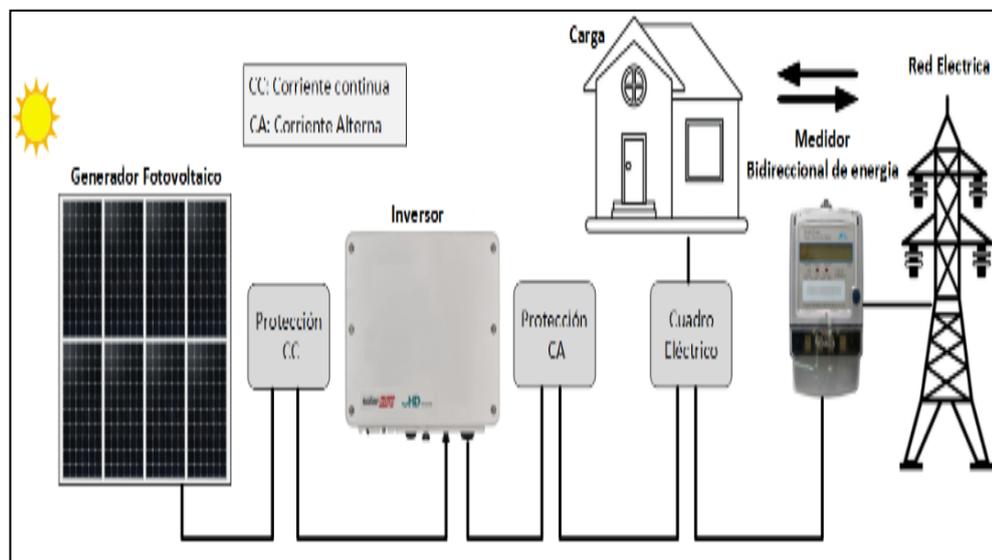
Los principales criterios utilizados para clasificar sistemas fotovoltaicos son, actualmente, la presencia o no, de una conexión a la red eléctrica. por tanto, se puede determinar dos grandes grupos: Los aislados y los Conectados a la red eléctrica.

2.1.14. Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR)

Los SFCR están diseñados para conectarse directamente a la red eléctrica, permitiendo interactuar con ella. Esto significa que es posible inyectar energía de manera directa a la red, siempre y cuando se asegure el suministro a los usuarios. En otras palabras, solo se inyectan los excedentes. (Lamigueiro, 2020).

Figura 20

Esquema general de un SFCR



Nota: Sistema fotovoltaico con inyección a red topología en su forma más básica.

La figura 19 muestra un esquema sobre los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica en su forma más básica, normalmente estará constituido por un generador fotovoltaico, un inversor con la capacidad de



conectarse a la red de manera directa, adicionalmente este sistema está compuesto por el usuario, finalmente para tener un registro de la energía eléctrica generada e inyectada a la red así como la energía consumida desde la red es necesario la instalación de un medidor de energía eléctrica bidireccional.

(Macêdo, 2006), muestra una explicación referente a cada uno de los componentes de un sistema fotovoltaico con conexión a red.:

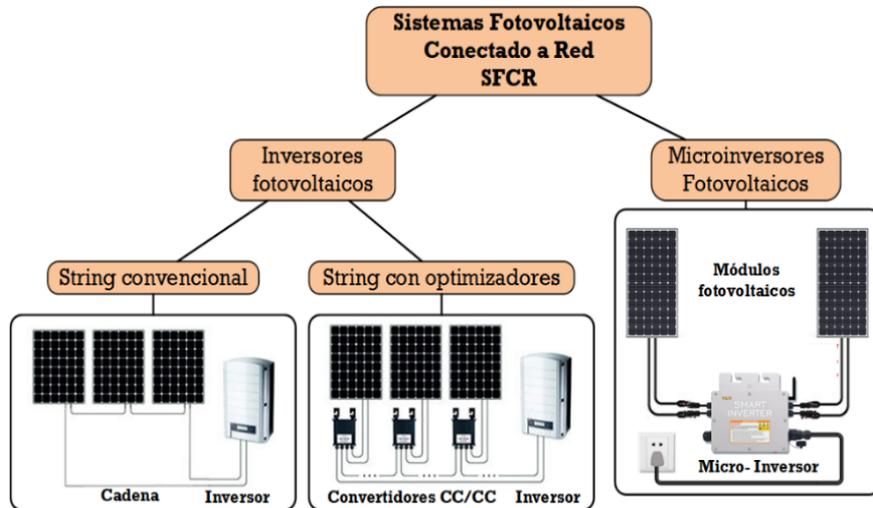
- **Inversor fotovoltaico:** Transforma la electricidad en corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), apta para su uso en sistemas eléctricos convencionales y para ser inyectada a la red eléctrica.
- **Generador fotovoltaico:** Consiste en la agrupación de paneles solares, **conectados** en serie, paralelo o ambas; transforma la irradiancia solar en corriente eléctrica de naturaleza continua (CC).
- **Red eléctrica:** Principalmente se compone por: Generación, transmisión y distribución, una red eléctrica contempla varios generadores y ellos se encuentran interconectados entre si, en el Perú se tiene por ejemplo el SEIN (sistema eléctrico interconectado nacional).
- **Carga eléctrica:** Se compone por el conjunto de consumidores, que puede ser residenciales, comerciales o industriales. quienes utilizan la red eléctrica para realizar distintas actividades.

2.1.15. SFCCR topologías mayormente utilizadas

Para instalaciones inferiores 10KW; mayormente se utilizan las siguientes: desde el aspecto técnico y económico se muestra en la figura 21:

Figura 21

Tipos de inversores FV



Nota: Topologías más comunes para instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

El sistema con String convencional consiste en la instalación de varios paneles fotovoltaicos, los cuales tienen dependencia entre sí. Lo cual no ocurre en un sistema con optimizadores, en caso de micro inversores se trata de pequeñas unidades individuales de generación fotovoltaica.

2.1.16. Factor de dimensionamiento del inversor (FDI)

Permite definir el tamaño del inversor en relación con la capacidad del generador fotovoltaico es el Factor de Dimensionamiento del Inversor (FDI). Este factor oscila entre 0 y 1, donde un valor de 1 indica que el inversor tiene una capacidad equivalente a la total del generador. También puede expresarse en porcentaje, de 0 % a 100 % (Zilles et al., 2021).s se calcula a través de la ecuación 10 (Villalva, 2015).

$$FDI = \frac{P_{INV}}{P_{PANELES\ FV}} \quad (10)$$

Donde:



- FDI: Factor de dimensionamiento para el inversor fotovoltaico.
- P_{INV} : Potencia nominal del inversor FV.
- $P_{Paneles\ FV}$: Potencia nominal total del generador fotovoltaico.

La energía eléctrica produce un SFCR se puede determinar mediante la ecuación:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} P(t) dt \quad (11)$$

La ecuación 11 permite determinar la energía eléctrica (kWh) total producida, la potencia $P(t)$ (KW) en un determinado tiempo, entre T_1 y T_2 según el período de interés.

Se realiza una gráfica con todas las potencias instantáneas acumuladas se obtiene una curva tipo campana, el área bajo dicha curva (potencia eje vertical y tiempo eje horizontal) representa la integral de la ecuación 11 (Commission & International Electrotechnical Commission. Technical Committee 82, 2016)

2.1.17. Rendimiento del módulo e inversor FV

Normalmente el rendimiento de un módulo comercial oscila entre 15% hasta un 25%, por otro lado, el rendimiento de los inversores fotovoltaicos a partir de un 95% hasta 99% de eficiencia.

2.1.17.1. Rendimiento del módulo η_m

Para determinar el rendimiento del módulo fotovoltaico, se utiliza la siguiente expresión matemática: (Ramon et al., 2015)



$$\eta_m(\%) = \frac{\text{Energía generada por el módulo (kWh)}}{\text{Radiación incidente } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right) \times \text{Área del módulo (m}^2)} \times 100\% \quad (12)$$

Considerar la definición de rendimiento como la capacidad de un panel solar para convertir la energía solar en energía eléctrica, teniendo en cuenta las condiciones reales de operación, que dependen de la ubicación geográfica de la instalación. En cambio, la eficiencia se refiere a esa misma capacidad, pero medida bajo las condiciones estándar de prueba establecidas por el fabricante (Lamigueiro, 2020).

2.1.17.2. Rendimiento del inversor

Según (Aouadi et al., 2017), indica el procedimiento para encontrar el rendimiento de un inversor fotovoltaico, según la fórmula líneas abajo, básicamente consiste en la relación entre la energía a la entrada y a la salida del inversor.

$$\text{Rendimiento}(\%) = \frac{\text{Energía de Salida del Inversor (kWh)}}{\text{Energía del Generador Fotovoltaico (kWh)}} \times 100\% \quad (13)$$

2.1.18. Comportamiento energético de una SFCR

En los sistemas fotovoltaicos conectados a la red, se utilizan varios indicadores para medir su eficiencia y producción de energía. Tres métricas clave son el Yield Referencial (Yr), el Yield Final (Yf) y el Rendimiento Global (PR). Estos conceptos permiten evaluar el desempeño del sistema en términos de generación de energía y eficiencia.



2.1.18.1.Productividad Final (RF)

También conocido como Yf (Yield final), es una medida de cuánta energía útil ha producido el sistema fotovoltaico por cada kW de potencia instalada en los paneles solares, teniendo en cuenta las pérdidas por factores como eficiencia de los inversores, resistencias eléctricas y degradación del equipo. Muestra cuánta energía neta ha sido entregada a la red o al usuario final, El Yield Referencial se mide en horas y refleja cuántas "horas solares pico" el sistema ha recibido. Se determina por la siguiente expresión matemática fórmula 14:

$$RF = \frac{\text{Energía eléctrica generada por el SFCR (kWh)}}{\text{Potencia instalada (kWp)}} \quad (14)$$

2.1.18.2.Rendimiento Referencial (RR)

Se conoce también como Yr (Yield referencial), es una medida teórica que representa cuánta energía podría generar el sistema en condiciones ideales. Se calcula como la irradiancia solar total incidente sobre los paneles solares dividida entre la irradiancia estándar (1 kW/m²). Este indicador no tiene en cuenta las pérdidas del sistema y permite comparar la cantidad de energía solar recibida en un día o en un periodo determinado (Zilles et al., 2021). El Yield Referencial se mide en horas y refleja cuántas "horas solares pico" el sistema ha recibido. Se determina por la siguiente expresión matemática formula 15:

$$RR = \frac{\text{Irradiación (kWh/m2)}}{\text{Irradiancia STC (1kW/m2)}} \quad (15)$$



2.1.18.3. Rendimiento Global (RG)

También conocido como **PR** por sus siglas en inglés (Performance Ratio) es un valor adimensional, generalmente expresado como un porcentaje, que indica cuán bien está funcionando el sistema en relación con su potencial teórico. Un PR del 100% sería un sistema perfecto sin pérdidas, lo cual es imposible en la práctica. Valores típicos de PR para sistemas bien diseñados varían entre el 75% y el 85% (Zilles et al., 2021) se determina por la siguiente ecuación matemática formula 16:

$$RG = \frac{RF}{RR} \quad (16)$$

CAPÍTULO III

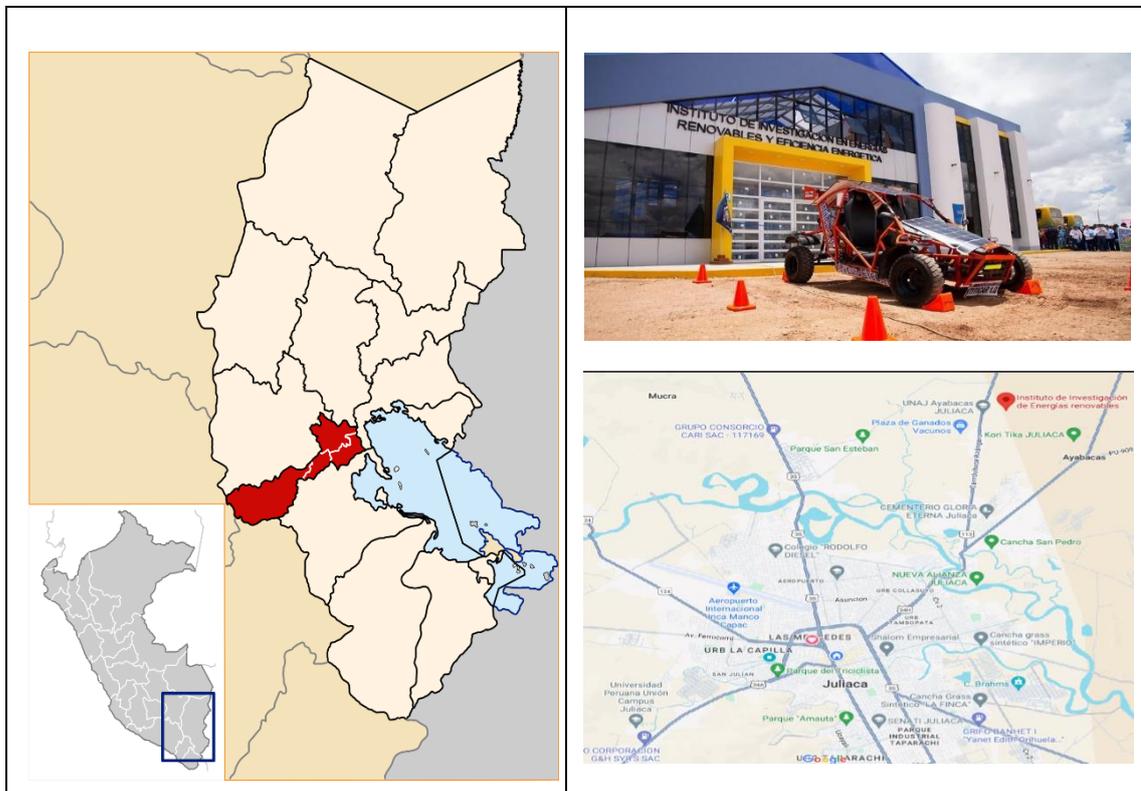
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE ESTUDIO

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en el centro poblado de Santa María de Ayabacas, ubicado en el distrito de San Miguel, provincia de San Román, en el departamento de Puno, a una altitud aproximada de 3822 m.s.n.m. Las coordenadas específicas del lugar son -15.40936 de latitud y -70.0960 de longitud, dentro del Instituto de Energías Renovables y Eficiencia Energética, perteneciente a la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables (EPIER) de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ). El estudio se desarrolló bajo las condiciones típicas de irradiancia y temperatura de la región.

Figura 22

Área de estudio



Fuente: Google maps

3.1.1. Características de los sistemas fotovoltaicos en estudio

El sistema fotovoltaico conectado a red de 4.9 kW se compone de 3 subsistemas fotovoltaicos de tecnologías (PERC, HJT y CIGS), los cuales están instalados en dos estructuras inclinados a 15.6° y orientación al norte, geográficos, a continuación, se describe de forma detallada las características principales:

3.1.1.1. Generador Fotovoltaico PERC

Los módulos que se utilizan en este sistema fotovoltaico es de la marca CANADIAN SOLAR HIDM CS1H-335MS 335 Wp que está instalado en el Instituto de energías renovables y eficiencia energética de la UNAJ, sede Ayabacas, consta de 5 módulos fotovoltaicos cada una de 335 Wp, conectados en serie.

Tabla 3

Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico PERC

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia Máxima	P_{MAX}	335Wp
Tensión a Circuito Abierto	V_{OC}	44.30VD
Tensión de máxima potencia	V_{MP}	37.40VD
Corriente de corto circuito	I_{CC}	9.72A
Corriente de máxima potencia	I_{MP}	8.96A

Nota: Fuente: Datasheed CANADIAN SOLAR CS1H 335MS

3.1.1.2. Generador Fotovoltaico HIT

Los módulos que se utilizan en este sistema fotovoltaico son de la marca PANASONIC VBHN330SJ53, lo conforman un total de 5 módulos fotovoltaicos, cada uno de ellos tiene una potencia nominal de 330Wp, y están conectados en serie.

Tabla 4*Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico HIT/HJT*

Parámetro	Sím	Valor
Potencia Máxima	P_{MAX}	330Wp
Tensión a Circuito Abierto	V_{OC}	69.7 VDC
Tensión de máxima potencia	V_{MP}	58.0 VDC
Corriente de corto circuito	I_{CC}	6.07 A
Corriente de máxima potencia	I_{MP}	5.7 A

Fuente: Datasheed PANASONIC VBHN330SJ53

3.1.1.3. Generador Fotovoltaico CIGS

Los módulos que se utilizan en este sistema fotovoltaico son de la marca ROHS COMPLIANT Modelo CdF-115, lo conforman un total de 14 módulos fotovoltaicos de potencia nominal de 115 Wp, los cuales están conectados en serie.

Tabla 5*Características eléctricas del módulo fotovoltaico CIGS*

Parámetro	Sím	Valor
Potencia Máxima	P_{MAX}	115W
Tensión a Circuito Abierto	V_{OC}	77.2 VDC
Tensión de máxima potencia	V_{MP}	59.3 VDC
Corriente de corto circuito	I_{CC}	2.07 A
Corriente de máxima potencia	I_{MP}	1.94 A
Tensión de trabajo		1000VDC
Condiciones estándar de prueba: 25°C-AM 1.5 G=1000W/m ²		

Fuente: Datasheed ROHS COMPLIANT Modelo CdF-1150A1

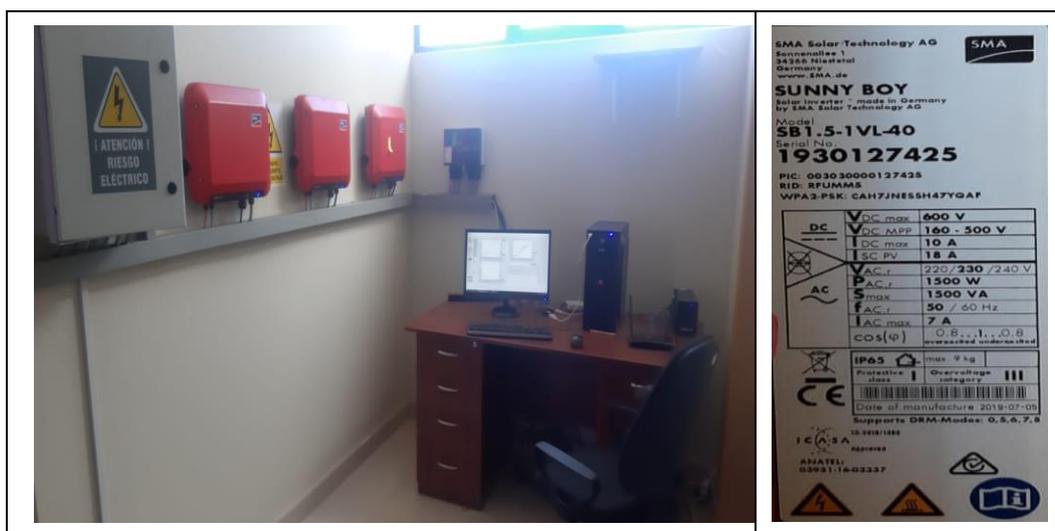
Un factor crucial a tener en cuenta es la validez de los parámetros proporcionados por el fabricante, la cual se garantiza a través de las certificaciones del dispositivo. En este caso, se indica que cumple con las normativas IEC 61215, IEC 61730, MCS e INMETRO. Además, el fabricante asegura que el equipo es resistente a las pérdidas por PID (degradación por potencial inducido). Estas pérdidas ocurren en la superficie de contacto entre el módulo y la estructura de soporte, siendo más notorias con el paso del tiempo, generalmente en años, considerando que estos dispositivos tienen una garantía de 10 a 15 años.

3.1.2. Inversor Fotovoltaico

Se tienen 3 inversores, uno para cada SFCR, estos dispositivos son de la marca SMA SUNNY BOY modelo SB 1.5-VL-40, donde c/u tiene una potencia máxima de 1600 W en CC.

Figura 23

Inversores fotovoltaicos instalados en instituto EPIER



Nota: Ambiente de instalación y ficha técnica del inversor utilizado

El trabajo de estos equipos básicamente es convertir la corriente continua CC que proporcionan por los módulos FV en corriente alterna CA, directamente para el autoconsumo de la vivienda e inyectar a red eléctrica los excedentes, tiene un sistema de comunicación por cable y antena wifi, ello con fines de configuración del equipo y para adquisición de señales eléctricas.

Figura 24

Inversor SB 1.5-VL-40



El inversor SMA posee un sistema de comunicación por cable y wifi.

El inversor Sunny Boy de SMA de 1.6 kW convierte la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA) para la red eléctrica. Utiliza tecnología de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) para optimizar la energía extraída de los paneles, ajustando el punto de operación según la irradiancia y la temperatura. Luego, sincroniza la CA con la red local, asegurando compatibilidad en voltaje y frecuencia. Equipado con protección contra sobrecargas y cortocircuitos, el inversor garantiza una operación segura. Ofrece monitoreo en tiempo real, permitiendo la supervisión del rendimiento y la detección de problemas. Su instalación se realiza en un lugar adecuado, con configuración inicial y mantenimiento regular para asegurar eficiencia. Destaca por su alta eficiencia de conversión y diseño compacto, adecuado para diversas condiciones climáticas.

Tabla 6

Características del inversor SUNNY BOY modelo SB 1.5-VL-40

Entrada CC (Salida del generador fotovoltaico)		
Parámetro	Símb	Valor
Corriente de entrada máxima	I_{Max}^{1-}	10 A
Rango de tensión de entrada maxima potencia	V_{mp}	160-500 VDC
Potencia de entrada máxima	P_{Max}	3000 Wp
Tensión DC máxima de entrada	V_{OC}	600 VDC
Salida CA (Red Eléctrica)		
Rango de tensión de salida	V_{CA}	220/230/240 VAC
Potencia electrica nominal	P_{inv}^0	1500 VA
Potencia electrica maxima de salida	P_{inv}^{max}	1500.W
Corriente máxima de salida	$I_{Max ac}$	7 A -rms
Potencia de salida máxima	P_{Max}	1500.W
Rango de frecuencia de red		50/60±5 Hz
Factor de potencia		0.8-1
Datos generales		
Consumo de energia durante la noche		<2W
Rendimiento ponderado europeo	η_{inv}	96.1%
Rendimiento maximo del inversor	η_{inv}	97.2%

Fuente: Datasheed SB 1.5-VL-40

Este tipo de inversores tiene implementado el seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) ello indica que el inversor constantemente hará que el generador fotovoltaico en conjunto opere de la mejor manera buscando la mayor productividad posible, sin embargo debido a que el arreglo de paneles FV está en serie o cadena o string estos son dependientes entre si, lo cual implica que si uno de los panes FV presenta algún problema en su funcionamiento (polvo, daño físico, sombra miento, etc.) ello perjudica a todo el sistema.

En la figura 24 se muestra el inversor utilizado para el desarrollo de la presente tesis, el dispositivo tiene un grado de protección IP 65, lo cual garantiza su protección contra polvo y contra chorros de agua con presión moderada en cualquier dirección, es decir el inversor utilizado podría estar expuesto a polvo y lluvia ligera. En cuanto al su ventilación es convección natural mediante un disipador de calor propio del inversor, se ubica en la parte posterior del mismo y consta de una plancha de aluminio canalizada. El aspecto normativo en el proceso de montaje e instalación de los sistemas fotovoltaicos es muy importante, se tiene un conjunto muy variado de normas los cuales mayormente son internacionales ya sea americanas o europeas, la siguiente tabla 8 muestra los más importantes.

Tabla 7

Cumplimiento de normas técnicas del inversor SE3000H

CUMPLIMIENTO DE NORMAS	
Emisiones	IEC61000-6-2, IEC61000-6-3, IEC61000-3-11, IEC61000-3-12, FCC, parte 15, clase B
Seguridad	EC-62109-1/2
Normas sobre conexión a red	IEC61727, IEC62116, EN 50438, entre otros

Fuente: Datasheed 300-370W ERA SOLAR

La tabla 9 muestra el resumen de los tres arreglos, se puede evidenciar claramente que el inversor tiene una potencia por debajo de la potencia instalada de los arreglos, es decir que la potencia nominal del inversor es de 1500W, sin embargo de los sistemas PERC, HIT y CIGS, es 1675Wp, 1650 y 1610Wp respectivamente, esto normalmente se realiza con el objetivo de garantizar la operatividad del sistema en caso extremo la irradiancia sea muy baja producto de un cielo nublado u otros factores como limpieza, sobre amiento.

Tabla 8

Resumen del arreglo fotovoltaico en estudio

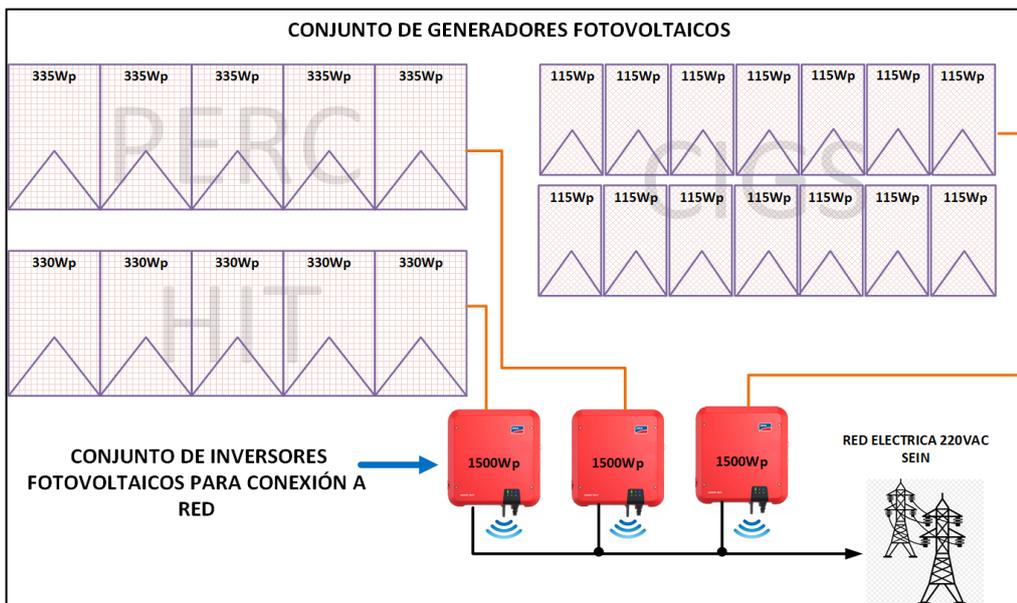
DESCRIPCIÓN	Nº MÓDULOS FV	POTENCIA	POTENCIA-TOTAL
Arreglo 01 (HIT)	5 unidades	330 Wp	1650 Wp
Arreglo 02 (PERC)	5 unidades	322 Wp	1675 Wp
Arreglo 03 (CIGS)	14 unidades	115 Wp	1610 Wp

Fuente: Datasheed 300-370W ERA SOLAR

La figura 24, muestra un esquema de la instalación actualmente en operación, con fines de una mejor panoramía y entendimiento del estudio realizado en la presente tesis, se muestra que la variante principalmente radica en el generador fotovoltaico, es decir en el conjunto de módulos fotovoltaicos o paneles solares, se debe tomar en cuenta que los inversores tienen las mismas características eléctricas.

Figura 25

Esquema de instalación fotovoltaica con los tres sistemas SF_{CR}



Nota: la figura representa un pictórico de la instalación realizada

Con fines de estudio se ha previsto la instalación FV en el tercer piso del instituto de energías renovables y eficiencia energética de la universidad nacional de Juliaca (UNAJ), sede Ayabacas distrito de San Miguel, como se muestra en la figura 25 se encuentra totalmente expuesto a las condiciones climáticas propias del lugar de estudio, principalmente irradiación flujo constantes de aire frío (viento)

Figura 26

Instalación fotovoltaica real con los tres generadores FV



Nota: La figura muestra la instalación terminada con los tres sistemas fotovoltaicos

3.1.3. Instrumentación para registro de datos

3.1.3.1. Medición de irradiancia

Para la medición de irradiancia se ha llevado a cabo por dos medios, mediante el uso de piranómetro y con una celda o mini módulo fotovoltaico (un pequeño panel solar) calibrado. El innovador piranómetro EKO MS80 utiliza un diseño patentado y la última tecnología con un sensor de termopila avanzado. Ofrece un inédito cero-offset bajo y una respuesta más rápida. Resistente a condiciones extremas, su diseño compacto integra funciones adicionales como ventilador y calefactor. Los

modelos MS-80A y MS-80M brindan salidas estándar industriales. Fabricados con rigurosos controles de calidad, estos piranómetros cumplen con normas internacionales ISO/IEC17025/9847, respaldados por 5 años de garantía y recalibración recomendada cada 5 años, eliminando la necesidad de cambiar el desecante. Medición de temperatura de los módulos fotovoltaicos.

Figura 27

Piranómetro Eko MS-80



Nota: La figura muestra el piranómetro proporcionado por la PUCP.

3.1.3.2. Medición de temperatura de los módulos fotovoltaicos

Para el registro de datos de temperatura de módulos fotovoltaicos se tiene instalado un conjunto de 8 sensores de temperatura PT-1000 con adhesivo para superficies planas, estos dispositivos son del tipo RTD (Diferencial Temperature Resistance) por ser una pt 1000 se considera una resistencia de 1000 ohmios para una temperatura de 0°C, se ubican 2 sensores en la parte posterior de uno de los paneles solares correspondiente a cada sistema.

Tabla 9

Sensor de temperatura pt-1000

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Tipo de elemento	Pt-100
Rango de temperatura	-50°C-100°C
Tamaño de parche	15mmX30mm
Alambre de plomo	4 hilos
Precision	Clase A

Fuente: Data sheet Pt 1000

En la tabla 10 se detallan las características físicas y eléctricas de los sensores resistivos utilizados para la evaluación de temperatura de los módulos fotovoltaicos en estudio. Los sensores resistivos tipo RTD únicamente son una resistencia con dos hilos, sin embargo, se considera el uso de tres o cuatro hilos con la finalidad de disminuir la resistencia de los mismos, ello es necesario en ocasiones donde se presenta que el objetivo a medir se encuentra alejado de la tarjeta de adquisición de datos.

Figura 28

Sensor de temperatura RTD



Nota: La figura muestra el sensor pt 1000 con sus dos superficies para pegar en superficies planas.

3.1.3.3. Medición de otros parámetros ambientales

Para el registro de parámetros ambientales se tiene instalado una estación meteorológica, dicho equipo se ha implementado en un lugar cercano a la instalación fotovoltaica en estudio.

Figura 29

Estación meteorológica WS500



Nota: la figura muestra la estación meteorológica instalada en cp. Ayabacas

Este dispositivo compacto todo en uno para medir la temperatura, la humedad relativa, la presión del aire, la dirección y la velocidad de viento. Detección de viento con construcción a prueba de pájaros. Sensor meteorológico compacto todo en uno, baja potencia, calentador, pantalla de radiación aspirada, funcionamiento sin mantenimiento protocolo de comunicación abierto.

Interfaces: RS485 con protocolos compatibles UMB-Binary, UMB-ASCII, Modbus-RTU, MODBUS-ASCII, XDR y SDI-12.

Este tipo de equipos se utiliza mayormente para la observación del clima para carreteras y sistemas de control de tráfico, así mismo para el

monitoreo de granjas fotovoltaicas y estaciones hidrometeorológicas en aeropuertos, marinas y barcos a bordo. Tiene un alto grado de protección contra lluvias y polvo.

3.1.3.4. Medición de parámetros eléctricos en DC y AC

Para la medición de parámetros eléctricos de los SFCR en estudio se puede realizar por dos métodos, local y remoto. El primero consiste en establecer comunicación entre una PC y el inversor mediante de protocolo de comunicación ETHERNET, ello con la ayuda de un cable de comunicación con conectores RJ45, se conecta desde el inversor hasta la PC. Para la comunicación local se debe registrar los datos y almacenar en la computadora se ha realizado un interfaz de comunicación elaborado en programa LabView

Figura 30

Comunicación local entre inversor y PC



Nota: la figura muestra el inversor SUNNY BOY, cable de comunicación ethernet.

La comunicación modo remoto se desarrolla estableciendo comunicación entre la computadora y el inversor; Para este proceso se requiere señal de internet debido a que el interfaz gráfico será el portal web

propio del inversor, SUNNY PORTAL, se trata de una plataforma de acceso abierto, creado por el fabricante de los inversores SMA, proporciona una ventana de acceso remoto y en tiempo real de cada inversor instalado, para ingresar es necesario crear una cuenta y registrar el inversor, posteriormente se puede acceder desde la web y verificar el flujo de energía eléctrica.

Figura 31

Plataforma de monitoreo Sunny Portal



Nota: la figura representa la plataforma SUNNY portal

Ambos métodos de adquisición son cruciales, pero el Sunny Portal tiene un intervalo predeterminado de 15 segundos por dato, establecido por los desarrolladores. En contraste, la adquisición local permite ajustar la frecuencia de datos, cumpliendo con la normativa IEC 61724 de un mínimo de 01 dato por minuto. Por esta razón, se prefiere la adquisición

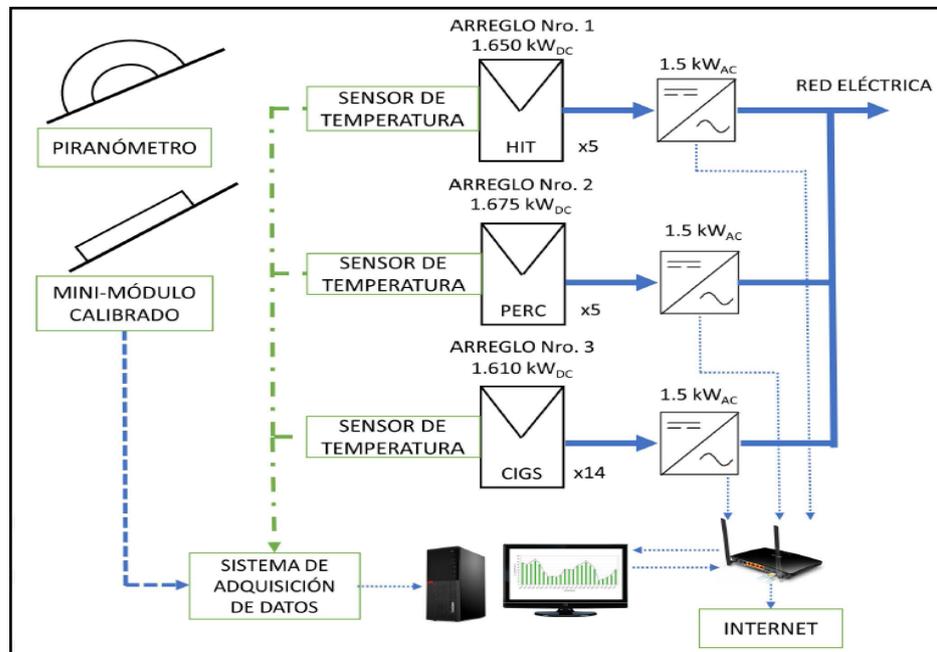
de datos local, ofreciendo flexibilidad según los requisitos ambientales y normativas específicas.

3.1.3.5. Tarjeta de adquisición de datos (DAQ)

La DAQ está compuesta por un conjunto de componentes electrónicos, uno de ellos el más importante es el procesador el cual es el ATMEGA 328P así mismo otro elemento principal es el convertidor analógico digital ADS1115. la tarjeta de adquisición de datos principalmente, recolecta información proveniente de los RTD y así mismo de Los módulos calibrados para registro de irradiancia. otro elemento, con finalidad de adaptar la señal proveniente de los sensores de temperatura a digital, es el componente conocido como MAX 31865.

Figura 32

Distribución de instrumentación del sistema DAQ



Fuente: Carhuavilca 2022



El diseño de la tarjeta electrónica surge a raíz de un trabajo de tesis elaborado por investigadores del grupo MATER de la Pontificie Universidad Católica del Perú, esta tarjeta se ha implementado en distintas zonas del país dado que es un proyecto integral.

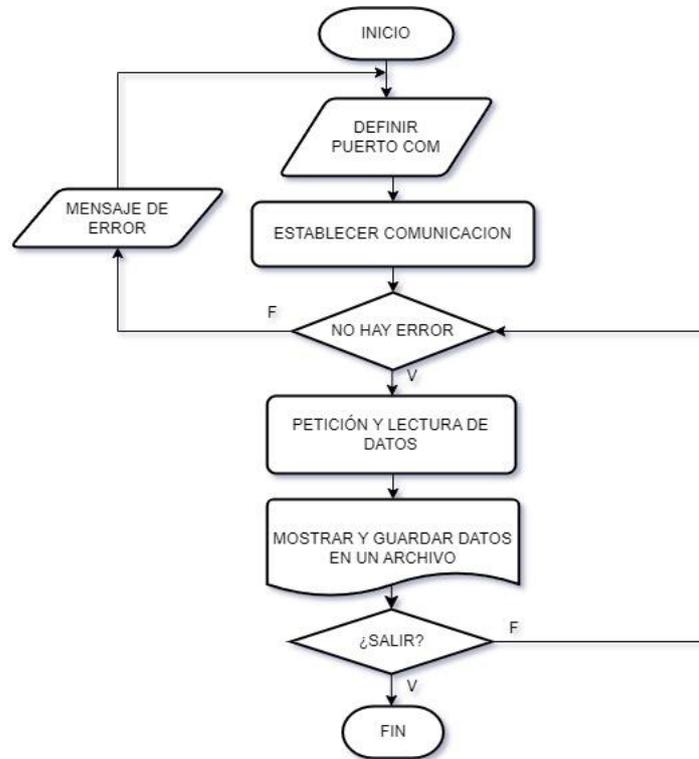
La figura 31 muestra la disposición de los instrumentos, permitiendo visualizar la distribución e integración desde el punto inicial de registro hasta la computadora PC o laptop, que actúa como punto final.

3.1.3.6. Software de instrumentacion virtual LabView.

LabVIEW, un software de instrumentación virtual, se destaca en el monitoreo de instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, conocidas como (SFCR). Este programa facilita la adquisición y análisis de datos en tiempo real, permitiendo a los usuarios supervisar eficientemente la generación de energía solar. LabVIEW ofrece una interfaz gráfica intuitiva para diseñar sistemas de monitoreo personalizados, integrando fácilmente diversos instrumentos y sensores en una plataforma central. Su capacidad para gestionar grandes conjuntos de datos y proporcionar visualizaciones claras y detalladas permite a los profesionales optimizar el rendimiento y detectar posibles problemas en las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, contribuyendo así a la eficiencia y sostenibilidad de la generación de energía solar.

Figura 33

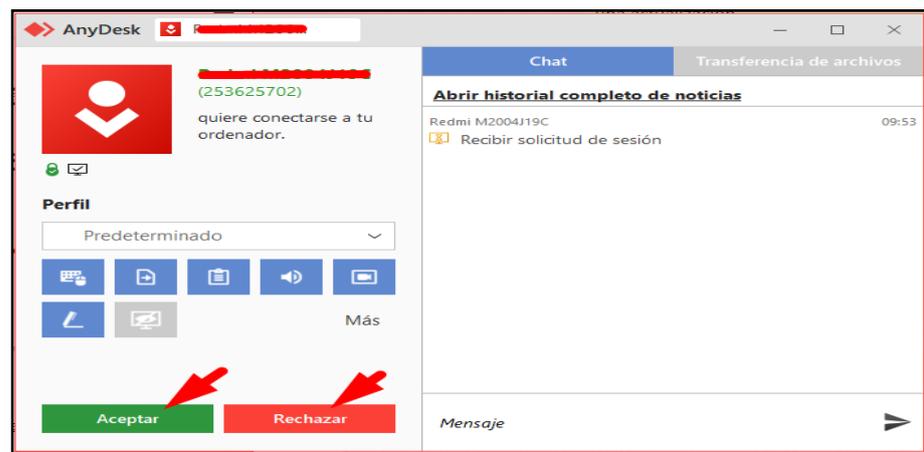
Diagrama de flujo del Software LabView asociado al SFCR



Nota: Fuente: Carhuavilca 2022

Figura 34

Software AnyDesk para acceso remoto al computador



Nota: Any Desk es una plataforma de acceso remoto a procesadores.

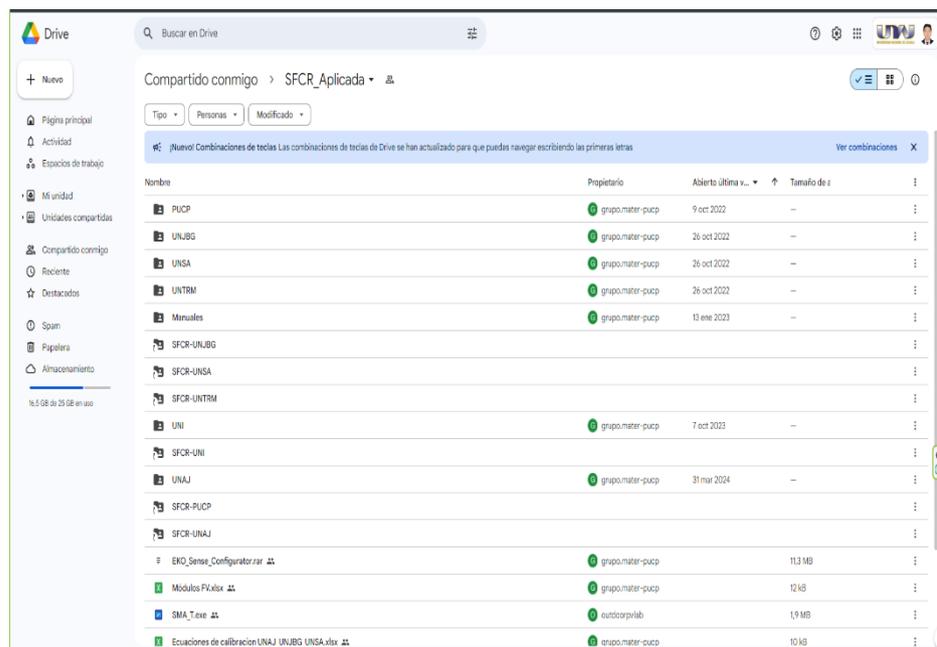
3.1.3.7. Acceso remoto a la computadora de monitoreo

Para el acceso a la información local es necesario que la computadora en uso tenga acceso a internet, y se tenga instalado el programa ANY DESK, con ambos requisitos se puede acceder desde cualquier lugar del mundo y realizar configuraciones del sistema.

Para acceder a la data local se ha realizado la sincronización de las carpetas locales con el Google Drive, de tal manera que cualquier usuario con los permisos correspondientes puede acceder a la data recolectada a nivel nacional. (Lima, Arequipa, Chachapoyas, Juliaca y Tacna)

Figura 35

Sincronización de las carpetas en el Google drive



Nota la figura muestra la carpeta sincronizada con la cuenta de Google Drive, es posible acceder a la información detallada de cada uno de los sistemas instalados a nivel nacional la aplicación permite descargar datos en formato csv, debido a que en este formato la data ocupa menor espacio, además es compatible con programas como el Origin y Python.



3.2. POBLACIÓN

En el Instituto de Energías Renovables y Eficiencia Energética ubicado en el campus universitario de la UNAJ, sede Ayabacas se ha instalado un sistema de micro generación distribuida con seis SFCRs, uno de ellos constituido por micro inversores, potencia nominal 2.7kW, el otro con inversor string convencional SMA de 3kW, un sistema con inversor optimizado con convertidores cc cuya potencia nominal es 3kW y tres sistemas fotovoltaicos de 1.5kW con inversores SMA con tres tecnologías diferentes (PERC, HIT y CIGS), todos estos sistemas se han instalado y actualmente están en operación inyectando en la red alrededor de 10kW, las instalaciones anteriormente mencionadas se ha implementado con fines netamente académicos sin fines de lucro. y han sido financiados por el banco mundial en cooperación de FONDECYT.

3.3. MUESTRA

Para este trabajo de investigación, se seleccionó como muestra de estudio un conjunto de sistemas fotovoltaicos conectados a red que incorporan tres tecnologías de generación fotovoltaica: PERC, HIT y CIGS. Cada sistema tiene una potencia nominal de 1.5 kW, abordando así un análisis detallado de estas tecnologías específicas. Esta elección de muestra permite una investigación exhaustiva sobre el rendimiento y las características distintivas de estos sistemas fotovoltaicos en conexión a red, contribuyendo significativamente a la comprensión integral de su funcionamiento y aplicaciones.

3.4. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación adopta un enfoque aplicado y preexperimental, centrándose en el análisis del comportamiento de un generador fotovoltaico bajo condiciones reales de operación, con un enfoque específico en los paneles PERC, HIT y



CIGS. Este estudio implica una comparación exhaustiva entre estas tres tecnologías, evaluando parámetros eléctricos clave como corriente, tensión, potencia y energía, tanto en corriente alterna como continua. Además, se lleva a cabo un análisis detallado del rendimiento de cada generador en estudio, proporcionando una visión completa de su eficacia. Este enfoque detallado contribuye al entendimiento integral de las características distintivas y el rendimiento específico de las tecnologías fotovoltaicas mencionadas.

La investigación se desarrolló siguiendo estos pasos específicos para los sistemas fotovoltaicos PERC, HIT y CIGS:

- Montaje e instalación de los generadores fotovoltaicos, inversores y dispositivos de medición, con configuración y puesta en marcha del sistema.
- Implementación del sistema de adquisición de datos, distribución y almacenamiento.
- Recopilación de datos sobre el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos durante un periodo de estudio de 12 meses.
- Registro de la irradiancia incidente en el lugar de estudio.
- Basándonos en los resultados obtenidos, evaluación y determinación del de la tecnología más óptimo para los generadores fotovoltaicos, teniendo en cuenta las condiciones de irradiancia y temperatura propias del lugar de estudio.

3.4.1. Tipo de investigación

La investigación adopta un enfoque de investigación aplicada, utilizando métodos experimentales para recopilar información y datos sobre el comportamiento del sistema fotovoltaico. Se realizaron variaciones en la tecnología, empleando PERC, HIT y CIGS, con el propósito de evaluar sus desempeños. Posteriormente, se aplicó investigación correlacional para explorar



las relaciones entre las variables climáticas, potencia nominal del generador fotovoltaico y rendimiento del inversor en cada tecnología. El estudio culminó identificando la o las tecnologías más adecuadas para las condiciones climáticas de la zona de estudio, en particular, Juliaca-Puno-Perú, a una altitud aproximada de 3822 msnm.

3.4.2. Variables

3.4.2.1. Variable independiente

Condiciones climáticas del lugar: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Irradiancia (W/m^2)

3.4.2.2. Variable dependiente

Comportamiento energético de los tres generadores fotovoltaico
Corriente Tensión, Potencia, Energía, Rendimiento

3.4.2.3. Operacionalización de las variables

En esta tesis sobre sistemas fotovoltaicos, la operacionalización de variables consiste en definir y cuantificar conceptos como la irradiancia solar (W/m^2), la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) y el ángulo de inclinación (grados). Estos datos, recogidos mediante equipos calibrados, facilitan el análisis del rendimiento y la eficiencia del sistema, lo que contribuye a optimizar su funcionamiento. Además, se considera la influencia de factores externos, como la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, para obtener una evaluación más precisa del desempeño del sistema fotovoltaico en diversas situaciones.

Tabla 10

Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variabes	Definición conceptual	Indicadores	Unidad de medida
Independiente	Irradiancia	Comprende la irradiancia incidente en el plano del generador fotovoltaico.	Irradiancia determina el recurso solar en la zona de estudio.	W/m ²
	Temperatura	La temperatura ambiente es determinante para el desenvolvimiento del generador fotovoltaico.	Temperatura ambiente, determina la tensión en el generador, consecuentemente la energía generada	°C
Dependiente	Comportamiento del generador	El comportamiento de los parámetros eléctricos de cada uno de los generadores (PERC, HIT y CIGS) en estudio.	Si el factor de dimensionamiento se aproxima a uno es un muy buen indicador	Corriente: A Tensión: V Potencia: kW Energía: kWh
	Rendimiento del inversor	El rendimiento se determina a partir de la energía eléctrica registrada e irradiación registrada en el plano del generador.	El rendimiento del generador determina la capacidad de este, para transformar la energía solar a eléctrica	η : % Rendimiento de inversor

Nota: variables dependientes e independientes así como sus respectivos indicadores.

En la tabla 11 se detalla la descripción de las variables fundamentales que abordan el problema central de esta investigación. El enfoque primordial reside en caracterizar cada una de las tecnologías estudiadas, específicamente en relación con las condiciones climáticas en la ciudad de Juliaca. Posteriormente, se busca identificar el sistema más eficiente y con menores pérdidas.

3.5. METODOLOGIA SEGÚN OBJETIVOS ESPECÍFICOS PLANTEADOS

La descripción de los métodos de investigación para cada objetivo se ha planteado de la siguiente manera:

- Se recolectaron datos sobre el comportamiento de la temperatura en la superficie posterior de los generadores PERC, HIT y CIGS. Posteriormente, se realizó un filtrado de datos en un periodo específico, de 10:00 am a 14:00 pm, para obtener temperaturas máximas, mínimas y valores promedio diarios durante un periodo de 12 meses en el año 2022.
- Además, se recopilaron datos sobre la irradiancia, irradiación y parámetros eléctricos de cada tecnología para calcular la energía eléctrica generada. Este proceso se llevó a cabo durante 12 meses de operación continua. A través de ecuaciones matemáticas, se obtuvo el PR (performance ratio: rendimiento global), considerando la norma técnica IEC 61724-2 para estudios de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica (SFCR). Todo esto se realizó en el marco de las condiciones de irradiancia y temperatura en el centro poblado de Santa Maria de Ayabacas, en la ciudad de Juliaca.

Para ambos métodos se ha tomado un total de 12 meses de operación continua evidentemente se trata de una gran cantidad de datos, los cuales se ha tenido que filtrar

la información para el caso de energía eléctrica se debe realizar un cálculo acumulativo, sin embargo para la temperatura se debe realizar un análisis sobre sus promedios, durante el experimento se ha notado bastante inercia del comportamiento térmico a distintas horas del día por lo cual surge la necesidad de seleccionar la data durante las 10 de la mañana hasta las 2 de la tarde, dado que se identificó poca variabilidad de este parámetro.

Tabla 11

Técnicas e instrumento de recolección de datos

Objetivo específico	Fuente	Método	Herramienta
Evaluar el comportamiento térmico de los sistemas de generación fotovoltaica PERC, HIT, y CIGS, en condiciones de temperatura propios de la región Puno.	Registro de datos de temperatura de modulo FV y temperatura ambiente.	Evaluación de promedios, valores mínimos y máximos,	Conjunto de sensores RTD para cada sistema. Hojas de cálculo, Origin phyton, LabView
Evaluar el rendimiento anual de los sistemas de generación fotovoltaica PERC, HIT, y CIGS considerando valores de irradiancia global en plano inclinado, propios de la región de Puno.	Registro de datos de parámetros eléctricos a la entrada y salida de cada uno de los generadores FV en estudio.	Considerar variantes en la tecnología utilizada en cada uno de los generadores FV en estudio	Sensores de tensión y corriente en el inversor. Hojas de cálculo, Origin phyton

Nota: la tabla muestra el proceso de elaboración de tesis en función de los objetivos.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En función de los objetivos trazados en el presente trabajo de investigación, se ha planteado dos objetivos:

El primero objetivo consiste en caracterizar el comportamiento de temperatura de los sistemas de generación fotovoltaica PERC, HIT, y CIGS, en condiciones de temperatura ambiente, propios de la región Puno. Para cumplir ello se tiene instalado el conjunto de sensores RTD, acompañada por su electrónica para su adaptación a señal digital compatible con la PC.

El segundo objetivo consiste en Evaluar el rendimiento anual de los sistemas de generación fotovoltaica PERC, HIT, CIGS considerando valores de irradiancia global en plano inclinado, propios de la región de Puno. Para el cumplimiento de este objetivo se ha realizado la recolección de datos, eléctricos y ambientales durante 12 meses, considerando las 04 estaciones del año.

Para el selecciona miento y filtrado de datos, debido a que se tiene 01 dato cada segundo fue necesario uso de Python con sus respectivos complementos, para la realización de los gráficos se ha considerado el programa Origin de la siguiente manera:

- Se tiene un dato por minuto, ello implica 60 datos por hora y un total de 240 datos diarios considerando 10:00 am hasta las 14:00 pm.
- De los 240 datos obtenidos en un día (durante solo 04 horas de registro), se pasa a promediar y se obtiene un dato diario, posteriormente se cuenta con un registro de 365 para temperatura mínima, máximo y promedio.

- En algunas ocasiones se presentó la falta de uno o dos datos, para lo cual se ha realizado la interpolación y extrapolación según sea el caso.

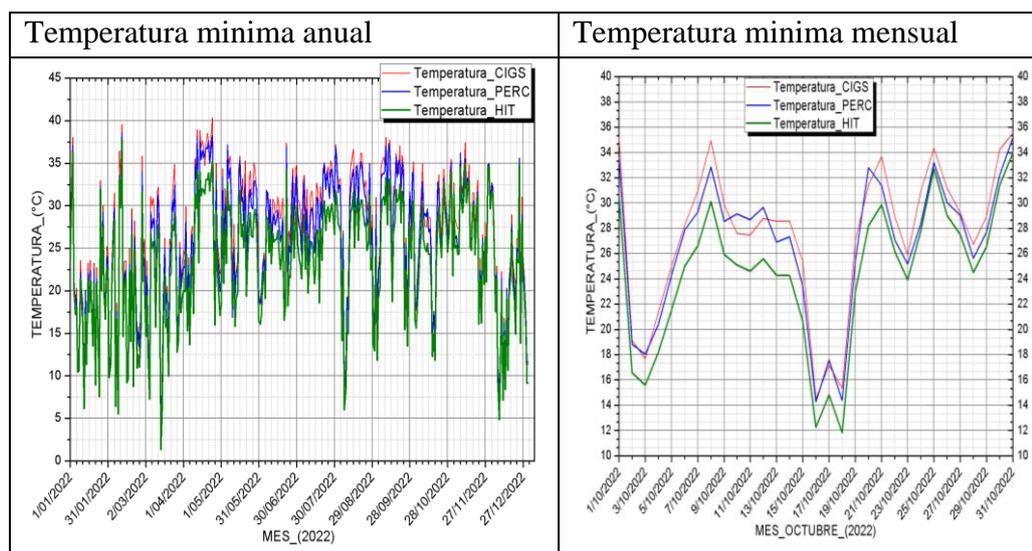
4.1. ANÁLISIS DE TEMPERATURA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

4.1.1. Temperatura mínima de los tres sistemas FV

La data recolectada en 12 meses de trabajo se ha La temperatura mínima para los sistemas fotovoltaicos en estudio, muestra en la figura 35 que, mayoritariamente se encuentra por debajo de los 35°C.

Figura 36

Registro de temperatura mínima anual y mensual



Nota: la figura muestra la temperatura durante el 2022 así como el mes de octubre del mismo año.

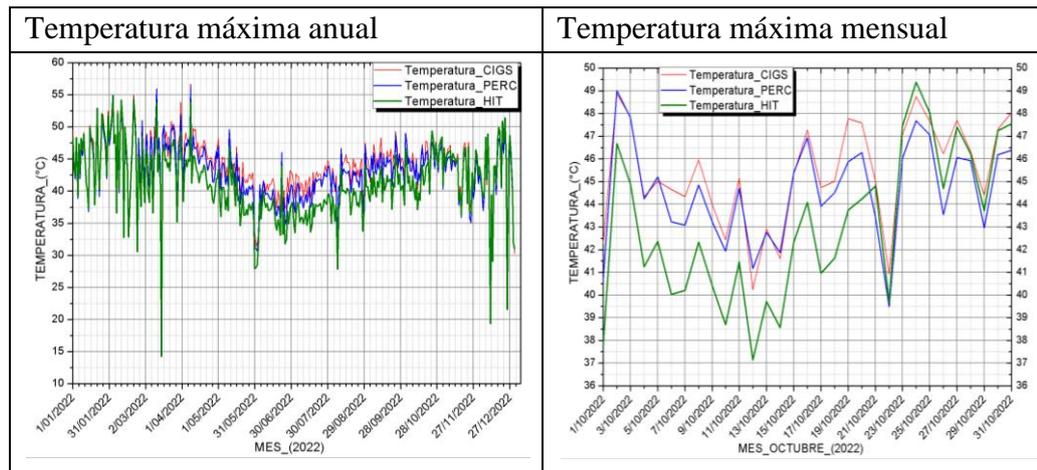
Los valores obtenidos respecto de la temperatura anual muestran valores por debajo de los 40°C, durante un año de estudio, así mismo se ha realizado el análisis en el mes de octubre, obteniendo valores de hasta 12°C, los resultados de temperatura mínima son importantes ya que a bajas temperaturas la tensión del cada sistema tiende a aumentar, con ello la potencia entregada también.

4.1.2. Temperatura máxima de los tres sistemas FV

Para la temperatura máxima se ha obtenido valores cercanos a 50°C y superiores a los 30°C.

Figura 37

Registro de temperatura anual máxima en los tres sistemas



Nota la figura muestra las temperaturas maximas del año 2022 y el mes de octubre del 2022.

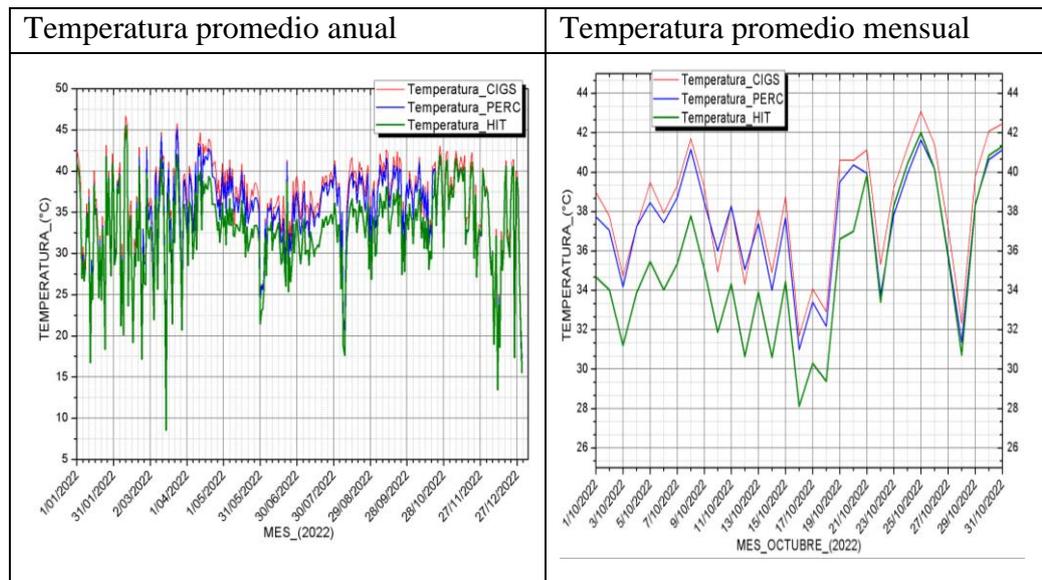
La figura 33 muestra la temperatura máxima, según (Lamigueiro, 2020) la tensión tiende a disminuir en situaciones de elevadas temperaturas, al mismo tiempo la potencia entregada por los generadores también van ha disminuir, de acuerdo con las especificaciones técnicas de cada uno de las tecnologías PERC, CIGS y HIT, utilizadas se encuentran dentro de su rango de trabajo normal, tanto en la temperatura máxima como en la mínima, esto indica que bajo condiciones climáticas de temperatura en el altiplano puneño los tres sistemas tienden a una operación normal, sin embargo, al hacer una comparación, entre cada uno de ellos se puede evidenciar claramente en ambos casos el sistema CIGS tiende a obtener las temperaturas más altas ello evidentemente impactará de manera negativo en el rendimiento de este sistema en comparación con los sistemas PER y HIT, como se verá posteriormente.

4.1.3. Temperatura promedio anual de los tres sistema FV

La temperatura promedio registra datos de entre 35°C a 45°C lo cual podría aproximarse a la temperatura normal de operación de los sistemas en la ubicación geográfica donde se encuentran instalados

Figura 38

Registro de temperatura promedio anual en los tres sistemas



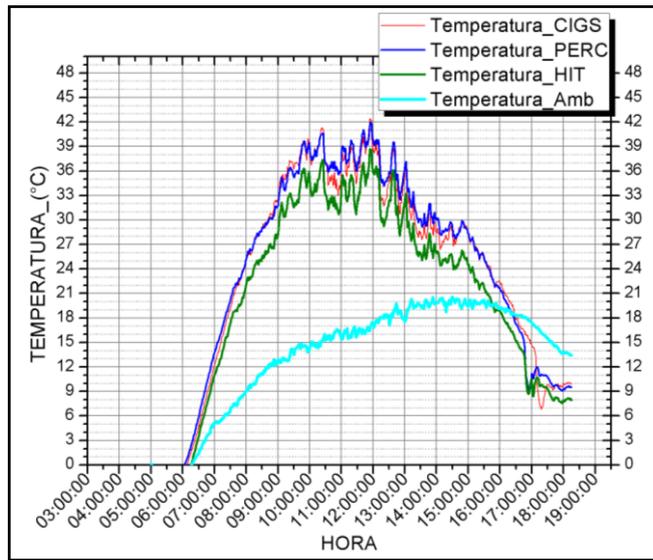
Nota: La figura muestra las temperaturas anual del año 2022 y el mes de octubre del 2022

Para una explicación más detallada se ha tomado una muestra de datos en el mes de octubre para los tres casos así mismo se ha revisado el comportamiento de irradiancia y se ha separado los datos del día 10 de octubre, dado que fue un día con una irradiancia muy favorable.

Como se pudo apreciar anteriormente la temperatura de los módulos se presentan mayoritariamente según el siguiente orden: CIGS>PERC>HIT, se atribuye este orden en primer lugar al tipo de tecnología, así mismo el tamaño del generador FV es decir el área de captación del mismo.

Figura 39

Registro de temperatura promedio en los tres sistemas octubre 2022

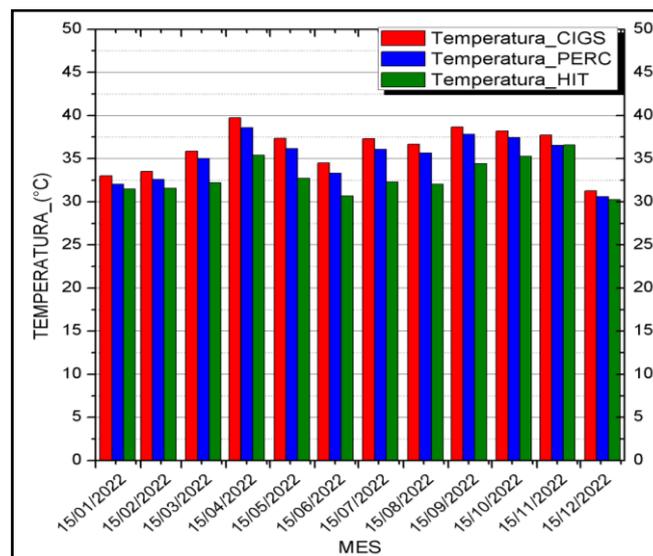


Nota La figura muestra la temperatura de los 4 sistemas en un día soleado con cielo limpio.

La figura 39 muestra un extracto de los datos obtenidos a partir de la temperatura promedio mensual de lo cual se puede evidenciar que la temperatura promedio oscila entre treinta a cuarenta grados centígrados.

Figura 40

Resumen de temperatura promedio mensual

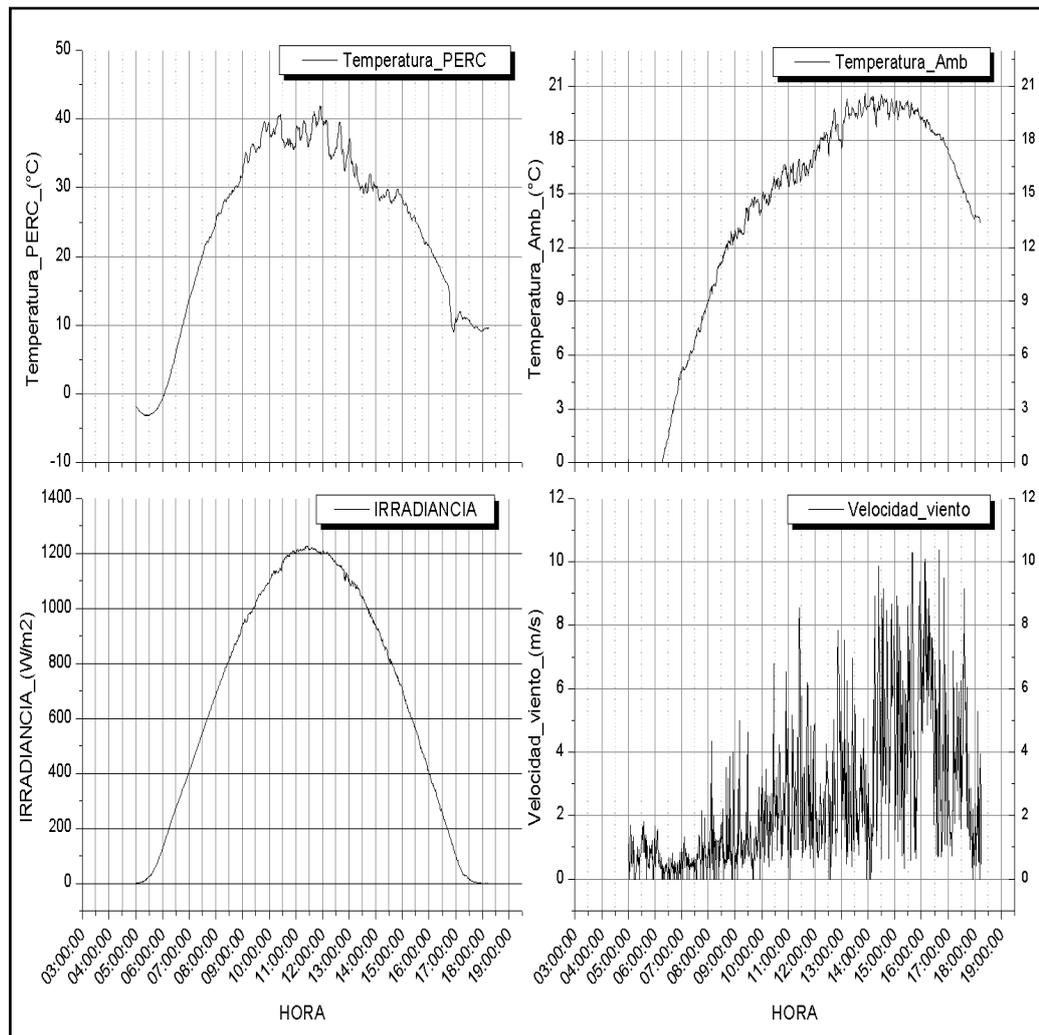


Nota: La figura muestra que en el periodo 2022 la temperatura promedio por encima de los 30°C y así mismo el sistema CIGS presenta mayor calentamiento sobre todo en abril.

Aleatoriamente se ha seleccionado datos del día 10 /10/2022 y con los datos de la estación meteorológica ubicada cerca del conjunto de generadores fotovoltaicos se pudo verificar el comportamiento de temperaturas con respecto a la velocidad del viento,

Figura 41

Caracterización térmica día 10 octubre 2022



Nota: La figura revela de manera simultanea temperatura de modulo y ambiente, irradiancia global y velocidad de viento..

La figura 40 muestra un día con excelente irradiancia, lo más probable cielo completamente limpio, la temperatura ambiente en su punto crítico no supera los 21 °C y como caso particular la temperatura del sistema PERC no supera los

43 °C la velocidad del viento indica un comportamiento no uniforme claramente se puede observar que a partir de las 2:00 pm este se incrementa, así mismo también la temperatura ambiente, sin embargo la tecnología PERC disminuye su temperatura esto se debe a la ventilación natural sobre la superficie posterior de los paneles producto de la circulación de aire causada por el viento.

4.2. COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS SISTEMAS FV

La tabla 12 muestra las características de los tres generadores instalados, se aprecia que se tiene mayor captación en el generador conformado por los 14 módulos fotovoltaicos CIGS, sin embargo, no es el de mejor rendimiento.

Tabla 12

Área de captación y potencia instalada

Tecnología	Área de Modulo	Cantidad	Área de captación	Potencia de modulo	Potencia Instalada
PERC	1.686400 m ²	5 Und	8.43200 m ²	335Wp	1675 Wp
HIT	1.674270 m ²	5 Und	8.37135m ²	330Wp	1650 Wp
CIGS	0.804568 m ²	14 Und	11.2639m ²	110Wp	1540 Wp

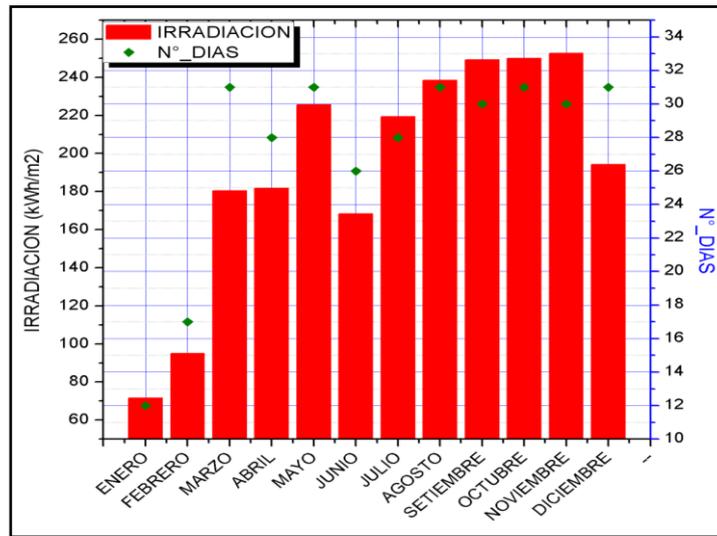
Nota: La tabla resume las tecnologías utilizadas así como la potencia instalada y el área de cada generador

4.2.1. Irradiación incidente por unidad de área

La figura 41 muestra también el número de días considerados para el cálculo, se puede verificar que los primeros meses del año se ha perdido información, no obstante, dado que la irradiación es una variable independiente no influye en la respuesta del generador fotovoltaico en estudio.

Figura 42

Energía solar incidente por cada m2 de área



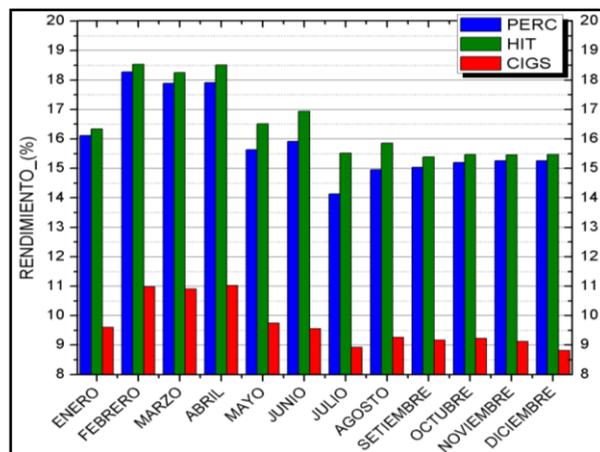
Nota: La figura muestra la irradiación solar disponible por cada m² así como los días registrados

4.2.2. Rendimiento de los generadores FV

La figura 42 se obtiene a partir de la ecuación 12 muestra el rendimiento de cada tecnología, para lo cual se ha considerado la relación entre la irradiación incidente en el área de cada generador y la energía eléctrica entregada por los mismos.

Figura 43

Rendimiento de los generadores fotovoltaicos



Nota: La figura muestra el rendimiento de los tres generadores fotovoltaicos.

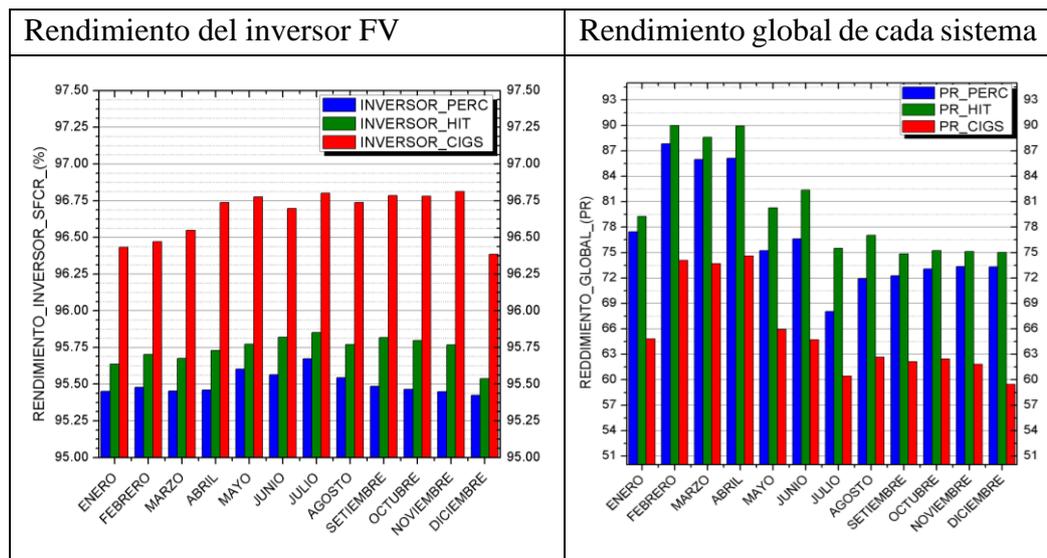
4.2.3. Comportamiento energético de los sistemas

La figura 43 muestra el rendimiento del inversor, para lo cual se ha tomado en cuenta la energía proveniente del generador fotovoltaico y la energía saliente del inversor según la ecuación 13.

El indicador por excelencia que interpreta de mejor manera el desempeño energético un sistema de generación fotovoltaica con inyección a red, se trata de el performance ratio (PR) o rendimiento global del sistema.

Figura 44

Rendimiento energético del sistema FV



Nota la figura muestra el rendimiento de cada inversor así como el PR de cada sistema.

La figura 43 indica el rendimiento del inversor asociado al sistema CIGS, se verifica que su rendimiento es superior a las otras tecnologías, a pesar que el rendimiento global este sistema es el menos beneficiado, esto sucede debido a que el inversor no presenta pérdidas dado que el generador CIGS es de 1540 Wp y todos los inversores son de 1500W, verificar tabla 12, las otras tecnologías PERC y HIT en cambio tienen potencia instalada de 1675Wp y 1650Wp, lo cual sobrepasa la capacidad del inversor, dado que el inversor solo transforma una

energía en otra se limita a entregar a lo más 1500W, el resto se considera como perdidas haciendo que sean menos eficientes, así mismo se ha detectado el calentamiento de los inversores.

Con el fin de verificar la respuesta de los inversores bajo condiciones de operación real, se ha empleado un data Logger de temperatura conjuntamente con termocuplas acoplados en la parte posterior del inversor. La ficha técnica se adjunta al anexo.

Figura 45

Datta Logger de temperatura, para los 03 inversores

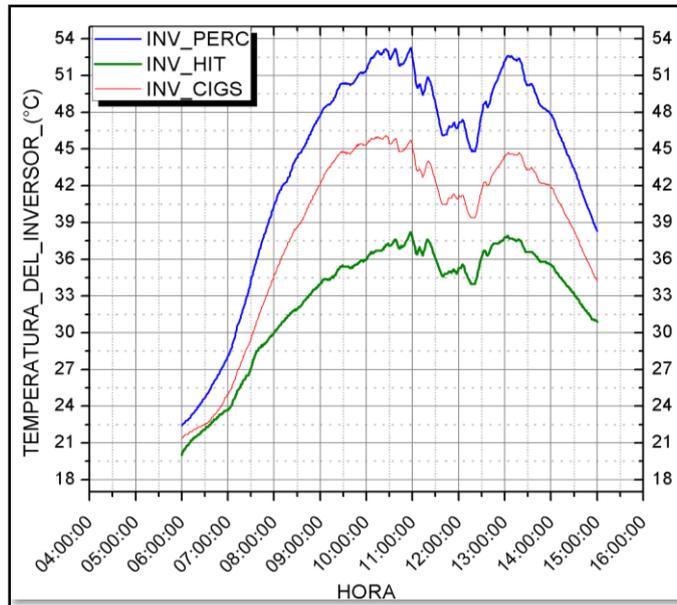


Nota: La figura muestra el medidor de temperatura para verificar la temperatura de lo inversores.

Se debe indicar por condiciones propias a la infraestructura del lugar de estudio, fue necesario realizar la instalación de lo inversores fotovoltaicos en un ambiente cerrado, pero no húmedo, según el fabricante del inversor indica que la ventilación de los mismos debería de ser en forma natural, considerando su grado de protección IP 65 se pude instalar en exteriores, para garantizar mejor ventilación, así mismo la sobrecarga del inversor se reflejará en el incremento de temperatura de los mismos.

Figura 46

Comportamiento de temperatura de los inversores fotovoltaicos

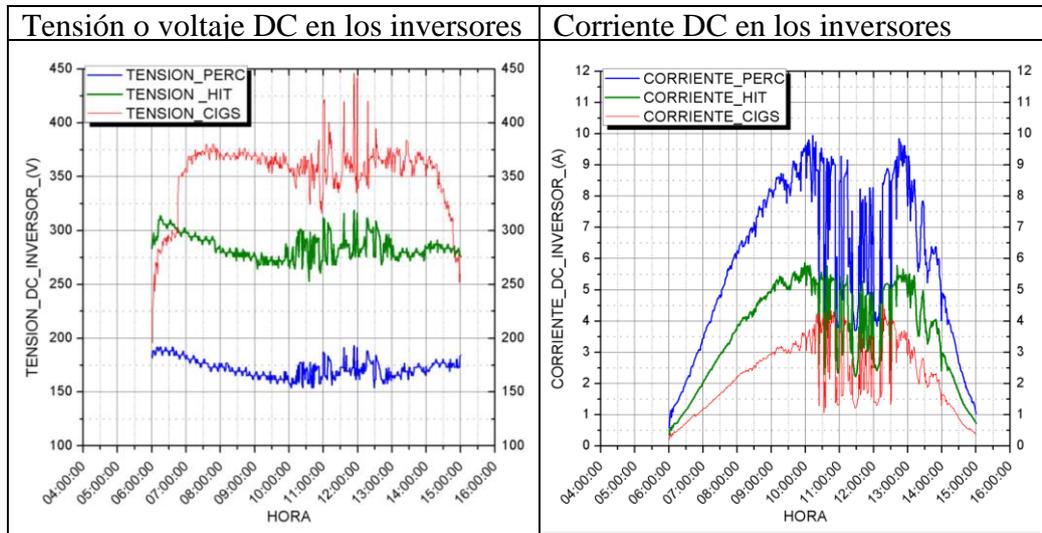


Nota: La figura muestra los resultados sobre la medición de temperatura de cada inductor de manera simultánea.

Con respecto a la temperatura de los tres inversores conectados con diferentes tecnologías, el que tiende a calentarse más es el inductor con tecnología PERC, esto se debe a que por este sistema fotovoltaico se genera gran cantidad de corriente, el cual según ficha técnica del módulo fotovoltaico la corriente máxima es 8.96 A. y la corriente máxima según ficha técnica del inductor es de 10 A. En la figura se mostró que conforme iba aumentando la corriente la temperatura también aumentaba, por tal motivo se demuestra que la corriente generada del módulo fotovoltaico influye en el aumento de temperatura del inductor. Cabe mencionar que la temperatura máxima del inductor según ficha técnica es de 60°C, por lo tanto, según resultados de la temperatura del inductor de la tecnología PERC, está dentro del rango de temperatura, pero está muy cerca a llegar a la temperatura máxima de la ficha técnica del inductor.

Figura 47

Tensión y corriente DC registrada en inversores



Nota: La figura muestra en detalle la corriente y tensión que ingresa a cada inversor FV.

La tecnología del sistema fotovoltaico que tiene mejor funcionamiento, es la tecnología HIT, ya que genera casi la misma cantidad de potencia que el sistema PERC, y a la vez no causa el calentamiento excesivo del inversor, debido a que su corriente máxima según ficha técnica del módulo fotovoltaico es 5.7 A. por lo cual se concluye que este sistema con tecnología HIT es el más adecuado para este tipo de inversor.

La respuesta ante una irradiancia elevada implica un aumento en la corriente del generador fotovoltaico, ello de acuerdo a la teoría planteada en el presente trabajo de investigación; se debe a que a mayor irradiancia mayor energía fotónica, con ello se hace que exista movilización de mayor cantidad de electrones, dado que la corriente eléctrica representa el flujo de electrones por unidad de área, es de entenderse que esta aumentara su intensidad.

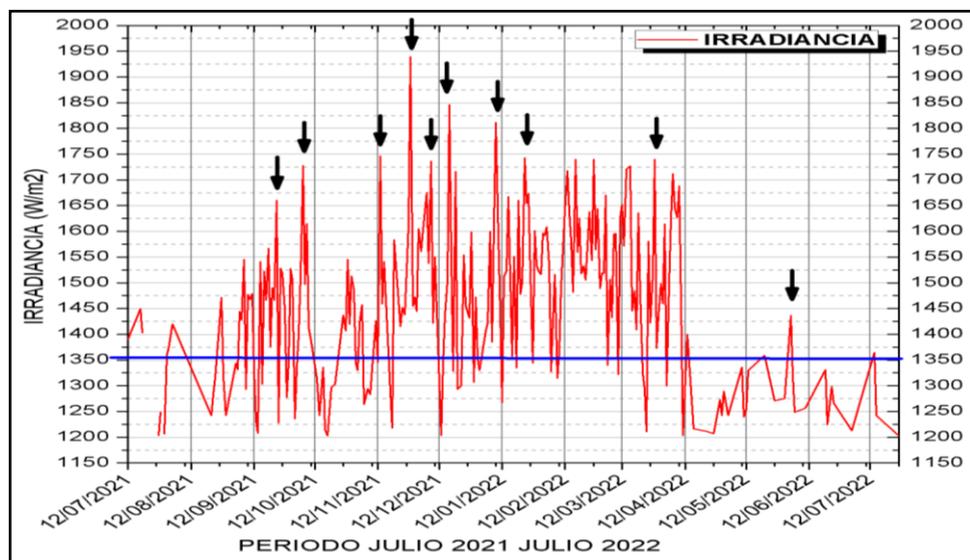
4.2.4. Sobre irradiancias en el plano inclinado

Durante la verificación detallada para cada uno de los parámetros en los SFGR, se pudo identificar la presencia de niveles altos de irradiancia, lo cual tiene sentido por la altitud de la zona geográfica en estudio.

Se considera irradiancia extrema cuando se supera los valores de la constante solar en este caso $1350\text{W}/\text{m}^2$, y sobre irradiancia cuando se tiene valores inferiores pero muy cercanos a la constante, para elaborar el gráfico mostrado fue necesario filtrar los datos durante los 12 meses de operación los 356 datos considerando la consigna de que todos esos valores deben ser superiores a $1200\text{W}/\text{m}^2$

Figura 48

Sobre Irradiancias incidentes en el plano del generador



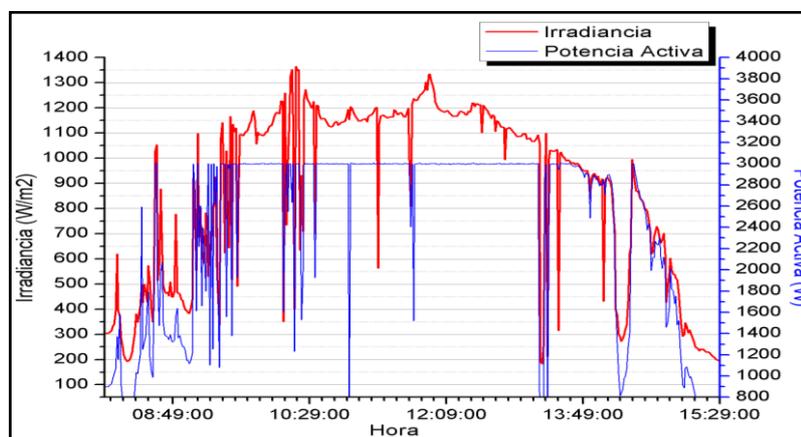
Nota: La figura muestra el desarrollo anual de irradiancia global en el periodo 2022.

La figura 47 se ha obtenido promediando valores por día y luego por mes. Las flechas oscuras identifican picos de sobre irradiancia, lo cual podría afectar instalaciones fotovoltaicas como se verá en adelante.

Se debe tomar en consideración que cuando un generador fotovoltaico es sobredimensionado respecto del inversor, y a la vez se somete a valores altos de irradiancia considerando temperaturas bajas similares a la zona de estudio del presente trabajo de investigación (Juliaca Puno), el inversor se satura constantemente, saliendo de operación con el fin de autoprotección.

Figura 49

SFCR sobredimensionado y expuesto a sobre irradiancia



Nota: La figura muestra la respuesta de un inversor FV ante sobre irradiancias .

La figura 48 corresponde a un generador de 3700Wp conectado con un inversor de 3000Wp, el sistema actualmente se encuentra operando bajo esas condiciones en el mismo lugar donde se desarrolla la presente tesis.

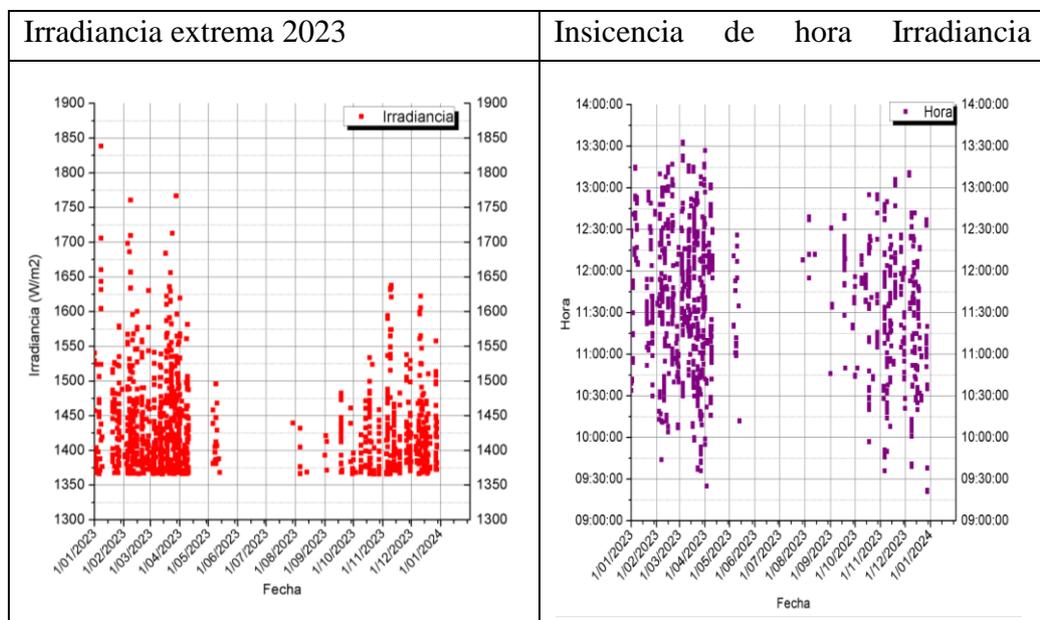
Se puede verificar que cuando los valores de irradiancia son altos, el inversor deja de funcionar y la potencia entregada se va a cero así mismo por más energía eléctrica que ingrese al inversor, este se limita a generar energía de acuerdo a su capacidad, según sus especificaciones técnicas.

4.2.5. Situaciones de sobre irradiancia e irradiancia extrema año 2023

La figura muestra los resultados obtenidos luego de un proceso de filtrado de datos en el periodo 2023, así mismo se ha realizado un sondeo respecto de las fechas y horas en las cuales se presentaron estos fenómenos de irradiancias elevadas.

Figura 50

Irradiancia extrema e incidencia en el tiempo periodo 2023



Nota: La figura della valores altos de irradiancia y la hora en la que ocurre dicho evento.

En la figura 49 ubicada a la derecha se muestra los valores de irradiancia registrado por un piranómetro instalado en un plano con inclinación de 15° aproximadamente, así mismo este equipo está orientado hacia el norte geográfico se puede indicar que prácticamente tiene la misma orientación e inclinación de los generadores fotovoltaicos instalados en el mismo lugar.

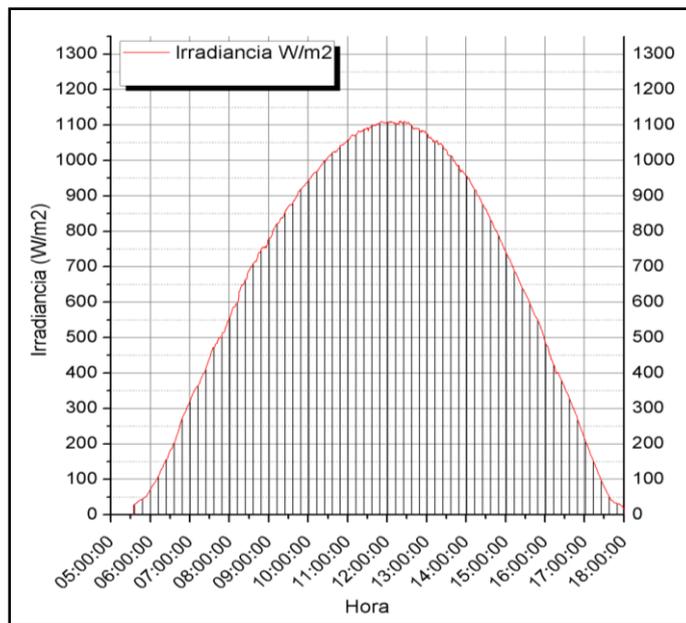
En la figura ubicada en la parte izquierda se muestra la hora y la fecha exacta en las cuales se han presentado estos niveles de sobre irradiancia extrema.

En ambos casos se puede concluir que en temporada lluviosa existe mayor incidencia de este tipo de eventos. Ello se atribuye a la difracción y dispersión de la luz solar en las nubes.

4.2.6. Energía disponible

Figura 51

Energía solar incidente en forma de irradiación



Nota: La figura muestra la respuesta de un inversor FV ante sobre irradiancias

La figura 50 muestra el borde de la curva la misma que representa la irradiación instantánea a lo largo del día (16 enero 2023), si determinamos la integral bajo la curva a partir de la ecuación 11, se obtiene un valor aproximado de 8284.78Wh o en su defecto 8.28kWh, que vendría hacer la energía disponible en el lugar de estudio, bajo situaciones de cielo sin presencia de nubes, todo ello sería la energía acumulada desde las 5:30 am hasta las 18:00 pm.

4.2.7. Determinación de la potencia activa y potencia calculada

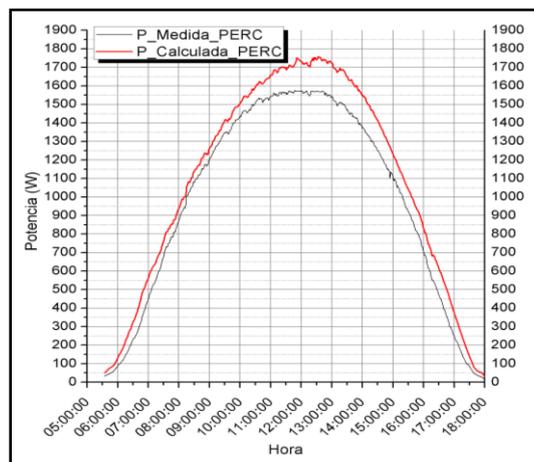
La ecuación 7 permite el cálculo de la potencia activa del generador fotovoltaico, la misma que se relaciona la irradiancia, temperatura de modulo y coeficientes de temperatura, la data procesada considera los siguientes aspectos.

- Fecha: 16 de enero 2023
- Rango de hora: 05:30 am hasta las 18:00 pm
- Numero de datos: 750
- Irradiancia estándar: 1000W/m²

Para el sistema PERC se considera los siguientes parámetros: Coeficiente de temperatura $\gamma_C = -0.37\% / ^\circ\text{C}$, Potencia nominal del generador 1675Wp

Figura 52

Potencia activa real y calculada para el sistema PERC



Nota: La figura muestra la potencia real y la potencia calculada para el sistema PERC.

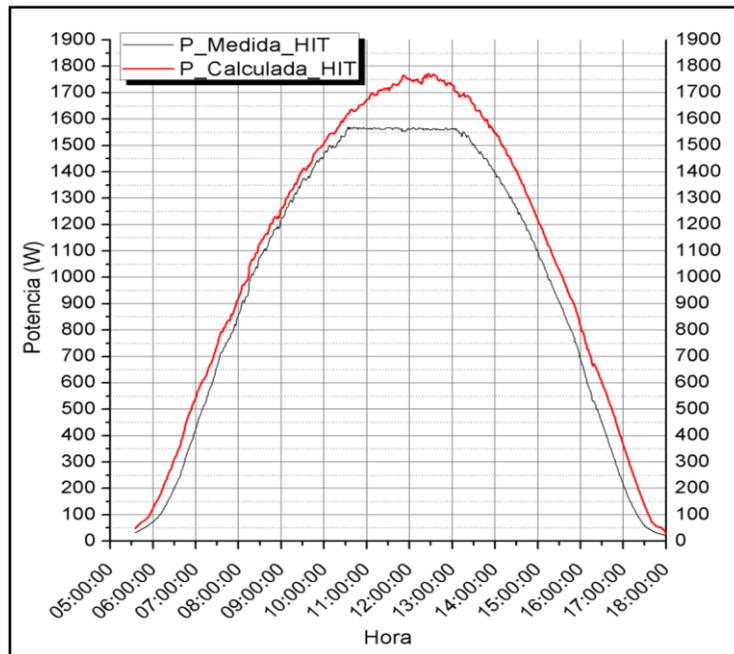
También, es posible determinar la energía incidente en el plano del generador mediante la ecuación de Osterwald y la ecuación 11:

- Energía calculada: 13521.74Wh ó 13.52 kWh
- Energía medida: 12152,48Wh ó 12.152 kWh

Para el sistema fotovoltaico con tecnología HIT se considera los siguientes parámetros: Coeficiente de temperatura $\gamma_C = -0.258\% / ^\circ\text{C}$, Potencia nominal de generador 1650Wp.

Figura 53

Potencia medida y calculada sistema HIT



Nota: La figura muestra la potencia real y la potencia calculada para el sistema HIT.

También, es posible determinar la energía incidente en el plano del generador mediante la ecuación de Osterwald y la ecuación 11:

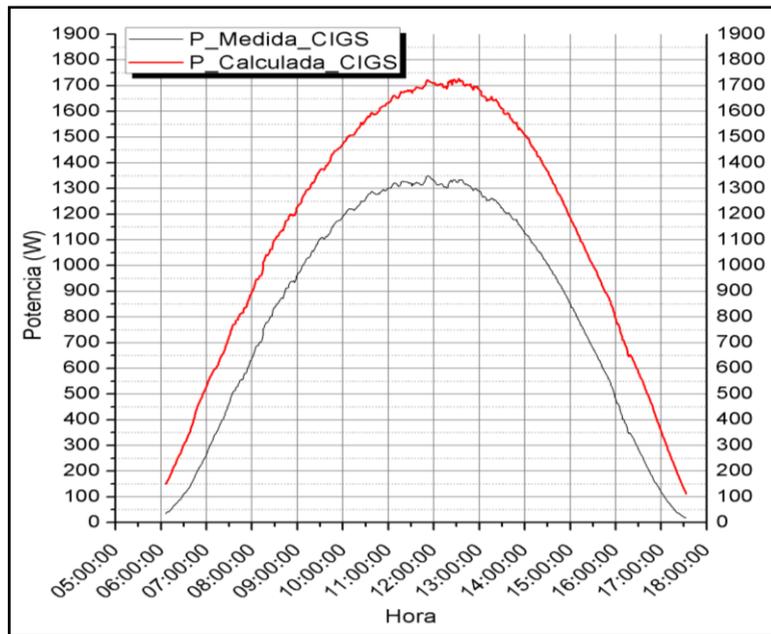
- Energía calculada: 13482.89Wh ó 13.48 kWh
- Energía medida: 12145.61Wh ó 12.145 kWh

La potencia calculada se encuentra por encima de la potencia real medida, ello se atribuye a las pérdidas existentes en el generador fotovoltaico HIT, así también se atribuye a que el modelo presenta una histéresis. (Calsi et al., 2020)

Para el sistema CIGS se considera los siguientes parámetros: Coeficiente de temperatura $\gamma_C = -0.23\% / ^\circ\text{C}$, Potencia nominal de generador 1540Wp.

Figura 54

Potencia medida y calculado sistema CIGS



Nota: La figura muestra la potencia real y la potencia calculada para el sistema CIGS

También, es posible determinar la energía incidente en el plano del generador conformado por los 14 módulos fotovoltaicos CIGS, mediante la ecuación de Osterwald y la ecuación 11:

- Energía calculada: 13071.05Wh ó 13.07kWh
- Energía medida: 9595.2833Wh ó 9.595 kWh



V. CONCLUSIONES

PRIMERA: Se realizó un análisis detallado sobre el comportamiento de temperatura en cada una de las tecnologías en estudio, expuestas a temperatura ambiente bajo las condiciones climáticas de Puno. la tecnología de paneles fotovoltaicos CIGS, presenta un mayor calentamiento seguidamente el sistema PERC y por último el sistema HIT según la figura 39, el cual es un resumen de del análisis realizado, se tiene por ejemplo una temperatura 40°C, 38°C y 33°C para las tecnologías GIS, PERC y HIT respectivamente, se atribuye esta diferencia al tamaño de los paneles, así mismo el material y método de fabricación de los mismos.

SEGUNDA: Se ha identificado irradiancias por encima de los 800W/m², y eventos de sobre irradiancia e inclusive sobre irradiancia extrema con valores por encima de los 1200 y 1350 W/m², rendimiento energético de los generadores asociados a cada tecnología, considerando la irradiancia global registrada, la ficha técnica indica una eficiencia de 14.30%, 19.7% y 19.9% para las tecnologías CIGS, HIT y PERC respectivamente, de manera experimental se ha encontrado que el sistema CIGS se encuentra en un rango de 8.5% hasta 11%, así mismo el sistema HIT se encuentra entre 14% hasta 18.25%, por último, el sistema PERC se encuentra entre 15.5% hasta un 18.5%. posterior mente se ha evaluado el rendimiento global PR, en el cual el sistema CIGS se encuentra entre 58% hasta 74%, PERC entre 68% a 88%, finalmente sistema HIT de 75% hasta un 90%, siendo este último el de mejor adaptación a estas condiciones climáticas propias del altiplano Puneño. .



VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** Principalmente se recomienda evaluar las condiciones de temperatura propios del lugar donde se desea instalar el generador fotovoltaico, así también tomar en consideración el terreno ya que se pudo notar que la presencia de viento contribuye a una ventilación natural de los módulos FV, como se explicó que cuando la temperatura de operación en los módulos FV, es menor aumenta la tensión; este fenómeno puede ser favorable si el sistema se encuentra correctamente dimensionado, y puede ocasionar daños en el inversor si el sistema se ha sobredimensionado.
- SEGUNDA:** Se recomienda tomar en cuenta el factor de dimensionamiento de entre 95% a 100%, ya que como su pudo evidenciar los inversores también sufren de estrés térmico, la eficiencia de los paneles CIGS es de 14% aproximadamente, estando por debajo de los PERC y HIT, con un 19% a 20%, ello obviamente influye en el rendimiento global haciendo que el CIGS sea muy inferior a los demás, sin embargo el inversor asociado a este tiene un buen eficiencia dado que la potencia nominal del generador es 1540Wp y el inversor es de 1500W, los escasos 40W de diferencia hacen que el inversor no tenga que esforzarse demasiado, con respecto al mantenimiento se deberá realizar en horas de poco sol cuando los paneles estén fríos, y evitar en todo momento dañar la superficie externa de los paneles con el uso de escobas u escobillas o trapos que raspen, también es importante el estudio de degradación de cada tecnología, se sugiere un trabajo de investigación que considere ello mínimamente 5 años de operación continua.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agussalim, S. (2023). Analysis of The Impact of Wind and The Environmental Temperature on The Performance of a Rooftop Solar PV System A Case Study of 52,2 kWp PT PLN Research and Development Center Rooftop PV Systems. *Rekayasa Bahan Alam Dan Energi Berkelanjutan*, 07(1), 35–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.21776/ub.rbaet.2023.007.01.06>
- Angulo, J., & Conde, L. (2019). *MODELACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO MEDIANTE UN NUEVO ANÁLISIS BASADO EN EL MÉTODO DE OSTERWALD*.
- Aouadi, C., Abouloifa, A., & Boussairi, Y. (2017). State-Feedback Nonlinear Control of Three-phase Grid Connected to the Photovoltaic System. *IEEE*.
- Azaz, M., Ullah, S., & Ul Islam, J. (2020). Comparative Analysis of PV System Performance in Different Environmental Conditions. *International Journal of Engineering Works*, 7(11), 394–3400. <https://doi.org/10.34259/ijew.20.711394400>
- Benitez, J. M., Larrondo-Petrie, M. M., & Masa-Bote, D. (2019). Análisis del rendimiento de un sistema fotovoltaico conectado a red bajo distintas condiciones ambientales. *Información Tecnológica*, 30(5), 249–258.
- Boulhidja, S., Mellit, A., Voswinckel, S., Lughy, V., Ciocia, A., Spertino, F., & Pavan, A. M. (2020). Experimental evidence of PID effect on CIGS photovoltaic modules. *Energies*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/en13030537>
- Calsi, S., Angulo, A., Conde, M., Muñoz, C., Grieseler, R., Guerra, T., De la Casa, H., & Palomino, T. (2020). Procedimiento del cálculo de la potencia nominal de un generador fotovoltaico. *TECNIA*, 30(1). <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.834>



- Castejon, A., & Santamaria, G. (2015). *Instalaciones-Solares-Fotovoltaicas*.
- Commission, I. E., & International Electrotechnical Commission. Technical Committee 82. (2016). *Photovoltaic system performance-Part 2: Capacity evaluation method*.
www.iec.ch
- Costejon, A., & Santamaria, G. (2010). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas* (2nd ed.).
EDITEX.
- Cotfas, D., Cotfas, P., & Machidon, O. (2018). Study of temperature coefficients for parameters of photovoltaic cells. *International Journal of Photoenergy*, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/5945602>
- De Silva, R., & Sachintha, F. (2022). Effect of Temperature on Solar cell performance in a Sri Lankan context. *So*. <https://doi.org/10.14293/S2199-1006.1.SOR-.PPOSK8U.v1>
- Fredman, Y., & Zemansky, S. (2021). *Fisica Universitaria con Fisica Moderna* (F. R. Rivera (ed.); XII).
- García, C. A., Luna, A., Ramos, A., & Lorenzo, E. (2018). Evaluación del rendimiento de un sistema fotovoltaico conectado a red en una región con condiciones climáticas extremas. *Revista Iberoamericana de Tecnología En Educación*, 1(1), 23–34.
- García, J. M., López, A. P., & Martínez, R. F. (2018). Determination of the sizing factor for grid-connected photovoltaic systems using a data-driven approach. *Renewable Energy*, 115, 128–138.
- Hashim, S., & Hassan, R. (2022). Impact of high temperature on PV productivity in hot desert climates. *Green Technology, Resilience, and Sustainability*, 2(1).



<https://doi.org/10.1007/s44173-022-00009-9>

Irwanto, M., Nugraha, Y., Hussin, N., & Nisja, I. (2023). EFFECT OF TEMPERATURE AND SOLAR IRRADIANCE ON THE PERFORMANCE OF 50 HZ PHOTOVOLTAIC WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM. *Jurnal Teknologi*, 85(2), 53–67. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v85.18872>

Jiang, Y., Zhuang, H., Sun, G., & Huang, H. (2021). Power Generation Simulation and Comparison of p-PERC and HIT Bifacial Modules. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 696(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/696/1/012038>

Kadia, N., Hashim, E., & Abdullah, O. (2022). PERFORMANCE OF DIFFERENT PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES FOR AMORPHOUS SILICON (A-SI) AND COPPER INDIUM GALLIUM DISELENIDE (CIGS) PHOTOVOLTAIC MODULES. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 26(1), 95–105. <https://doi.org/10.31272/jeasd.26.1.10>

Lamigueiro, O. P. (2020). *Energía Solar Fotovoltaica*. creative commons. <https://github.com/oscarperpinan/esf>

Luboń, W., Pełka, G., Marszałek, K., & Małek, A. (2017). Performance Analysis of Crystalline Silicon and CIGS Photovoltaic Modules in Outdoor Measurement. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 24(4), 539–549. <https://doi.org/10.1515/eces-2017-0035>

Macêdo, W. N. (2006). *Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede*.

Martínez, C., García, J., & Guzmán, X. (2019). Estudio del factor de dimensionamiento



- para sistemas fotovoltaicos conectados a red en áreas de alta irradiación solar. *Revista de Investigación En Energía*, 7(3), 187–198.
- Mendoza, A., López, C., & Aracil, J. (2018). Estudio de la eficiencia de inversores fotovoltaicos en sistemas conectados a red en zonas de gran altitud. *Revista de Energías Alternativas*, 15(2), 103–114.
- Pascual, J., Suárez, A., & Ramos, S. (2021). Influencia del factor de dimensionamiento en la eficiencia de sistemas fotovoltaicos conectados a red. *Energías Renovables y Sostenibilidad*, 8(1), 45–58.
- Ramesh, S., Tuomiranta, A., Hajjiah, A., Meuris, M., Vermang, B., & Poortmans, J. (2022). Physics-based electrical modelling of CIGS thin-film photovoltaic modules for system-level energy yield simulations. *Npj Flexible Electronics*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00220-5>
- Ramon, V., Alves, M., & Carneiro, K. (2015). *Analysis of Power Quality for Photovoltaic Systems Connected to the Grid*.
- Saleh, A., Faridun, M., Tajuddin, N., Padmabaran, S., Mihet, L., Adzman, M., & Ramli, M. (2018). *Evaluating the Impacts of Ground and Atmospheric Conditions on the Efficiency of Solar Energy System and Its Economic Analysis*. <https://doi.org/10.20944/preprints201806.0324.v1>
- Villalva, M. G. (2015). *Energia-Solar-Fotovoltaica*.
- Wang, H., Qin, Z., Miao, Y., & Zhao, Y. (2022). Recent Progress in Large-Area Perovskite Photovoltaic Modules. In *Transactions of Tianjin University*. Tianjin University. <https://doi.org/10.1007/s12209-022-00341-y>



Zamalloa, M. A., Berg, H., Conde, L., Sevillano, B., Carhuavilca, A., Grieseler, R., &

Tofflinger, J. (2021). Extreme Overirradiance events and their spectral distribution

in Lima, Peru. *Journal of Physics: Conference Series*, 1841(1).

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1841/1/012006>

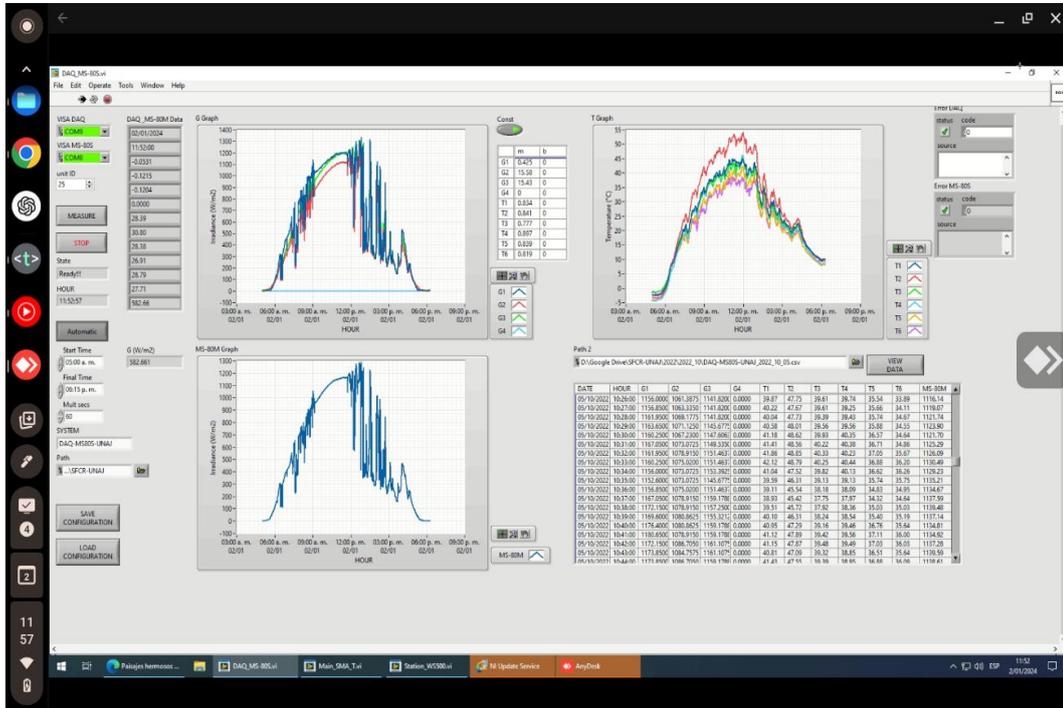
Zilles, R., Wilson, N., Barros Galhardo, M. A., & Henrique Ferreira de Oliveira, S.

(2021). *SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE ELECTRICA* (2nd

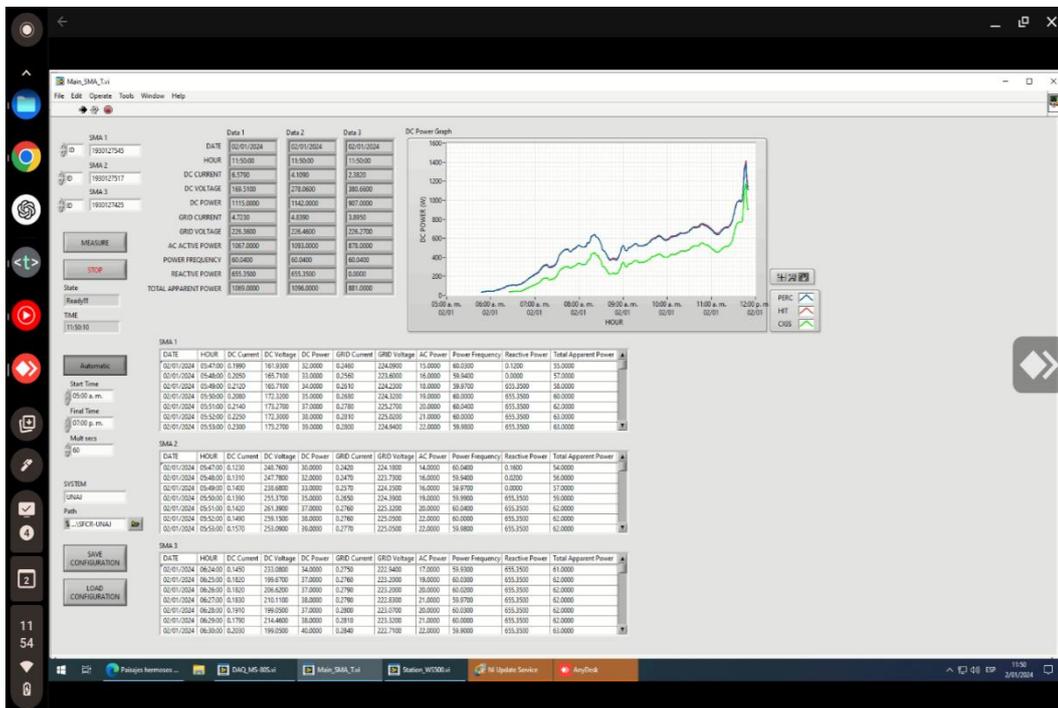
ed.).

ANEXOS

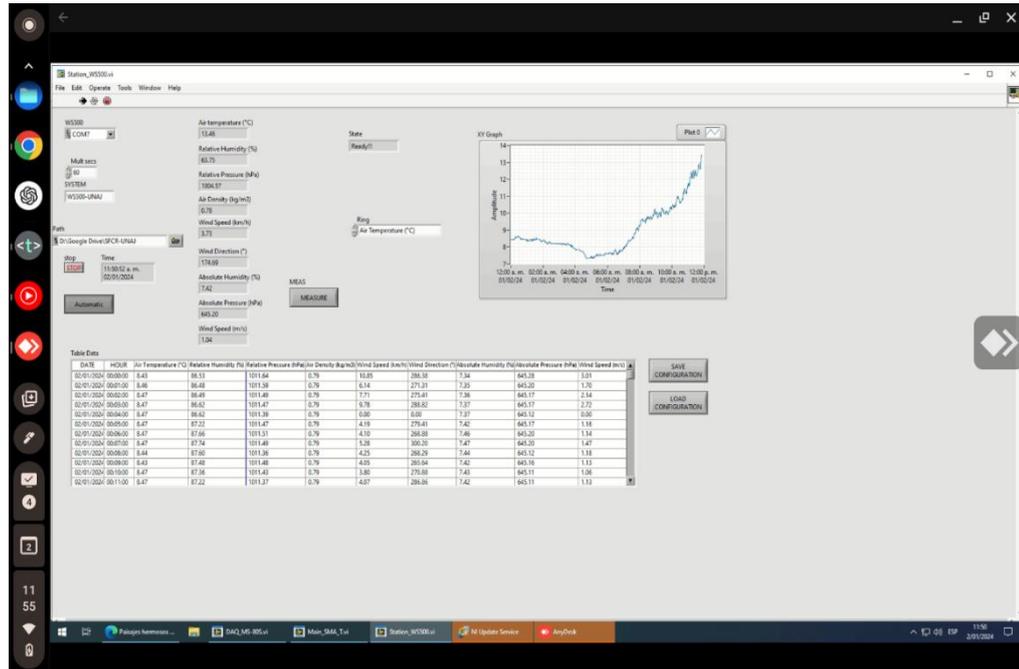
ANEXO 1. Monitoreo del sistema fotovoltaicos (Irradiancia y temperaturas)



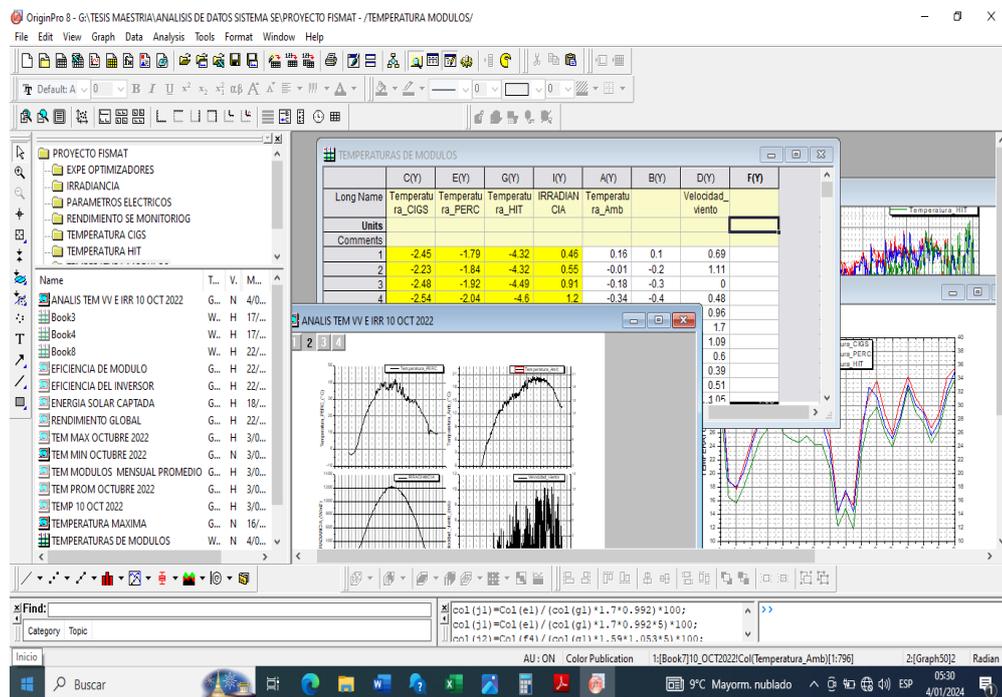
ANEXO 2. Monitoreo del sistema fotovoltaicos (Parámetros eléctricos)



ANEXO 4. Monitoreo del sistema fotovoltaicos (Parámetros meteorológicos)



ANEXO 3. Generación de gráficos e interpolación en programa Origin



ANEXO 5. Álbum fotográfico

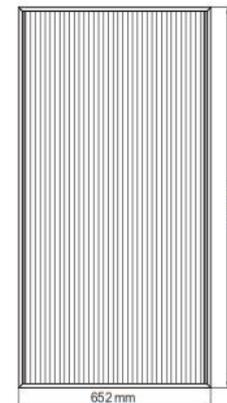
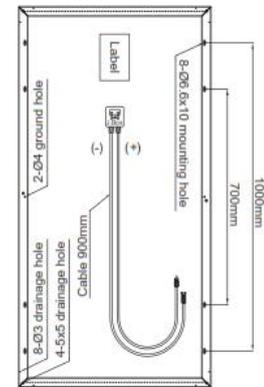
Montaje e instalación de estructuras	Instalación de estructuras
	
Envío de estación meteorológica	Limpieza de sistemas FV
	
Tablero de monitoreo DAQ	Tablero distribución AC
	

ANEXO 6. Ficha técnica del módulo FV CIGS-CdF-1150A1 ETERGRIGHT.

Mechanical Specification

Dimensions	1234mm x 652mm x 35mm (48.6 inches x 25.7 inches x 1.38 inches)
Weight	12.9 kg (28.44lbs)
Cell type	CIGS thin film
Front cover	3.2mm tempered glass with ARC
Cell substrates	1.8mm ultra-thin soda lime glass
Back cover	Al back sheet
Encapsulant	EVA
Frame	Anodized Al frame (black) with L-Key mounting
Junction Box	IP67 rated with bypass diode
Connectors	MC4 compatible
Cable length	900mm (35.4 inches)

Module Drawing



Electrical Specification

Power performance at STC (STC: 1000W/m², 25°C/77°F, AM 1.5)*

Module Models	CdF-	1000A1	1050A1	1100A1	1150A1	1200A1
Nominal power	P _{MPP} [W]	100	105	110	115	120
Power tolerance	[W]	0~+5	0~+5	0~+5	0~+5	0~+5
Open circuit voltage	V _{OC} [V]	75.2	75.3	75.4	75.5	75.6
Short circuit current	I _{SC} [A]	2.16	2.18	2.20	2.21	2.23
Voltage at P _{MPP}	V _{MPP} [V]	54.7	55.6	56.5	57.4	58.3
Current at P _{MPP}	I _{MPP} [A]	1.82	1.88	1.94	2.00	2.05
Module efficiency	[%]	≥ 12.4	≥ 13.1	≥ 13.7	≥ 14.3	≥ 14.9

Power performance at NOCT (NOCT: 800W/m², 20°C/68°F, AM1.5)*

Module Models	CdF-	1000A1	1050A1	1100A1	1150A1	1200A1
Nominal power	P _{MPP} [W]	77.1	81.0	84.9	88.7	95.2
Open circuit voltage	V _{OC} [V]	72.3	72.5	72.6	72.6	72.7
Short circuit current	I _{SC} [A]	1.73	1.75	1.76	1.77	1.79
Voltage at P _{max}	V _{MPP} [V]	51.7	52.8	54.0	55.2	56.4
Current at P _{max}	I _{MPP} [A]	1.49	1.53	1.57	1.60	1.68

*All STC characteristics are measured after pre-treatment of 43kWh/m² light soaking.
Measurement uncertainty: (P_{MPP}: +5%/-3% ; I_{SC}, V_{OC}, I_{MPP}, V_{MPP}: ±10%)

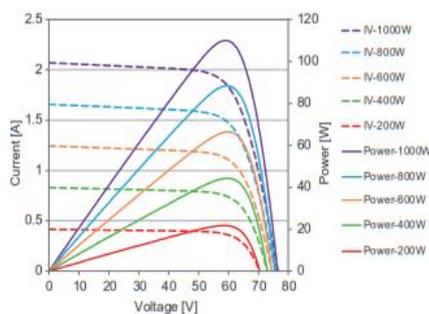
Temperature coefficients

NOCT	TC I _{SC} (α)	TC V _{OC} (β)	TC P _{MPP} (δ)
46°C	+0.01%/°C	-0.31%/°C	-0.23%/°C

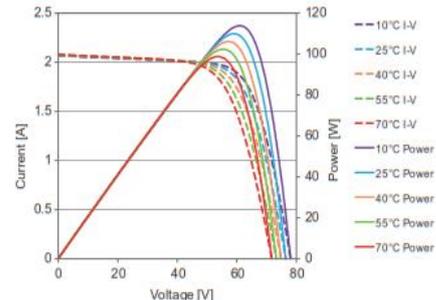
Properties for solar system construction design

Max. system voltage (V _{sys})	Max. series overcurrent protective devices	Mechanical load	Safety class	Fire rating	Operating temperature
1000V	5A	2400Pa	II	Class C(IEC)	-40 ~ 85°C

I-V curves at various irradiation



I-V curves at various temperature



*This datasheet is for informational purposes only. No rights can be derived from the information contained herein.

ANEXO 7. Ficha técnica del módulo HIT. VBHN330SJ53 PANASONIC

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Model	VBHN330SJ53	VBHN325SJ53
Maximum Power (Pmax) ¹	330W	325W
Maximum Power Voltage (Vpm)	58.0V	57.6V
Maximum Power Current (Ipm)	5.70A	5.65A
Open Circuit Voltage (Voc)	69.7V	69.6V
Short Circuit Current (Isc)	6.07A	6.03A
Max. Power at NOCT (Normal Operating Conditions)	251.9W	249.3W
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.258%/°C	-0.258%/°C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.164V/°C	-0.164V/°C
Temperature Coefficient (Isc)	3.34mA/°C	3.34mA/°C
NOCT	44.0°C	44.0°C
Module Efficiency	19.7%	19.4%
Maximum System Voltage	1000V	1000V
Series Fuse Rating	15A	15A
Power Tolerance (-/+)	+10%/ 0%*	+10%/ 0%*

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Model	VBHN330SJ53, VBHN325SJ53
Internal Bypass Diodes	4 Bypass Diodes
Module Area	1.67m ²
Weight	19kg
Dimensions LxWxH	1590mm x 1053mm x 40 mm
Cable Length +Male/-Female	1020mm/1020 mm
Cable Size / Type	No. 12 AWG / PV Cable
Connector Type	SMK
Static Wind / Snow Load	5400 Pa
Pallet Dimensions LxWxH	1618mm x 1071mm x 2356mm (double stack)
Quantity per Pallet / Pallet Weight	48 pcs. (2x24 pcs.) (960 kg)
Quantity per 40' Container	672 pcs.

OPERATING CONDITIONS & SAFETY RATINGS

Model	VBHN330SJ53, VBHN325SJ53
Operating Temperature	-40°C to 85°C
Safety & Rating Certifications	IEC61215, IEC61730-1, IEC1730-2
Fire Classification	Class Uno (TÜV Rheinland)
Limited Guarantee	25" years workmanship and power output (linear)"**

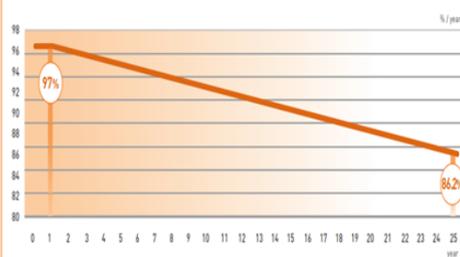
NOTE: Standard Test Conditions: Air mass 1.5; irradiance = 1000W/m²; cell temp. 25°C
 * Maximum power at delivery. For guarantee conditions, please check our guarantee document.
 ** Registration necessary on www.eu-solar.panasonic.net, otherwise 15 years apply based on guarantee document.

*** 1st year 97 %, from 2nd year -0.45 %/year, in 25th year 86.2%.

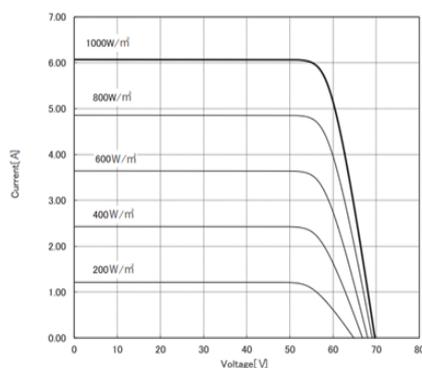
¹ STC: Cell temp. 25°C, AM1.5, 1000W/m²

NOTE: Specifications and information above may change without notice.

LINEAR PERFORMANCE GUARANTEE

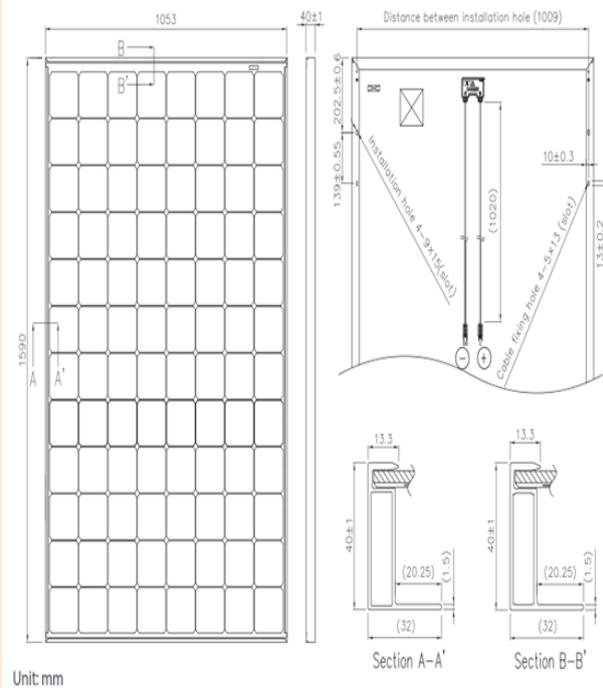


DEPENDENCE ON IRRADIANCE



Reference data for model:
VBHN330SJ53
(Cell temperature: 25°C)

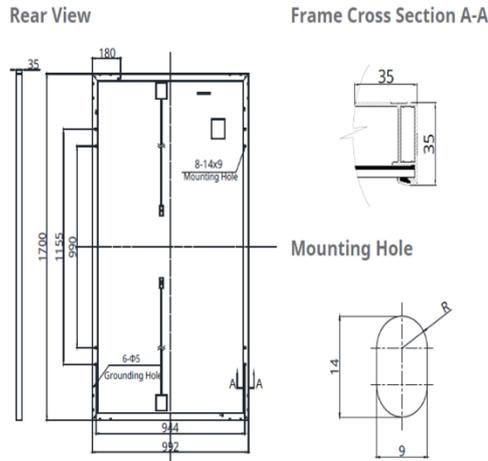
DIMENSIONS



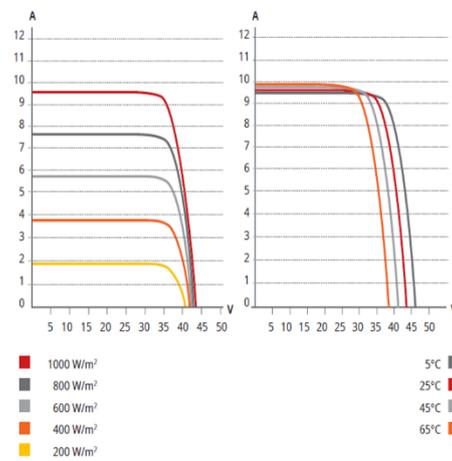
Unit: mm

ANEXO 8. Ficha técnica del módulo FV PERC. N/330

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS1H-330MS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS1H	320MS	325MS	330MS	335MS	340MS	345MS
Nominal Max. Power (Pmax)	320 W	325 W	330 W	335 W	340 W	345 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	36.2 V	36.6 V	37.0 V	37.4 V	37.8 V	38.2 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.85 A	8.88 A	8.92 A	8.96 A	9.00 A	9.04 A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.0 V	44.1 V	44.2 V	44.3 V	44.5 V	44.6 V
Short Circuit Current (Isc)	9.60 A	9.64 A	9.68 A	9.72 A	9.76 A	9.80 A
Module Efficiency	19.0%	19.3%	19.6%	19.9%	20.2%	20.5%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					
Max. System Voltage	1500V (IEC) or 1000V (IEC/UL)					
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)					
Max. Series Fuse Rating	16 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.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Dimensions	1700 × 992 × 35 mm (66.9 × 39.1 × 1.38 in)
Weight	19.2 kg (42.3 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4.0 mm² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	1350 mm (53.1 in)
Connector	T4 series or H4 UTX or MC4-EVO2
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	780 pieces

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS1H	320MS	325MS	330MS	335MS	340MS	345MS
Nominal Max. Power (Pmax)	237 W	241 W	244 W	248 W	252 W	255 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	33.5 V	33.9 V	34.2 V	34.6 V	35.0 V	35.3 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.07 A	7.11 A	7.14 A	7.17 A	7.20 A	7.23 A
Open Circuit Voltage (Voc)	41.1 V	41.2 V	41.3 V	41.4 V	41.6 V	41.7 V
Short Circuit Current (Isc)	7.75 A	7.78 A	7.81 A	7.85 A	7.88 A	7.91 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.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.37 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	43±3 °C

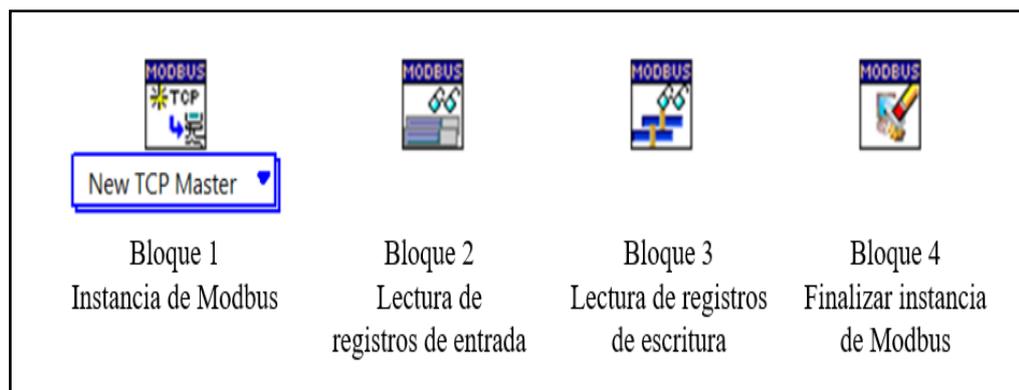
ANEXO 9. LabView características de programación utilizada

LabVIEW es un entorno de desarrollo en el que se utiliza bloques para programar. Te permite crear desde sencillos programas hasta complejas interfaces para una amplia gama de aplicaciones. Con LabVIEW, puedes interactuar con el mundo real a través de instrumentos, sensores y controladores.

BLOQUES UTILIZADOS EN LABVIEW

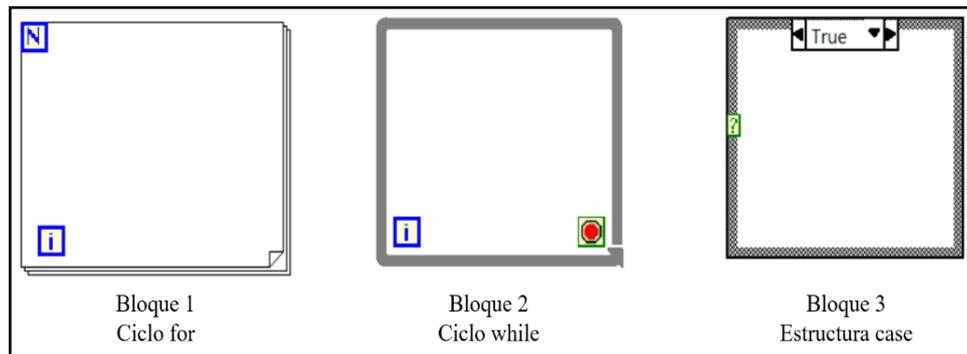
Bloque de lectura de Modbus, son los bloques que permiten establecer la comunicación mediante el puerto COM, y adquirir los datos de las direcciones establecidas en el dispositivo esclavo.

Figura1: Bloques para la comunicación Modbus



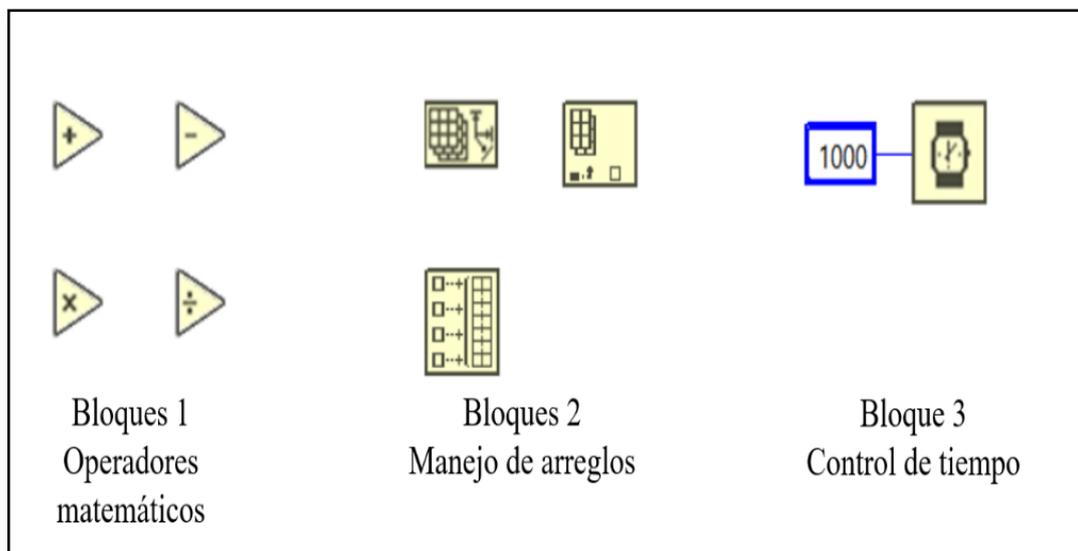
Bloques de estructuras de decisión y ciclos, desempeñan un papel crucial en el desarrollo de programas, abarcando desde los niveles mas elementales hasta los más sofisticados y complejos, en los cuales tenemos el ciclo while, ciclo for, estructura case.

Figura 2: Bloques de estructura cíclica y de decisión



Los bloques de operaciones matemáticas son indispensables en una amplia gama de programas, así como también lo son los bloques de arreglos o matrices, ya que facilitan el manejo eficiente de la información. Además, el bloque de control de tiempo posibilita la espera de una cantidad específica de tiempo antes de volver a ejecutar el bucle, lo cual resulta fundamental para optimizar el flujo de ejecución del programa.

Figura 3: Bloques de operación matemática, manejo de arreglos o matrices, control de tiempo.

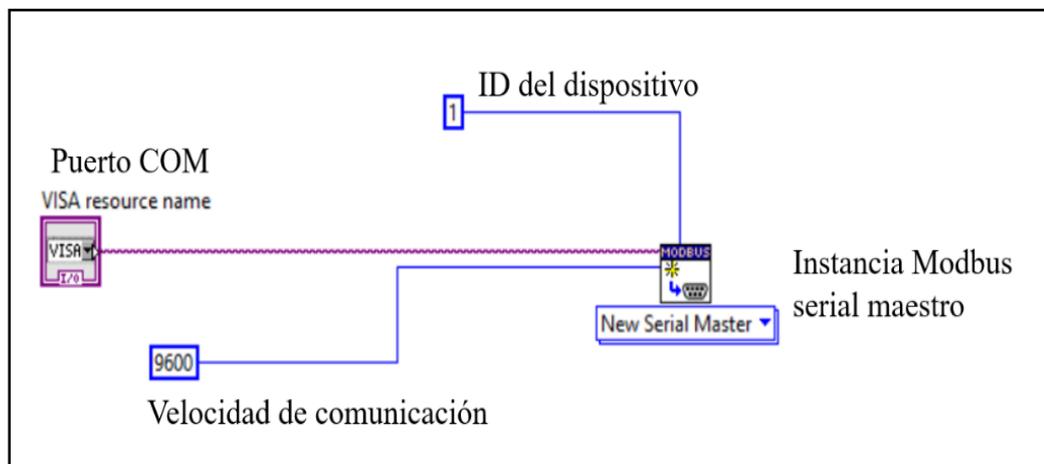


PROCESO REGISTRO DE DATOS

Establecer comunicación

Para establecer la comunicación con los dispositivos se debe utilizar el bloque de instancia en donde se le indica por cual puerto recibirá datos, la velocidad de comunicación en baudios, y el ID del dispositivo, el ID es la dirección de identificación que indica a que dispositivo se esta comunicando, cada dispositivo tiene un ID único.

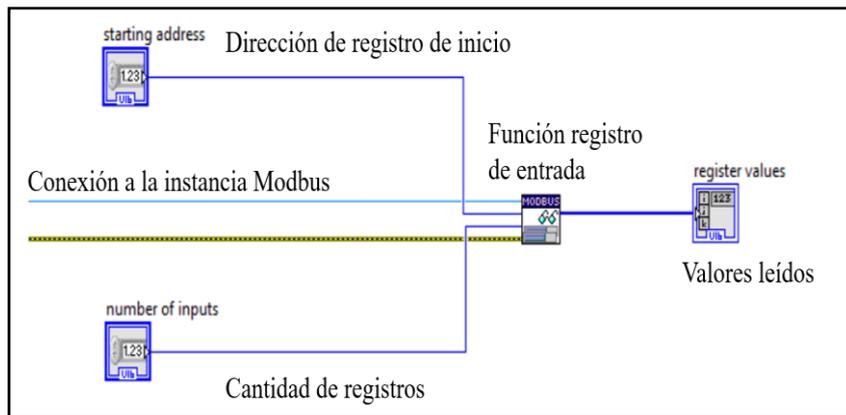
Figura 4: Instancia Modbus para establecer comunicación con los dispositivos



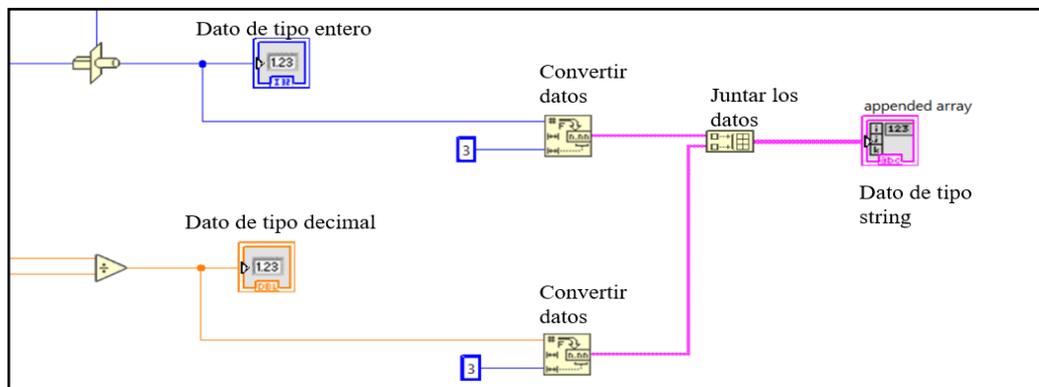
Lectura de datos

El protocolo Modbus tiene ya definido funciones estándar, que pueden ser de escritura o lectura. En LabVIEW se tiene un bloque para cada función de Modbus en el cual para leer los datos se usa el bloque de función de registro de entrada, donde principalmente se tiene que indicar la dirección de registro de inicio, esta dirección contiene la información que se requiere leer, y luego el bloque de función muestra los valores leídos.

Figura 5: Bloque de función de registro de datos

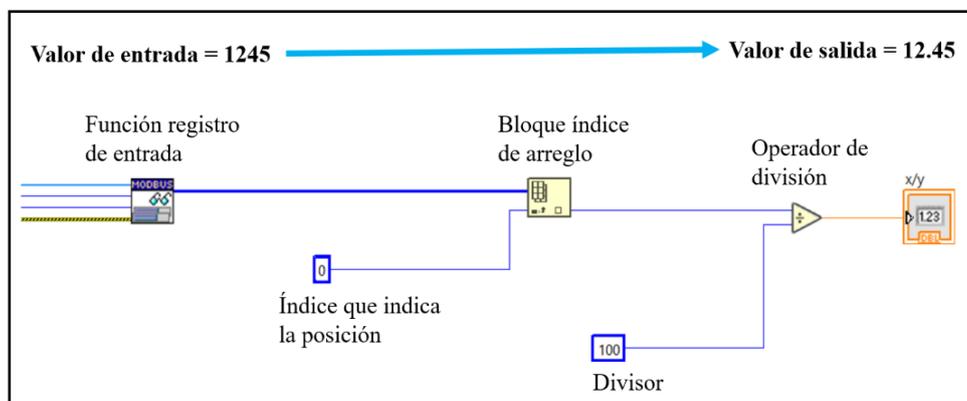


Procesamiento de datos



Los datos en Modbus se presentan en diversos formatos, por lo que su correcta representación es crucial. Un caso particular es cuando el valor entero y decimal se encuentran juntos. En este escenario, se requiere realizar una división por un factor adecuado, como 10, 100, 1000 o según la cantidad de decimales presentes.

Figura 6: Operación aritmética para obtener valores en decimales.



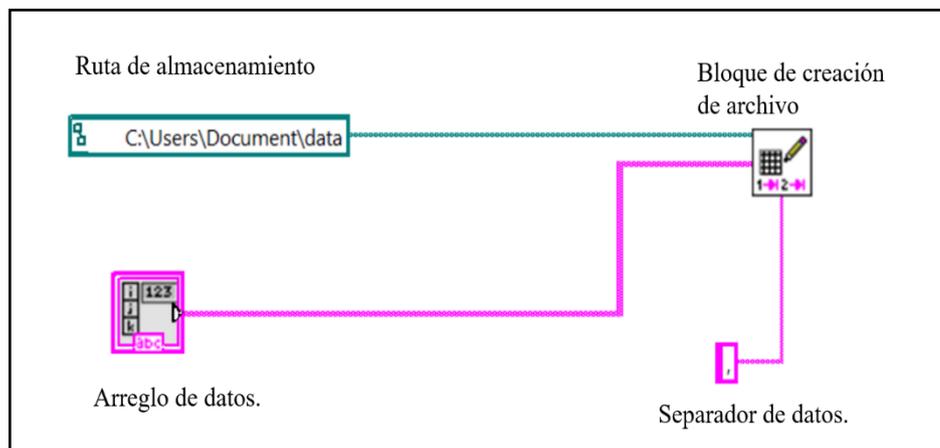
Otro caso es cuando el valor se encuentra separado en bytes altos y bytes bajos representados en formato decimal, para ello es necesario realizar una conversión.

Figura 7: Bloques especiales para transformar datos.

Agrupación de datos

Los datos pueden ser de distintos tipos, puesto que LabVIEW maneja varios formatos de datos, y se debe estandarizar a un tipo de dato que es mas manejable para almacenar, la mejor opción es convertir todos los datos a formato string.

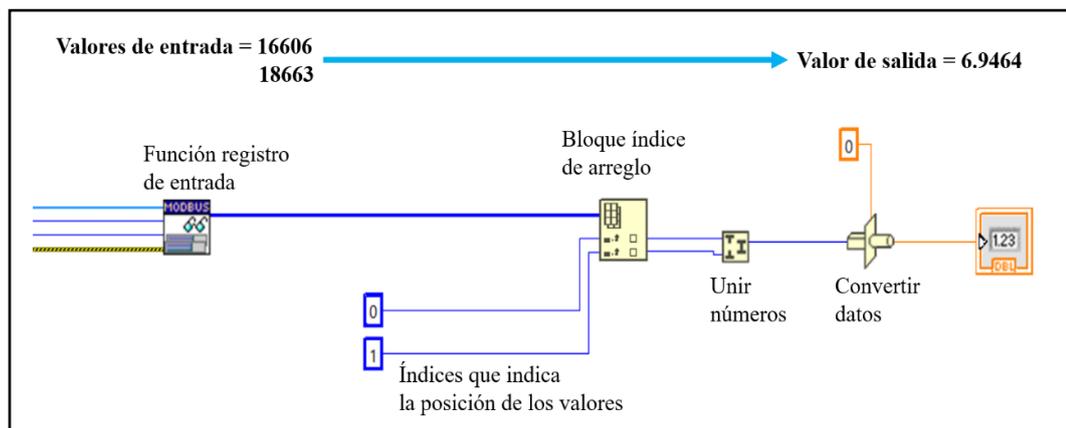
Figura 8: Convertir los distintos tipos de datos a formato string o cadena de texto.



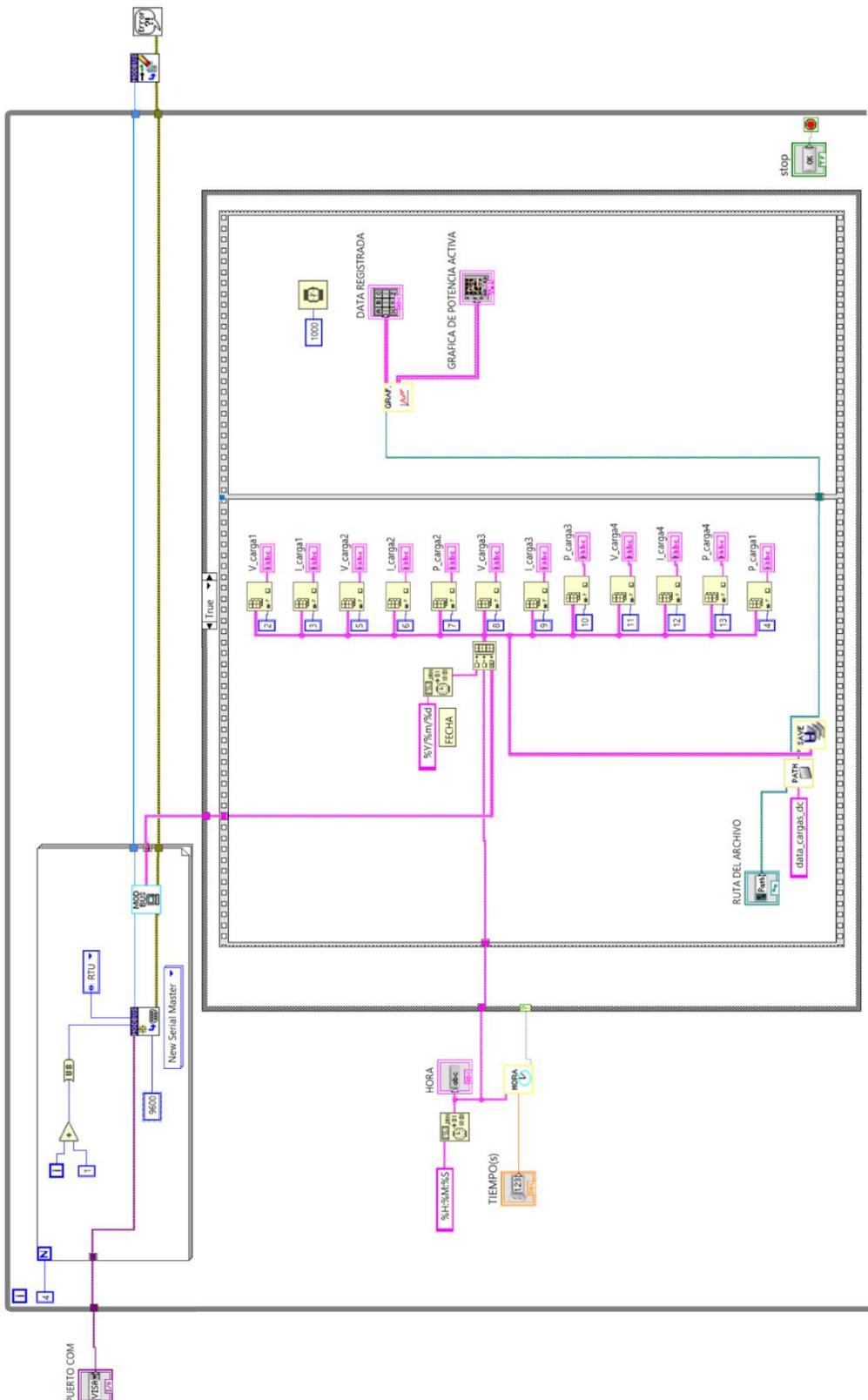
Exportación de datos

Cuando ya se tiene los datos con el debido formato, se utiliza el bloque Write Spreadsheet para crear un archivo o adjuntar los datos a un archivo ya creado.

Figura 9: Creación de archivo o escritura de archivo para almacenar data



Con los conceptos mencionados anteriormente se realiza la programación con bloques como se muestra en la Figura ... en donde para iniciar la comunicación con los dispositivos, se emplea un bloque de instancia que especifica el puerto COM, la velocidad de transmisión en baudios y el identificador único del dispositivo. Mediante el software de LabVIEW, el protocolo Modbus hace uso de funciones estándar para operaciones de lectura, donde la lectura se lleva a cabo mediante un bloque de función de registro de entrada que requiere la dirección de inicio del registro. Luego se debe manipular los datos porque cada dispositivo tiene su manera de enviar la información, un caso es cuando el dispositivo solo puede enviar valores enteros y para determinar los decimales es necesario realizar la división por un factor apropiado. Luego los datos se agrupan en un formato manejable, preferiblemente en forma de cadena, antes de ser guardados, seguidamente utilizando los bloques especiales se guarda los datos en un archivo con extensión “.csv”, si no hay un archivo entonces se crea uno nuevo, pero si ya hay un archivo creado entonces se agrega los datos al fichero existente. Todo este proceso debe repetirse dentro de un bucle para almacenar datos de manera periódica





ANEXO 10. Constancia de la PUCP

Grupo de Ciencia de Materiales y Energías Renovables
Sección de Física
Departamento Académico de Ciencias



Dr. Jan Amaru Palomino Töfflinger

Lima, 21 de Agosto de 2024

A quien corresponda

Asunto: CONSTANCIA

Quien suscribe, Investigador Principal y Profesor Asociado de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), hace constar que el Sr. Pedro Yulian Puma Roque, con D.N.I. 42767244, perteneció al grupo de investigación de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ) en el proyecto con numero de Contrato N° 013-2020-FONDECYT-BM, titulado "*Evaluación del rendimiento energético-técnico-económico de tecnologías fotovoltaicas emergentes y su degradación en distintas zonas climáticas del Perú: aplicación de modelos de Inteligencia Artificial e implementación de una plataforma pública en línea para el acceso de datos*". Ganador de la convocatoria "Proyectos Integrales (E063-2020-01-BM)" auspiciada por PROCENCIA, antes el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de innovación tecnológica – FONDECYT, y el Banco Mundial - BM.

Este proyecto fué liderado por la Pontificia Universidad Católica del Perú; por el Investigador Principal Dr. Jan Amaru Palomino Töfflinger, en el mismo participa la UNAJ como entidad asociada. Dicho proyecto tuvo un periodo de ejecución de 18 meses iniciando en enero del año 2021, fué financiado por un importe monetario total de "1'200,000.00 PEN". Como entidades asociadas peruanas participaron en el proyecto la Universidad Nacional de Ingeniería, la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna, la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, la Universidad Nacional de Juliaca y la Universidad de Jaén (España). El equipo del proyecto estuvo formado por un total de 11 investigadores.

Se extiende la presente constancia, a solicitud del interesado, para los fines que estime conveniente.


Digitally signed
by Jan Amaru
Palomino
Töfflinger
Date: 2024.08.21
21:00:09 -05'00'

Dr. Jan Amaru Palomino Töfflinger
Profesor Asociado
Sección de Física, Departamento Académico de Ciencias
Email: japalominot@pucp.edu.pe



ANEXO 11. Declaración Jurada de Autenticidad de Tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo PEDRO JULIÁN PUNO ROQUE
identificado con DNI 42767244 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
"IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MENSUAL DE TRES GENERADORES FOTOVOLTAICOS
CON TECNOLOGÍAS PERC, HIT Y CIGS, EN CONDICIONES DE IRRADIACIÓN SOLAR
Y TEMPERATURA AMBIENTE PROPIOS DE LA REGIÓN PUNO"

Es un tema original.

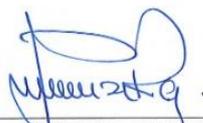
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 16 de SEPTIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



ANEXO 12. Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo PEDRO JULIÁN PUNTO ROSQUE identificado con DNI 42767244 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MENSUAL DE TRES GENERADORES FOTOVOLTAICOS CON TECNOLOGÍAS PERC, HIT Y CIGS, EN CONDICIONES DE IRRADIACIÓN SOLAR Y TEMPERATURA AMBIENTE PROPIAS DE LA REGIÓN PUNO"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 16 de SEPTIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella