



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN
ENERGÍAS RENOVABLES



"MEDICION Y MONITOREO DE EVENTOS EXTREMOS DE
IRRADIANCIA SOLAR A TRAVÉS DE UN MODULO
FOTOVOLTAICO Y UN MICROCONTROLADOR ANALIZADO EN
LAS CONDICIONES GEOGRÁFICAS Y CLIMATOLÓGICAS EN LAS
CIUDADES DE PUNO Y JULIACA"

AUTOR:

Bach. Wilber Romario Quispe Coaquira

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

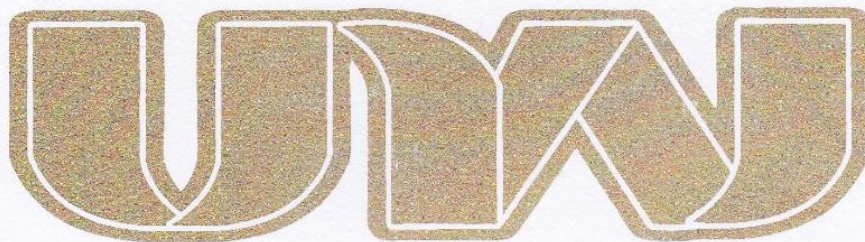
ASESOR: M.Sc. Reynaldo Condori Yucra



JULIACA - 2021



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN
ENERGÍAS RENOVABLES**



**“MEDICIÓN Y MONITOREO DE EVENTOS EXTREMOS DE
IRRADIANCIA SOLAR A TRAVÉS DE UN MODULO
FOTOVOLTAICO Y UN MICROCONTROLADOR ANALIZADO EN
LAS CONDICIONES GEOGRÁFICAS Y CLIMATOLÓGICAS EN LAS
CIUDADES DE PUNO Y JULIACA”**

AUTOR:

Bach. Wilber Romario Quispe Coaquira

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

ASESOR: M.Sc. Reynaldo Condori Yucra



JULIACA - 2021

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES



**“MEDICIÓN Y MONITOREO DE EVENTOS EXTREMOS DE
IRRADIANCIA SOLAR A TRAVÉS DE UN MÓDULO
FOTOVOLTAICO Y UN MICROCONTROLADOR ANALIZADO EN
LAS CONDICIONES GEOGRÁFICAS Y CLIMATOLÓGICAS EN LAS
CIUDADES DE PUNO Y JULIACA”**

Autor:

Bach. Wilber Romario Quispe Coaquira

Tesis para optar el título de:

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Asesor:

M.Sc. Reynaldo Condori Yucra

Juliaca – 2021

Quispe, W. (2021). *Medición y monitoreo de eventos extremos de irradiancia solar a través de un módulo fotovoltaico y un microcontrolador analizado en las condiciones geográficas y climatológicas en las ciudades de Puno y Juliaca*. (Tesis de Ingeniería). Universidad Nacional de Juliaca. Juliaca.

AUTOR: Wilber Romario Quispe Coaquira

TÍTULO: Medición y monitoreo de eventos extremos de irradiancia solar a través de un módulo fotovoltaico y un microcontrolador analizado en las condiciones geográficas y climatológicas en las ciudades de Puno y Juliaca.

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2021

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (106 pp)

NOTA: Tesis de la Escuela profesional de Ingeniería en Energías Renovables — Universidad Nacional de Juliaca.

CÓDIGO: 02-00005-02/Q8

NOTA: Incluye bibliografía.

ASESOR: M.Sc. Reynaldo Condori Yucra

PALABRAS CLAVE:

Plataforma sensorial, Irradiancia solar, eventos extremos, IOT.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**“MEDICIÓN Y MONITOREO DE EVENTOS EXTREMOS DE IRRADIANCIA
SOLAR A TRAVÉS DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO Y UN
MICROCONTROLADOR ANALIZADO EN LAS CONDICIONES GEOGRÁFICAS Y
CLIMATOLÓGICAS EN LAS CIUDADES DE PUNO Y JULIACA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Presentada por:

Bach. Wilber Romario Quispe Coaquira

Sustentada y Aprobada ante el siguiente Jurado:

Dr. Henry Pizarro Viveros

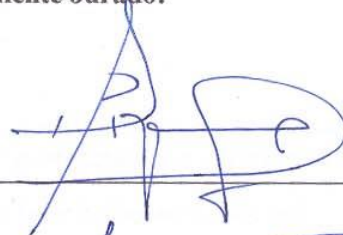
PRESIDENTE DE JURADO

M.Sc. Julio Fredy Chura Acero

JURADO (Secretario)

M.Sc. Jhon Eduardo Abarca Suca

JURADO (Vocal)



2° MIEMBRO



3° MIEMBRO



ASESOR DE TESIS

M.Sc. Reynaldo Condori Yucra

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis primeramente a Dios por su inmenso amor y por su infinita misericordia, por haberme permitido llegar hasta aquí hoy, por darme fuerza y salud para llevar a cabo mis metas y objetivos y permitirme ser cada día más humanos y sobre todo más humilde. A mis padres Juan y Juana, por su amor, trabajo y sacrificio en todo este tiempo. A mis hermanas Vanesa y Deysi por ser motivo de mi superación cada día y para esas personas que depositaron su confianza y no dudaron en mí, que a pesar de las circunstancias y dificultades nunca desconfiaron en mí y me motivaron y contribuyeron incondicionalmente a salir adelante.

AGRADECIMIENTO

Gracias a la vicepresidencia de investigación de la Universidad Nacional de Juliaca por el soporte financiero mediante fondos de Canon-UNAJ a través del II concurso de proyectos de tesis para la obtención del título profesional 2019, mediante el contrato N° 01-2019-VPI CO.UNAJ y resolución presidencial N° 315-2019-P-CO-UNAJ. N° 180-2019-UNAJ, para realizar este trabajo y su interés en el desarrollo de la investigación a través de estos concursos.

Al grupo de investigación GRIDSOLAR EPIER-UNAJ y al Grupo de Estudios y Desarrollo de Alternativas Energéticas (GEDAE) – UFPA- BRASIL, por el esfuerzo y dedicación que hicieron para que este proyecto sea una realidad.

Al Magister Reynaldo Condori Yucra por asesorarme y apoyarme en este proceso de elaboración de mi tesis.

Al Doctor Norman Beltrán Castañón.

Al Doctor Wilson Negrão Macêdo por inspirarme en este trabajo y desarrollarlo.

Al Ingeniero Alex Pacoricona Apaza por su colaboración y apoyo en este trabajo de investigación.

También quiero agradecer a una persona muy especial que me ayudo y me enseñó que después del atardecer viene el amanecer, que pase lo que pase todo estará bien, que un abrazo puede cambiarlo todo, gracias por todo esos momentos.

Finalmente quiero agradecer a la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables de la Universidad Nacional de Juliaca, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente, a todos mis docentes por proporcionarme conocimiento en mi desarrollo profesional durante estos años y compañeros de la segunda promoción.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Descripción del Problema	1
1.2 Formulación del problema	2
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problema específico.....	2
1.3 Objetivos de la investigación	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivo específico	2
1.4 Justificación de la investigación	3
1.4.1 Justificación técnica.....	3
1.4.2 Justificación económica.....	3
1.4.3 Justificación social.....	3
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Antecedentes de la investigación	4
2.1.1 Antecedentes internacionales	4
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	6
2.1.3 Antecedentes regionales	6
2.2 La Energía.....	7
2.3 Energías Renovables	7
2.4 Energía solar	2

2.4.1	El Sol	3
2.4.2	Energía Solar Fotovoltaica	3
2.4.3	Energía Solar Térmica	12
2.5	Radiación solar	13
2.5.1	Radiometría y fotometría.....	13
2.5.2	Distribución Espectral de la radiación solar	15
2.5.3	Radiación ultravioleta.....	16
2.5.4	Radiación visible	16
2.5.5	Radiación infrarroja.....	17
2.5.6	Radiación solar extraterrestre	17
2.6	Irradiancia	17
2.7	Irradiación solar	19
2.8	La insolación solar	19
2.8.1	Factores que influyen con el nivel de radiación solar en la superficie	20
2.8.2	Instrumentos de medición de Irradiancia solar.....	22
2.9	Iluminancia	23
2.10	Nubes	23
2.11	Protocolo MQTT.....	24
2.12	EL bus I2C	25
2.13	Eventos extremos de Irradiancia debido a la contribución de las nubes.....	25
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS		27
3.1	Formulación de hipótesis	27
3.1.1	Hipótesis general	27
3.1.2	Hipótesis específico.....	27
3.2	Materiales.....	27
3.2.1	Recursos Materiales o Equipos	27
3.3	Metodología.....	37
3.3.1	Método de la investigación.....	38
3.3.2	Metodología para la Arquitectura de la plataforma sensorial.....	39
3.3.3	Metodología del diseño eléctrico y electrónico de la plataforma sensorial.....	46
3.3.4	Metodología para la implementación de la plataforma	51

3.3.5	Metodología para la programación y control en la plataforma implementada...	52
3.3.6	Metodología para la adquisición y procesamiento de datos	54
3.4	Validación y calibración de la plataforma sensorial	54
3.4.1	Presentación de resultados de calibración y validación de datos	56
3.4.2	Obtención de la ecuación de calibración	57
3.5	Ubicación e implementación del lugar de estudio	58
3.6	Análisis costo beneficio	59
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		61
4.1	Resultados	61
4.1.1	Resultados de la recolección de datos de eventos extremos de Irradiancia solar registrados en Puno y Juliaca.	61
4.1.2	Análisis Estadístico de los datos registrados de eventos extremos de Irradiancia solar en Puno y Juliaca.	63
4.2	Discusión	76
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		78
5.1	Conclusiones	78
5.2	Recomendaciones	80
5.2.1	Sugerencias	80
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA		81
ANEXOS		86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Eventos de Irradiancia extrema registrados en todo el mundo.....	xvii
Tabla 2 Formas renovables de energía	2
Tabla 3 Eficiencia de los diferentes tipos de células fotovoltaicas	7
Tabla 4 Comparativa entre magnitudes radiométricas y fotométricas	14
Tabla 5 Rangos de longitud de onda aproximados de la radiación solar y terrestre	15
Tabla 6 Tipos de radiación ultravioleta	16
Tabla 7 Componentes de Irradiancia Solar.....	18
Tabla 8 Especificaciones del NodeMCU ESP8266.....	28
Tabla 9 Especificaciones de los mini módulos FV.....	29
Tabla 10 Especificaciones del sensor INA219	30
Tabla 11 Especificaciones del sensor BMP280.....	31
Tabla 12 Especificaciones del módulo RTC DS3231	31
Tabla 13 Especificaciones del módulo Micro SD Card.....	32
Tabla 14 Especificaciones del LCD 16X2	33
Tabla 15 Especificaciones del módulo cargador de batería de litio TP4056.....	33
Tabla 16 Especificaciones eléctricas del multímetro FLUKE 179.....	34
Tabla 17 Especificaciones técnicas del clinómetro Suunto Tandem 360cp/360r.....	35
Tabla 18 Especificaciones del MODULO FV CALIBRADO (patrón)	36
Tabla 19 Presupuesto de la plataforma sensorial.....	60
Tabla 20 Ocurrencias de eventos muy extremos de Irradiancia ($> 1367 \text{ W/m}^2$) en Juliaca....	61
Tabla 21 Ocurrencias de eventos extremos de Irradiancia ($> 1000 \text{ W/m}^2$) en Juliaca.....	62
Tabla 22 Ocurrencias de eventos muy extremos de Irradiancia ($> 1367 \text{ W/m}^2$) en Puno.....	62
Tabla 23 Ocurrencias de eventos extremos de Irradiancia ($> 1000 \text{ W/m}^2$) en Puno	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema descriptivo del sistema de generación fotovoltaico (Feliciano, 2019).	4
Figura 2. Central fotovoltaica Rubí de Moquegua con una generación de hasta 180 MW (Enel, 2018).....	4
Figura 3. Elevación de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción (Pinho & Galdino, 2016).....	5
Figura 4. Célula fotovoltaica de silicio cristalino (Collaguazo, 2019).....	6
Figura 5. Esquema de funcionamiento de una célula solar (Diaz & Toro, 2019).	6
Figura 6. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica (Pinho & Galdino, 2016).....	8
Figura 7. Circuito de Corriente conectada a una carga (Elaboración propia).	8
Figura 8. Circuito de Corriente de corto circuito sin carga (Elaboración propia).	9
Figura 9. Circuito de Voltaje de circuito abierto sin carga (Elaboración propia).	9
Figura 10. Potencia máxima de la celda fotovoltaica (Collaguazo, 2019).....	10
Figura 11. Curva IV típica de una célula fotovoltaica (Gimeno, Orts, & Seguí, 2014).....	11
Figura 12. Conexión en serie de las células fotovoltaicas (Gimeno et al., 2014)	12
Figura 13. Conexión en paralelo de las células fotovoltaicas (Gimeno et al., 2014)	12
Figura 14. Espectro electromagnético (GeoDesign, 2020).	15
Figura 15. Irradiancia directa, difusa y reflejada (Collaguazo, 2019).....	19
Figura 16. Curva entre la irradiación diaria y las HPS (Gomez, 2015).....	20
Figura 17. Posición del sol respecto a superficies horizontales (Pereira et al., 2017).	20
Figura 18. Rango de valores del ángulo de declinación (Pereira et al., 2017).	21
Figura 19. Pirheliómetro (Pinho & Galdino, 2016).....	22
Figura 20. Piranómetro tipo termopila (Rodriguez, 2015).	23
Figura 21. Presenta los diferentes tipos de nubes con sus altitudes medias (Andrade, 2016). 24	
Figura 22. Describe la estructura de publicación MQTT (MathWorks, 2020).	25
Figura 23. Estructura de conexión del bus I2C (Mendonça, 2016).....	25
Figura 24. Placa de desarrollo NodeMCU ESP8266 con WiFi (FilipeFlop, 2018).	28
Figura 25. Modulo Solar Fotovoltaico 5.5V 240mA (USINAINFO, 2020).	29
Figura 26. Modulo Solar Fotovoltaico 5V 500mA (USINAINFO, 2020).	29

Figura 27. Sensor de corriente CC INA219 I2C (FilipeFlop, 2018).	30
Figura 28. Sensor de Temperatura y Presión BMP280 (FilipeFlop, 2018).	30
Figura 29. Reloj de tiempo real RTC DS3231 (FilipeFlop, 2018).	31
Figura 30. Modulo Arduino Micro SD Card (FilipeFlop, 2018).	32
Figura 31. Pantalla LCD (FilipeFlop, 2018).	32
Figura 32. Módulo cargador de batería de litio TP4056 (FilipeFlop, 2018).	33
Figura 33. Batería recargable de iones de litio 3.7 V (FilipeFlop, 2018).	34
Figura 34. Multímetro digital FLUKE 179 (Elaboración propia).	35
Figura 35. Clinómetro Suunto Tandem 360cp/360r (Elaboración propia).	36
Figura 36. Modulo fotovoltaico calibrado (patrón) (Elaboración propia).	37
Figura 37. Diagrama de la metodología propuesta (elaboración propia).	37
Figura 38. Arquitectura del funcionamiento del hardware y software de la plataforma sensorial (Elaboración propia).	40
Figura 39. Plataforma sensorial de medición de eventos extremos de Irradiancia solar implementados en Puno y Juliaca (Elaboración propia).	40
Figura 40. Diagrama de bloques de conexión de los componentes (Elaboración propia).	41
Figura 41. Diagrama de bloques del INA219 (Texas Instruments, 2011).	42
Figura 42. Ciclo de carga completo del TP4056 (Corp., 2015).	46
Figura 43. Diseño del hardware de la plataforma sensorial (Elaboración propia).	47
Figura 44. Circuito de conexión de pruebas (Elaboración propia).	47
Figura 45. PCB de Medición y almacenamiento de datos de la plataforma sensorial (Elaboración propia).	48
Figura 46. PCB de alimentación para autonomía de la plataforma sensorial (Elaboración propia).	48
Figura 47. Diagrama unifilar de conexión en EAGLE (Elaboración propia).	49
Figura 48. Diagrama de conexión de la plataforma sensorial (Elaboración propia).	50
Figura 49. Diagrama de funcionamiento de la plataforma sensorial (Elaboración propia).	51
Figura 50. Programación básica para medir Irradiancia con Arduino UNO (Chase et al., 2018).	52
Figura 51. Servidor de monitoreo diario de eventos extremos con ThingSpeak (ThingSpeak, 2019).	53

Figura 52. Visualización del registro de datos en monitor serie de Arduino (Elaboración propia).....	54
Figura 53. Diagrama de bloques de calibración y validación de datos (Elaboración propia).	55
Figura 54. Calibración de la plataforma sensorial (Elaboración propia).....	56
Figura 55. Regresión lineal entre el módulo calibrado (patrón) – plataforma sensorial (Elaboración propia).	56
Figura 56. Comparación entre modulo calibrado (patrón) – plataforma sensorial (Elaboración propia).....	57
Figura 57. Ubicación e implementación de las plataformas sensorial (Google Maps).	58
Figura 58. Plataforma sensorial implementados en Juliaca y Puno (Elaboración propia)	59
Figura 59. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 16/01/2020-Juliaca. ...	63
Figura 60. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 16/01/2020-Juliaca.	64
Figura 61. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 17/02/2020-Juliaca. ...	64
Figura 62. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 17/02/2020-Juliaca.	65
Figura 63. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 04/03/2020-Juliaca. ...	65
Figura 64. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 04/03/2020-Juliaca.	66
Figura 65. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 01/04/2020-Juliaca. ...	66
Figura 66. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 01/04/2020-Juliaca.	67
Figura 67. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 06/06/2020-Juliaca. ...	67
Figura 68. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 06/06/2020-Juliaca.	68
Figura 69. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 25/07/2020-Juliaca. ...	68
Figura 70. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 25/07/2020-Juliaca.	69
Figura 71. Gráfico de Irradiancia en un día con presencia de nubes y sin presencia de nubes en la ciudad Juliaca.....	69
Figura 72. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 11/01/2020-Puno.	70

Figura 73.	Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 11/01/2020-Puno.	70
Figura 74.	Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 12/02/2020-Puno.	71
Figura 75.	Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 12/02/2020-Puno.	71
Figura 76.	Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 13/03/2020-Puno.	72
Figura 77.	Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 13/03/2020-Puno.	72
Figura 78.	Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 24/07/2020-Puno.	73
Figura 79.	Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 24/07/2020-Puno.	73
Figura 80.	Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 24/07/2020-Puno.	73
Figura 81.	Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 24/07/2020-Puno.	74
Figura 82.	Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 15/09/2020-Puno.	74
Figura 83.	Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 15/09/2020-Puno.	74
Figura 84.	Gráfico de Irradiancia en un día con nubes y sin presencia de nubes en Puno.....	75

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Muestra de datos para su procesamiento y análisis estadístico en software de Excel	86
Anexo 2. Tabla comparativa de Irradiancia entre plataforma sensorial y modulo i950W-Slim calibrado (patrón)	87
Anexo 3. Irradiancia máxima, promedio y distribución de frecuencia; registrados por la plataforma durante el periodo de medición en la ciudad de Juliaca.	88
Anexo 4. Irradiancia máxima, promedio y distribución de frecuencia; registrados por la plataforma durante el periodo de medición en la ciudad de Puno.....	94
Anexo 5. Pruebas de laboratorio STC del Módulo Fotovoltaico calibrado (patrón)	100
Anexo 6. Especificaciones técnicas de medición del FLUKE 179	100
Anexo 7. Diseño del circuito PCB de la plataforma sensorial de medición y autonomía energética.....	101
Anexo 8. Código de programación en arduino para la comunicación de medición y monitoreo de datos mediante la IDE de arduino.....	102
Anexo 9. Servidor ThingSpeak de monitoreo de datos en tiempo real de la plataforma de medición, implementado en Juliaca.....	104
Anexo 10. Aplicativo de visualización de datos en ThingShow para Android.....	105
Anexo 11. Calibración y validación de datos de la plataforma sensorial	106

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

UNAJ – Universidad Nacional de Juliaca

UNAP – Universidad Nacional de Puno

EEIS – Eventos Extremos de Irradiancia Solar

UFPA – Universidade Federal do Pará

EPIER – Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables

GEDAE – Grupo de Estudios e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

IEEE – Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

OMM – Organización Meteorológica Mundial

OMS – Organización Mundial de la Salud

PLC – Controlador Lógico Programable

FV – Fotovoltaico

UV – Radiación Ultravioleta

IOT – Internet de las cosas

STC – Condiciones de Prueba Estándar

SI – Sistema internacional de unidades

RTC – Reloj en tiempo real

IDE – Entorno de desarrollo integrado

SPI – Interfaz Serial Periférica

I2C – Integración con los circuitos

A/D – Conversor analógico/digital

DC – Corriente Continua

LISTA DE SÍMBOLOS

P_{MP} – Punto de máxima potencia (W)

V_{MP} – Voltaje de potencia máxima (V)

V_{OC} – Voltaje de circuito abierto (V)

I_{MP} – Corriente de potencia máxima (A)

I_{SC} – Corriente de corto circuito (A)

$G_{i_{ref}}$ – Irradiancia de referencia (W/m²)

$G_{i_{FV}}$ – Irradiancia del módulo FV (W/m²)

G_{i_m} – Irradiancia calibrada medida (W/m²)

HSP_B – Horas solar pico (Wh/m²)

P_{FV} – Potencia fotovoltaica (Wp)

L – Consumo nominal diario (Wh)

C_B – Capacidad de banco de baterías (Ah)

Q_e – Energía radiante (J)

ϕ_e – Flujo o potencia radiante (W)

E_e – Irradiancia (W/m²)

Q_v – Energía luminosa (lm*s)

ϕ_v – Flujo o potencia luminoso (lm)

E_v – Iluminancia (lx=lm/m²)

RESUMEN

En este proyecto de investigación, se presenta una plataforma sensorial de adquisición de datos autónomo y de bajo costo para el monitoreo in situ de parámetros ambientales (al nivel micrometeorológico y microescala), analizado en las condiciones geográficas y climatológicas en las ciudades de Puno y Juliaca, durante un periodo de seis meses del 2020. El objetivo del trabajo es realizar la medición, monitoreo y registro de eventos extremos para la identificación de Irradiancia solar extrema ($>1000 \text{ W} / \text{m}^2$) e Irradiancia solar muy extrema ($>1367 \text{ W} / \text{m}^2$), utilizando como sensor un módulo fotovoltaico calibrado. La implementación de la plataforma sensorial se construyó utilizando pequeños módulos fotovoltaicos de 1.3 Wp para la medición de irradiancia, modulo fotovoltaico de 2.5 Wp para la autonomía y un microcontrolador NodeMCU ESP8266 para la comunicación y monitoreo de datos mediante Wifi con el estándar IEEE 80211, basado en el IOT, se emplearon baterías ion litio para la autonomía, sensores de corriente, temperatura del aire y presión atmosférica, lo que permite el desarrollo de soluciones de medición y monitoreo de datos en cualquier parte de la región sin necesidad de estar conectado a la red eléctrica convencional para poder registrar datos de una manera fácil y económica. El costo de inversión del sistema de medición asciende a (S/.500.00). Los valores de Irradiancia se estimaron a partir de mediciones de corriente de corto circuito (I_{sc}) tomadas por un sensor de corriente INA219. Las pruebas de calibración y validación de los datos se realizaron con empleo y comparación de un módulo fotovoltaico patrón calibrado. Los resultados del registro y procesamiento de datos de la plataforma sensorial dan como resultado la ocurrencia de eventos extremos de Irradiancia solar, obteniendo así durante el periodo de medición una Irradiancia solar muy extrema máxima medida de $1566.87 \text{ W} / \text{m}^2$, que se registró el 04 de marzo a las 12:19:26 hrs., con una duración de 13 segundos, haciendo un total de 29 días de eventos de Irradiancia muy extrema medidas en Juliaca, en una latitud -15.488052 , longitud. -70.14974 a una altitud de 3832 m.s.n.m. y $1407.89 \text{ W} / \text{m}^2$ de Irradiancia solar muy extrema máxima medida en Puno, que se registró el 11 de enero a las 12:20:18 hrs., con una duración de 29 segundos, haciendo un total de 5 días de eventos de Irradiancia muy extrema medida, a una latitud -15.82574 , longitud -70.01119 y una altitud de 3818 m.s.n.m.

Palabras claves: Plataforma sensorial, Irradiancia solar, eventos extremos, IOT

ABSTRACT

In this research project, an autonomous and low-cost sensory data acquisition platform is presented for in situ monitoring of environmental parameters (at the micrometeorological and microscale level), analyzed in the geographical and climatological conditions in the cities of Puno and Juliaca, during the six-month period of 2020. The objective of the work is to record, monitor, process extreme events for the identification of extreme solar irradiance (solar irradiance $> 1000 \text{ W} / \text{m}^2$) and very extreme solar irradiance (solar irradiance $> 1367 \text{ W} / \text{m}^2$), using a calibrated mini photovoltaic module as a sensor. The implementation of the sensory platform was built using small 1.3 Wp photovoltaic modules for irradiance measurement, a 2.5 Wp mini photovoltaic module for autonomy and a NodeMCU ESP8266 microcontroller for communication and data monitoring via Wifi with the IEEE 80211 standard, Based on the IOT, lithium ion batteries were used for autonomy, current sensors, air temperature and atmospheric pressure, which allows the development of measurement and data monitoring solutions anywhere in the region without the need to be connected to the conventional electrical network to be able to record data in an easy and economical way. The investment cost of the measurement system amounts to (S / .500.00). Irradiance values were estimated from short circuit current (I_{sc}) measurements taken by an INA219 current sensor. The calibration and validation tests of the data were carried out with the use and comparison of a calibrated standard photovoltaic module. The results of the data recording and processing of the sensory platform result in the occurrence of extreme solar irradiance events, thus obtaining during the measurement period a very extreme maximum solar irradiance measured of $1566.87 \text{ W} / \text{m}^2$, which was recorded on March 4 at 12:19:26 hrs., With a duration of 13 seconds, making a total of 29 days of very extreme irradiance events measured in Juliaca, at latitude -15.488052 , longitude. -70.14974 at an altitude of 3832 m.s.n.m. and $1407.89 \text{ W} / \text{m}^2$ of maximum very extreme solar irradiance measured in Puno, which was registered on January 11 at 12:20:18 hrs., with a duration of 29 seconds, making a total of 5 days of very extreme irradiance events, at a latitude -15.82574 , longitude -70.01119 and an altitude of 3818 meters above sea level.

Keywords: Sensory platform, solar irradiance, extreme events, IOT.

INTRODUCCIÓN

La Irradiancia solar y la temperatura de la celda, son aspectos muy importantes al momento de evaluar la producción, eficiencia y rendimiento de un sistema fotovoltaico. Es por ello que los sistemas fotovoltaicos generalmente se diseñan teniendo en cuenta la Irradiancia solar terrestre, que es el flujo de energía solar incidente en una superficie de la tierra completamente plana, que generalmente es 1000 W/m^2 (Abe, Dias, Notton, & Faggianelli, 2020).

A partir de este escenario, existe estudios donde se han observado que los picos de Irradiancia solar ocurren en condiciones climáticas parcialmente nubladas que pueden aumentar la luz solar 1.5 veces incluso en latitudes altas (G. Yordanov, Midtgard, Saetre, Nielsen, & Norum, 2012). Las nubes juegan un papel importante en la variación de la Irradiancia solar a corto plazo, causando eventos que van desde una reducción casi total hasta mejoras sustanciales, en ciertas condiciones, amplificando a valores superiores a la irradiancia terrestre ($>1000 \text{ W/m}^2$) e incluso superando los valores de Irradiancia extraterrestre ($>1367 \text{ W/m}^2$) (Piedehierro, Antón, Cazorla, Alados, & Olmo, 2014).

El principal desafío está relacionado con las variaciones drásticas de espacio y tiempo que se dan en la generación fotovoltaica producida por las nubes, el movimiento y tiempo que se tiene en cierto tipo de nube que está relacionado con las variaciones en el campo de la Irradiancia a escalas de segundos y metros, lo que impacta particularmente en pequeños sistemas fotovoltaicos (Jamaly & Kleissl, 2018). Para un diseño adecuado de redes en medición y monitores por sensores se debe considerar cuidadosamente la respuesta de tiempo de los sensores. La respuesta de tiempo de los sensores de Irradiancia como los piranómetros varía entre 5 a 20 seg., siendo así un filtro bajo para variaciones de Irradiancia que afectan la generación de FV (Espinosa, Aguera, Gonzales, & Jose, 2018).

Se ha demostrado que los eventos de Irradiancia solar extrema, pueden durar segundos a minutos, dependiendo de la velocidad de movimiento y cierto tipo de nube y que estos eventos de Irradiancia solar exceden los niveles extraterrestres llamada también constante solar y pueden causar arcos en los módulos fotovoltaicos, lo que puede provocar incendios y pérdida de propiedades (G. H. Yordanov, Saetre, & Midtgard, 2013).

G. Yordanov et al., (2012), presento un estudio sobre EEIS, donde menciona que el estudio fundamental sobre la energía solar está en los eventos de Irradiancia solar extrema y su influencia en los sistemas fotovoltaicos mediante el control de la Irradiancia parámetro ambiental. Se observó, en los días analizados, que alrededor de una cuarta parte de la irradiación solar diaria son superiores a 1000 W/m², valor utilizado para dimensionar equipos fotovoltaicos. Incluso considerando el 20% y 25% de tolerancia establecida en algunos estándares de fabricación de los módulos FV, una cantidad considerable de energía aún se descuidaría y por ello la importancia al dimensionar sistemas fotovoltaicos, especialmente la protección contra sobrecorriente (la principal contribución de la sobreirradiación está en la corriente). La Tabla 1, muestra los eventos extremos de irradiación solar registrados en todo el mundo.

Tabla 1
Eventos de Irradiancia extrema registrados en todo el mundo

Referencias (año)	Máxima irradiación (W/m ²)	Ubicación (Latitud y altitud msnm)	Instrumento de medida y orientación	Resolución de mediciones (segundos)
(G. Yordanov, Saetre, & Midtgård, 2015)	1600 W/m ²	Noruega (Grimstad), 58° 20' N, 60 m.	Celda fotovoltaica (mono c-Si), inclinada 39° desde la horizontal.	0.5
(Almeida, Zilles, & Lorenzo, 2014)	1590 W/m ²	Brasil (São Paulo), 23 °S, 760 m	Módulo fotovoltaico Poly c-Si (MSX-10) horizontal.	1
(Ramos et al., 2019)	1571 W/m ²	Perú (Punolago Titicaca), 3812 m.	Módulos FV, (mono c-Si), inclinada 15.5° desde la horizontal	1
Trabajo de investigación	1566 W/m²	Perú (Puno-Juliaca), 3832 m	Mini modulo FV (mono c-Si), inclinada 15° desde la horizontal	1
(Tapakis & Charalambides, 2014)	1533 W/m ²	Chipre (Paphos) (latitud 34.7° N, longitud 32.6° E).	Piranómetro de termopila (MS-802) Horizontal.	60
(Luoma, Kleissl, & Murray, 2012)	1300 W/m ²	Estados Unidos (San Diego), 32 ° N, 117 O 22 m.	Piranómetro de silicio (LICOR - LI200x), horizontal.	60
(Piedehierro et al., 2014)	1244 W/m ²	España (Granada), 37° N, 3° O, 680 m.	Piranómetro de termopila (CM-11), horizontal.	60

Fuente: Elaboración propia

Este documento aborda la implementación y prueba de una plataforma sensorial de bajo costo para el monitoreo y medición in situ de eventos extremos de Irradiancia solar. Empleamos hardware y software libre debido a su fácil acceso y su bajo costo, en comparación con otros equipos comerciales de sensores medición con este fin, la plataforma debe proporcionar el desarrollo de soluciones de medición y monitoreo de parámetros ambientales en lugares con recursos limitados y así obtener datos de una manera fácil y económica (Chase et al., 2018). La plataforma sensorial mide, envía y almacena parámetros de Irradiancia solar (W/m^2), temperatura del aire ($^{\circ}C$), presión atmosférica (hPa) a través de sensores y dispositivos integrados con electrónica (hardware y software), que facilitan la recolección, almacenamiento y transmisión de datos mediante wifi y la comunicación de internet de las cosas (IOT) para su monitoreo en tiempo real (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013). Para la medición e identificación de los eventos extremos se utiliza mini módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino (mono c-Si) debido a su eficiencia, ya que pueden generar más energía que el módulo policristalino (poli c-Si), incluso con poca luz y nublado (Messenger & Ventre, 2005).

Para la validación y calibración de los datos se obtuvo un algoritmo de regresión lineal entre las comparaciones de lecturas de los datos del módulo FV calibrado (patrón) y la plataforma sensorial en condiciones reales de funcionamiento, para luego calcular el coeficiente de determinación (R^2) y de correlación de Pearson (R) entre ellos. El sistema de medición fue implementado y probado en las ciudades de Puno y Juliaca. El estudio y conocimiento en la literatura científica de nuestra región, no muestra estudios de medición y monitoreo de eventos extremos de Irradiancia solar, considerando así tal vez el primero en su investigación en las condiciones geográfica y climatológicas de la región.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del Problema

La Irradiancia solar Global es una variable muy importante que influye significativamente en el medio ambiente de la Tierra. Es la principal fuente de energía para la vida en la Tierra, y su interacción con la atmosfera determina las condiciones físicas del aire (temperatura, presión, humedad, nubes). La radiación solar tiene una distribución no homogénea entre diferentes regiones geográficas de la Tierra y las horas del día debido a una gran cantidad de factores: el aparente movimiento del Sol en el cielo, la distancia Sol-Tierra, coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud), y el estado atmosférico, incluyendo nubes y reflectividad del suelo, entre otros (De Andrade & Tiba, 2016).

Se han encontrado fenómenos de sobreirradiación en todo el mundo, muestran mediciones de Irradiancia excesiva reportado en Sao Paulo, Brasil a altitudes inferiores a 1000 msnm, se registraron 15 eventos de Irradiancia solar extrema, con un máximo de 1487 W/m^2 . Más tarde, el 21 de diciembre, se registró una Irradiancia de 1590 W/m^2 Irradiancia solar extrema que duró 32 segundos. La sobreirradiación causada por la mejora de la nube ha sido observado en todo el mundo y se espera que el fenómeno sea más intenso en las latitudes tropicales del hemisferio sur, en las altas mesetas y montañas (Almeida et al., 2014). Es por ello la importancia de tener en cuenta la sobreirradiación al dimensionar los sistemas FV los problemas pueden dar lugar a una grave infravaloración de cables, equipos y dispositivos de protección, especialmente la protección contra sobre corriente.

En los últimos años la radiación solar aumento considerablemente esto se ha explicado por efectos del cambio climático, debido al aumento de la producción de dióxido de carbono y azufre por las grandes industrias. Esto genera que se produzcan daños en el ADN de las células de la piel, lo que contribuye de manera significativa al aumento de la incidencia de cáncer de piel y otros cambios relacionados con la exposición inadecuada a la radiación solar (Mejía et al., 2018). Teniendo esas consideraciones es que surge el presente trabajo de tesis donde se busca desarrollar una plataforma de medición y monitoreo de eventos extremos de Irradiancia solar a través de un pequeño módulo fotovoltaico y un microcontrolador analizado en las condiciones geográficas y climatológicas de las ciudades de Puno y Juliaca.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo desarrollar una plataforma sensorial basado en IOT y con autonomía energética, para la medición y monitoreo de eventos extremos de Irradiancia solar en Puno y Juliaca?

1.2.2 Problema específico

- ¿Sera posible Implementar una plataforma de comunicación en tiempo real y almacenamiento de datos para el monitoreo in situ de eventos extremos de Irradiancia solar?
- ¿Cómo determinar e identificar los eventos extremos de Irradiancia solar (Irradiancia extrema $> 1000 \text{ W/m}^2$) e (Irradiancia muy extrema $> 1367 \text{ W/m}^2$) en Puno y Juliaca?
- ¿Como influyen los parámetros geográficos y climatológicos en la medición y monitoreo in situ de eventos extremos de Irradiancia solar en Puno y Juliaca?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una plataforma sensorial para la medición y monitoreo de eventos extremos de Irradiancia solar basado en IOT y con autonomía energética en Puno y Juliaca.

1.3.2 Objetivo específico

- Implementar una plataforma de comunicación en tiempo real y almacenamiento de datos para el monitoreo in situ de eventos extremos de Irradiancia solar.
- Determinar e identificar los eventos extremos de Irradiancia solar (Irradiancia extrema $> 1000 \text{ W/m}^2$) e (Irradiancia muy extrema $> 1367 \text{ W/m}^2$) en Puno y Juliaca.
- Analizar en qué condiciones geográficas y climatológicas ocurre los fenómenos de eventos de extremos de Irradiancia solar sobre los datos registrados de Puno y Juliaca.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1 Justificación técnica

El principal problema que motiva esta investigación es la falta de datos, técnicas e instrumentos de medición de eventos extremos de Irradiancia solar para la captura, procesamiento y visualización de datos. En la actualidad la irradiación solar extrema ha mostrado niveles extremos en todo el mundo, por lo que es importante contar con información y la necesidad de investigar y desarrollar un sistema de medición de Irradiancia solar extrema para evaluar y conocer los estudios y cuidados que se debe tener en los equipos y poblaciones, expuestas a esta condición.

1.4.2 Justificación económica

Los trabajos relacionados a mediciones y monitoreo de eventos extremos de Irradiancia requieren costos altos para su implementación, ya que estos instrumentos de medición son muy caros de adquirirlos, lo que dificulta la implementación de estas soluciones de medición en instalaciones fotovoltaicas pequeños y de bajos recursos como en países en desarrollo como Perú. Es por ello, en este trabajo desarrollamos una plataforma sensorial de medición y monitoreo de datos en cualquier parte de la región sin necesidad de estar conectado a la red eléctrica convencional para poder registrar datos de una manera fácil y económica.

1.4.3 Justificación social

Con el desarrollo de este proyecto de investigación es obtener datos e información sobre eventos extremos de irradiación solar en Puno y Juliaca para su identificación, conocimiento y evaluación sobre este tipo de radiación solar. Investigaciones afirman la importancia de la Irradiancia solar extrema al momento de dimensionar sistemas FV y su influencia en la radiación ultravioleta, es por ello que surge el presente trabajo de tesis que será una herramienta muy importante para la investigación en nuestra región, el cual motivara el interés en la investigación y desarrollo de nuevos conocimientos sobre eventos extremos de Irradiancia solar que se tiene en nuestra región del altiplano a más de 3800 msnm.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

En Belém, Brasil, se realiza una plataforma sensorial independiente de bajo costo de medición y monitoreo de Irradiancia solar extrema, mayor a los 1000 W/m^2 e Irradiancia solar muy extrema, mayor a 1367 W/m^2 . El objetivo de la investigación fue detectar parámetros ambientales relacionados con el confort térmico y monitorear eventos de súper Irradiancia. La plataforma sensorial se construyó utilizando un microcontrolador como una computadora integrada para la comunicación y procesamiento de datos, y pequeños módulos FV calibrados y sensores de medición analógicos. Las pruebas realizadas por la plataforma midieron una sobreirradiación extrema de 1321 W/m^2 a baja latitud (1° S) y baja altitud (7 msnm). La información se utilizará posteriormente en proyectos relacionados con la creación de estrategias para mitigar los efectos de la sobreirradiación en los sistemas fotovoltaicos (Chase et al., 2018).

Se muestran las mediciones de Irradiancia solar extrema tomadas el 27 de noviembre en la Universidad de Sao Paulo, Brasil, donde se registraron 15 eventos de mejora extrema continua, con un máximo de 1487 W/m^2 . Más tarde, el 21 de diciembre, se registró una Irradiancia de 1590 W/m^2 a una altitud de 760 m.s.n.m., el evento de mejora más extremo reportado en Brasil y para altitudes inferiores a 1000 m.s.n.m. que duró 32 s. Por ello explican la importancia de no descuidar la sobreirradiación al dimensionar los sistemas fotovoltaicos especialmente la protección contra sobrecorriente (la principal contribución de la sobreirradiación está en la corriente). Se observó, en los dos días analizados, que alrededor de una cuarta parte de la irradiación diaria corresponde a irradiancias superiores a 1000 W/m^2 , valor utilizado para evaluar los equipos fotovoltaicos (Almeida et al., 2014).

Se realizó estudios de eventos de Irradiancia solar al sur de Noruega, casi al nivel del mar. Los eventos de sobreirradiación en el sur de Noruega pueden ser bastante frecuentes, lo que explica que la Irradiancia solar alcanza su punto máximo en condiciones parcialmente nubladas. Las nubes pueden aumentar la luz solar más de 1,5 veces, incluso en latitudes altas,

las ráfagas duran de segundos a minutos. Todos los eventos de máxima Irradiancia fueron entre los meses abril hasta setiembre 2011 que superan los 1300 W/m^2 . En junio del 2012 se registró un estallido que alcanzo 1528 W/m^2 . El autor concluye que estas condiciones severas deben ser consideradas por los fabricantes de módulos fotovoltaicos y sensores de Irradiancia (G. Yordanov et al., 2012).

Recientemente, detectamos explosiones de más de $1,5 \text{ kW/m}^2$ en el norte de Europa a una latitud cercana a 60° N . Los eventos de sobreirradiación pueden durar decenas de minutos, así como menos de 1 s. Es posible que hayan causado arcos en serie en los módulos fotovoltaicos, lo que provocó incendios y pérdida de propiedad. La medición precisa de ráfagas cortas requiere sensores con tiempos de respuesta del orden de milisegundos. Los largos tiempos de respuesta de los piranómetros de termopila suavizan los detalles importantes de los picos de vida muy corta y pueden causar subestimaciones de más del 30%. Por ello se pierden muchos eventos de sobreirradiación si no se miden con una resolución óptima en un segundo, que probablemente sea específica del sitio (G. H. Yordanov et al., 2013).

El siguiente trabajo tiene como propósito de detectar y analizar los eventos de mejora de la Irradiancia horizontal solar total en Granada, España. Para analizar se tomaron datos de 1 minuto durante un periodo de cinco años. Se ha desarrollado un método de detección, basado en un modelo empírico para condiciones libres de nubes e información de cobertura de nubes proporcionada por una cámara de cielo. El análisis de la distribución estacional de esos eventos mostró que 50% de ellos ocurren en primavera, seguidos distantemente por las otras estaciones con porcentajes por debajo del 20%. Entre los factores que afectan la radiación solar que llega al suelo, las nubes juegan un papel clave en su variabilidad a corto plazo, causando eventos que van desde una reducción casi total hasta mejoras sustanciales en condiciones particulares (Piedehierro et al., 2014).

En el presente trabajo se diseña un dispositivo que permita estimar y predecir la radiación solar diaria en Lambayeque ($6^\circ 42' \text{ S}$, $79^\circ 54' \text{ O}$) utilizando modelos matemáticos y redes neuronales artificiales (RNAs). Se diseña un prototipo utilizando un Arduino y estará equipado con una celda solar, un sensor de humedad y temperatura y un sensor de corriente y voltaje. El dispositivo medirá la temperatura cada 15 minutos y al final del día calculará la temperatura promedio diaria a partir de la cual utilizando el modelo matemático calculará el

valor de la radiación solar global diaria en kWh/m²/día, mediante el modelo matemático Ertekin-Yaldiz (Diaz & Toro, 2019)

La tesis elaborada por, Bayon (2018), explica el diseño y construcción de un instrumento autónomo que captura y guarda información que proporciona una célula fotovoltaica calibrada y un sensor de temperatura, también ayuda a conocer las condiciones en las que trabaja y mejorar la producción o controlarla ya sea por inclinación de las placas, orientación y otros conocimientos sobre el tema.

2.1.2 Antecedentes nacionales

En Arequipa, Perú se realiza el estudio y análisis de datos de la actividad solar, así como la radiación solar global y radiación ultravioleta, los datos estudiados fueron facilitados por SENAMHI entre los años 2001 hasta el 2017. Los resultados obtenidos indican que la actividad solar tiene influencia sobre la radiación ultravioleta (Chambi, 2018).

En la siguiente tesis se diseñó e implemento un sistema de señalización utilizando sensores fotovoltaicos para la prevención de los efectos de la radiación solar para los estudiantes de la EPIE. Utilizando un sensor que mide los niveles de radiación ultravioleta y así poder prevenir los efectos que ocasionan los altos niveles de radiación ultravioleta hacia los estudiantes de la EPIE, se detectó que los altos niveles de radiación ultravioleta son más altos en los horarios del medio día (Ccama, 2017).

2.1.3 Antecedentes regionales

Ramos et al., (2019), realizaron un estudio en Puno a 3812 m.s.n.m., siendo el primero en la región, en la medición de ocurrencias de irradiancia solar extrema. Se realizó la medición de la irradiancia con módulos FV y un Controlador Lógico Programable (PLC). Los resultados obtenidos por este sistema de medición, muestran las ocurrencias de irradiancia solar extrema, sobrepasando la irradiancia solar terrestre de 1000 W/m² y la irradiancia solar extraterrestre 1367 W/m², registrando así una irradiancia máxima de 1571 W/m², con una duración de 42 seg., concluyendo que el fenómeno es provocado por la formación de nubes alrededor del sol provocando el aumento en la irradiancia solar.

2.2 La Energía

En reportes de investigación la energía forma la base de la vida humana para el desarrollo tecnológico y económico de un país, no hay actividad que sea independiente de la energía. En las últimas décadas, el aumento del uso de la energía ha creado problemas de "demanda y oferta". Si se continúa satisfaciendo la creciente demanda mundial de energía con combustibles fósiles, estos no estarán disponibles para la producción de energía en pocos años. Es una necesidad actual del mundo de hoy pensar y aprovechar en nuevas fuentes de energía como son las fuentes de energías renovables, que son recursos naturales finitos para satisfacer la demanda para las generaciones próximas (Sumathi, Kumar, & Surekha, 2015).

La energía existe en muchas formas diferentes como:

- Energía potencial
- Energía cinética
- Energía térmica
- Energía magnética
- Energía eléctrica
- Energía de radiación
- Energía nuclear
- Energía química

En general, las leyes físicas establecen que la energía no puede ser destruida ni creada de la nada, la energía puede transformarse a otros tipos de energía o puede ser intercambiado entre diferentes partes del sistema. A partir de este escenario muchas personas hablan sobre pérdidas de energía o ganancias de energía, aunque la ley de conservación de energía ya está establecida (Quaschnig, 2005).

2.3 Energías Renovables

La mayoría de las fuentes de energía renovable comienzan directamente o de manera indirecta desde el sol. Actualmente, dado el protagonismo que tienen, las energías renovables vienen desempeñan un papel importante en el ámbito de la energía, ya que compensan la demanda energética mundial cuidando el medio ambiente de una manera sostenible. A este respecto Quaschnig, (2005), señala que las energías renovables serán la clave de este desarrollo ante la creciente demanda mundial de energía, porque son la única opción que puede cubrir la demanda de energía para generaciones futuras de una manera climáticamente sostenible.

Las fuentes de energía renovables son recursos energéticos inagotables en el horizonte temporal de la humanidad. Las energías renovables pueden en teoría, cubrir la demanda mundial de energía sin ningún problema. Sin embargo, eso no significa que la transición de nuestro

suministro actual de energía a los suministros de energía renovable será posible sin ningún problema, esto tiene que darse de una manera transitoria en el tiempo. El suministro actual de energía depende principalmente de los recursos de energía fósil. La transformación de nuestro suministro de energía actual a las fuentes de energía renovable, es el desafío más importante del siglo XXI (Feliciano, 2019).

Tabla 2
Formas renovables de energía

Energía	Recurso renovable	Producto
Solar	Energía solar que absorbe y almacena radiación solar	Calor y electricidad
Energía hidroeléctrica	Agua que fluye de elevaciones más altas a más bajas a través de presas	Electricidad
Viento	Captación del viento por turbinas	Electricidad
Biomasa	Bio degradación de residuos y desechos orgánicos	Calor y gas
Geotérmica	Aprovechar el calor y vapor del manto de la tierra	Calor electricidad
Combustibles de hidrógeno	Quema de gas hidrogenó	Poder de movimiento
Nanotecnología	Usando las propiedades únicas de los materiales	Electricidad

Fuente: Elaboración propia

2.4 Energía solar

La energía solar es una fuente de energía renovable obtenida a partir de la radiación solar; esta energía emitida por el sol viaja por el espacio a la velocidad de la luz en forma de ondas electromagnéticas y ha sido aprovechada por el ser humano desde nuestros antepasados mediante diferentes tecnologías que han ido evolucionando en los años. Así mismo, Quaschnig, (2005), sostiene que el sol es la mayor fuente de energía renovables ya que, anualmente la tierra recibe una gran cantidad de energía solar ($3.9 \times 10^{24} J = 1.08 \times 10^{18} KWh$), esto es aproximadamente 10 mil veces más que la demanda mundial de energía primaria, si tan solo se lograra aprovechar una milésima parte de esta energía, se podría satisfacer toda la demanda de la energía de la humanidad. Sin embargo, el problema en relación a esta forma de energía radica en como poder aprovecharla de forma eficiente.

Cuando se habla de energía solar existen varios términos que más adelante es necesario definirlos:

- Radiación solar,
- Irradiancia solar
- Irradiación solar.

2.4.1 El Sol

El sol emite una gran cantidad de energía en forma de ondas electromagnéticas. El Sol es el origen de las fuentes de vida y energía de nuestro sistema; la energía transmitida por el sol a la tierra es lo que se conoce como radiación; en el caso de la energía solar, ésta aprovecha directamente la energía que recibimos del Sol dando lugar a dos modalidades de aprovechamiento del recurso: la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica. La densidad de energía extraterrestre total disminuye a $1367 \text{ W} / \text{m}^2$ y también se le conoce como la constante solar (Messenger & Ventre, 2005).

Según Hafemeister (2019), menciona que no toda la radiación solar que alcanza la atmósfera llega a la superficie terrestre debido a que las condiciones geográficas y meteorológicas influyen sobre la misma. Sin olvidar que, dependiendo de la hora del día, la estación del año la radiación solar recibida en cualquier punto del planeta también varía.

2.4.2 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía capaz de convertir y producir electricidad a partir de la radiación solar incidente en la superficie inclinado o plano de un captador de energía; esta forma de generación energética emplea la potencia recibida en forma de Irradiancia solar para producir electricidad empleando unos dispositivos conocidos como celdas o células fotovoltaicas. Esta electricidad se puede utilizar de manera directa o se puede almacenar en acumuladores para un uso posterior e incluso se puede introducir en la red de distribución eléctrica. Esta tecnología permite la generación de energía eléctrica para lugares de difícil acceso a la red eléctrica convencional, lo que la hace apta para ubicaciones remotas, como casas rurales o para construir viviendas autónomas (Gimenez, 2019).

a) **Tecnología Solar Fotovoltaica**

Como se ha mencionado anteriormente, este tipo de energía es obtenida a través de los fotones procedentes de la luz solar mediante células fotovoltaicas aprovechando las propiedades físicas de ciertos materiales semiconductores para generar energía; estos elementos se encuentran fabricados de un material semiconductor, cristalino, generalmente derivado del silicio, que tiene la particularidad de ionizarse al incidir sobre los fotones procedentes de la radiación solar. Este tipo de energía es cada día más importante debido a la mayor necesidad de energías limpias que permitan un desarrollo sostenible (Hafemeister, 2019).

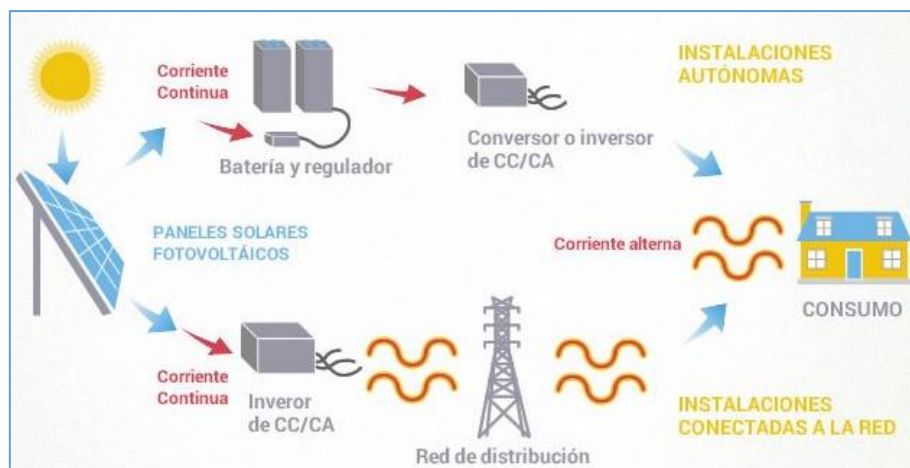


Figura 1. Esquema descriptivo del sistema de generación fotovoltaico (Feliciano, 2019).



Figura 2. Central fotovoltaica Rubí de Moquegua con una generación de hasta 180 MW (Enel, 2018).

b) Efecto fotovoltaico

El fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico, que básicamente consiste en la transformación parcial de la energía luminosa en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas, al incidir sobre él, una radiación electromagnética. Los materiales semiconductores presentan dos bandas de energía, en uno de ellas hay presencia de electrones (banda de valencia) y en la otra no hay presencia de ellos es decir la banda está completamente vacía (banda de conducción). Estas células están elaboradas a base de silicio puro (uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, componente principal que contiene la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo) (Collaguazo, 2019).

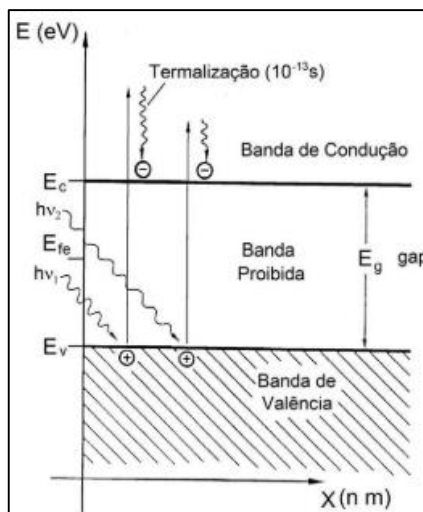


Figura 3. Elevación de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción (Pinho & Galdino, 2016).

La Figura 3, muestra la elevación de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción por la energía luminosa en un semiconductor: E_c -menor nivel de energía de la banda de conducción; E_v -nivel máximo de energía en la banda de valencia.

Becquerel en 1839 observó por primera vez el efecto fotovoltaico, este efecto ocurre en materiales conocidos como semiconductores, los cuales son materiales que tienen propiedades entre conductores y aislantes. Generalmente, una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0,25 y los 0,35 mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 mm^2 . Actualmente, el material más utilizado es el silicio monocristalino que tiene prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin (Fernández, 2009).

c) *Célula solar fotovoltaica*

Las células o celdas fotovoltaicas (CF) son la parte principal de un módulo fotovoltaico, son los dispositivos que se encargan de transformar la energía en forma de radiación electromagnética proveniente del sol (fotones) directamente en energía eléctrica (electrones). Una vez que esta radiación hace contacto con el material semiconductor, éste la transforma en energía eléctrica en forma de corriente continua para poder ser utilizada de inmediato a través del efecto fotovoltaico (EF). Las células fotovoltaicas se crean mediante la unión de materiales de tipo P y N a partir de materiales semiconductores (Diaz & Toro, 2019).

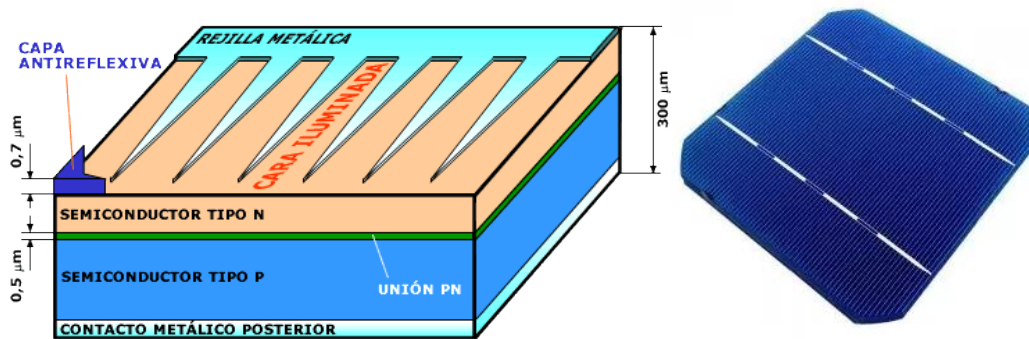


Figura 4. Célula fotovoltaica de silicio cristalino (Collaguazo, 2019).

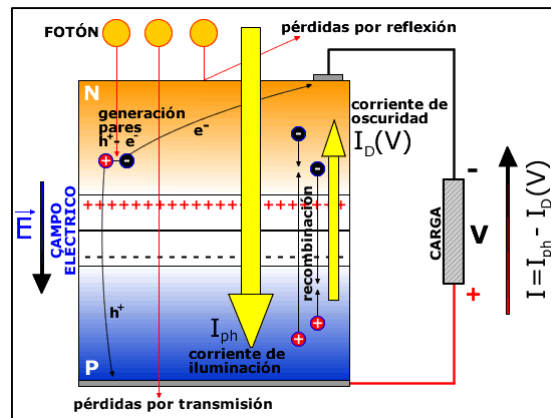


Figura 5. Esquema de funcionamiento de una célula solar (Diaz & Toro, 2019).

d) *Tipos de células fotovoltaicas*

Según Diaz & Toro, (2019), refiere que el componente central de una celda solar es el material cristalino absorbente de luz, usualmente silicio cristalino (C-Si). Sin embargo, otros materiales semiconductores han sido empleados y los más usados a nivel comercial

son: el silicio policristalino (con 53% de uso) silicio monocristalino (38.5%), silicio amorfo (5%), ribbon silicio (3%), Teluro de Cadmio (1.5%), cobre indio di selenio (0.2%).

– **Silicio mono cristalino (c-Si)**

Las células monocristalinas proceden de un único cristal continuo de silicio. Por tanto, la pureza es óptima y esto mejora la eficiencia; estas células presentan un color azul uniforme. El silicio utilizado en este tipo de célula presenta alta pureza y una estructura cristalina perfecta. Como resultado del proceso de fabricación, las células tienen alrededor de 10x10 cm^2 y 350 μm de espesor, con una eficiencia de uso directo entre el 14-17% (Cepeda & Sierra, 2016).

– **Silicio poli cristalino o multi cristalino (poli-Si o mc-Si)**

Las células policristalinas, está formado por muchos cristales. Los cristales no están orientados de la misma manera y por lo tanto la red cristalina no es uniforme en todo el material, por ello son más económicas en comparación con las células solares monocristalinas y de menor eficiencia debido al límite de grano que se encuentra en las celdas, presenta distintos tonos azules. Las células policristalinas con iguales dimensiones y condiciones alcanzan un rendimiento de hasta el 12% (Cepeda & Sierra, 2016)

– **Película delgada (Silicio Amorfo a-Si)**

Las células de película delgada son de silicio o se produce a partir de nuevos materiales, como el arseniuro de galio, telurio de cadmio o el Cobre Indio Diselenido. Estas células también llamadas amorfas están protegidas por medio de encapsulación con vidrio frontal y uno de protección posterior (Cepeda & Sierra, 2016). La eficiencia de estas células se puede observar en la Tabla N° 3.

Tabla 3

Eficiencia de los diferentes tipos de células fotovoltaicas

Material	Eficiencia en laboratorio	Eficiencia directa
Silicio mono	24%	15-18%
Silicio poly	19-20%	13-15%
Silicio amorfo	13%	5-9%
CdTe	16%	6-9%
CIS	18%	7.5-9.5%

Fuente adaptado de Souza (2016).

e) **Modelo de una celda solar**

Para entender el comportamiento electrónico de una celda solar, podemos crear un modelo eléctrico equivalente. El circuito equivalente más usado en FV es el modelo de un diodo. En la Figura 6, observamos un modelo eléctrico muy simplificado al que se le denomina circuito equivalente simplificado.

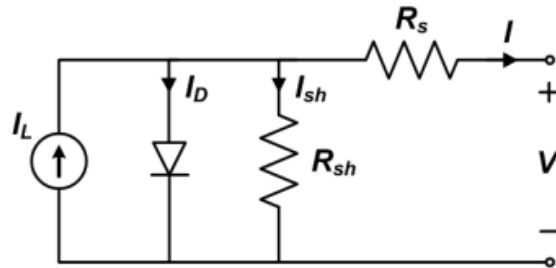


Figura 6. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica (Pinho & Galdino, 2016).

El comportamiento eléctrico de un circuito equivalente puede ser expresado matemáticamente considerando la ley de Kirchhoff.

$$I = I_L - I_D$$

Dónde: I_L es la fotocorriente generada por la celda fotovoltaica e I_D es la corriente que pasa a través del diodo.

f) **Parámetros que identifican una celda fotovoltaica**

A continuación, se describen los parámetros principales de una celda fotovoltaica:

– **Corriente de la celda fotovoltaica (I)**

Es la corriente de salida que fluye a través de los terminales de la celda fotovoltaica, cuando se encuentra conectada a una carga.

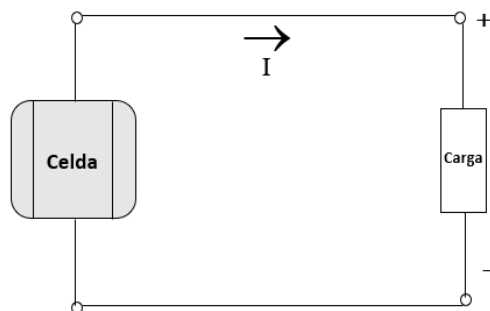


Figura 7. Circuito de Corriente conectada a una carga (Elaboración propia).

– **Corriente de cortocircuito (I_{sc})**

Corresponde a la máxima corriente que puede generar una célula (o módulo FV). El valor de salida es en amperios (A), es la corriente cuando la tensión se anula. Se obtiene uniendo los terminales de la celda fotovoltaica cuando están conectados entre sí el positivo y negativo, es decir, cuando la carga de la celda es cero.

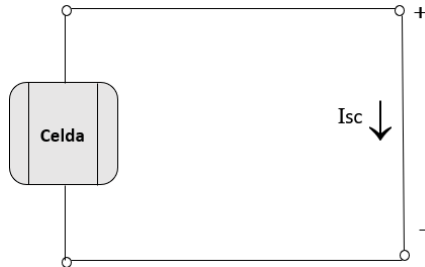


Figura 8. Circuito de Corriente de corto circuito sin carga (Elaboración propia).

– **Voltaje de circuito abierto (V_{oc})**

Corresponde a la máxima tensión que puede proporcionar una célula (o módulo FV). El valor de salida es en voltios (V), es la tensión cuando la corriente es nula en los terminales de la celda fotovoltaica cuando no se tiene conectado ninguna carga, es decir cuando no exista una corriente fluyendo.

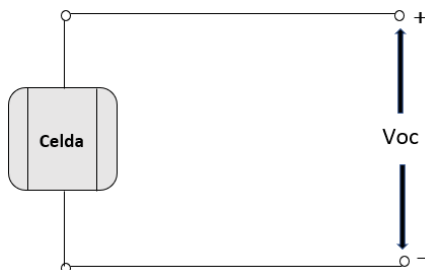


Figura 9. Circuito de Voltaje de circuito abierto sin carga (Elaboración propia).

– **Punto de máxima potencia (MPP)**

La corriente eléctrica generada por un módulo varía de cero a I_{sc} , mientras que la tensión entre los terminales varía de cero a V_{oc} en diferentes condiciones de Irradiancia y temperatura. Dado que la potencia es el producto del voltaje por la corriente, este solo será el máximo para una única combinación de voltaje y corriente. Un módulo fotovoltaico estará suministrando la máxima potencia, cuando el circuito externo tenga una resistencia tal que determine los valores máximos de tensión y corriente y, por tanto su producto será el máximo (Souza, 2016).

– **Corriente de máxima potencia (Imp)**

Es la intensidad de corriente máxima que un módulo fotovoltaico puede suministrar a una carga, en condiciones de prueba estándar STC.

– **Tensión a la máxima de potencia (Vmp)**

Es la tensión máxima que generará el módulo FV, en su punto de máxima potencia, en condiciones de prueba estándar STC.

– **Potencia máxima (Pmax)**

Es la potencia máxima que puede generar un módulo FV en STC, siendo el producto entre la corriente de salida y el voltaje de salida de la celda, está definida por la siguiente expresión.

$$P_{\max} = I_{\max} * V_{\max}$$

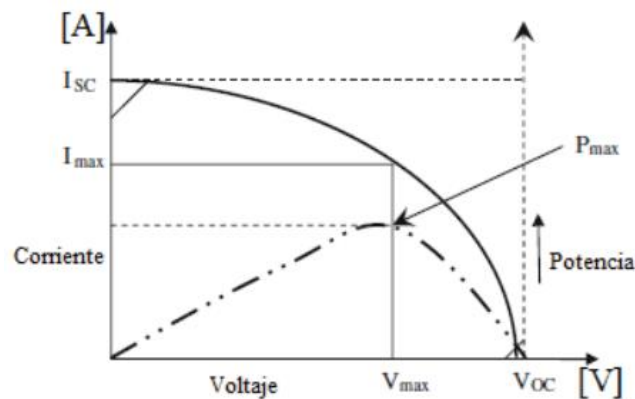


Figura 10. Potencia máxima de la celda fotovoltaica (Collaguazo, 2019)

– **Eficiencia de la celda fotovoltaica (η)**

La eficiencia de una celda fotovoltaica está definida por la relación entre la potencia máxima y el producto entre la Irradiancia solar incidente (G) y el área de la celda fotovoltaica (Ac)

$$n = \frac{P_{\max}}{G * A_c}$$

– **Factor de forma (FF)**

Se define como la relación entre la potencia máxima que se puede entregar a una carga por parte de una célula y el producto de la tensión de circuito abierto (Voc) y la intensidad de corto circuito (Isc) en STC.

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc} * V_{oc}}$$

– **Curva característica (I-V)**

La curva característica I-V de una célula fotovoltaica es la gráfica de la corriente en función del voltaje, desde un voltaje igual a cero al voltaje de circuito abierto. A continuación, podemos distinguir las regiones de trabajo mostradas en la Figura 11.

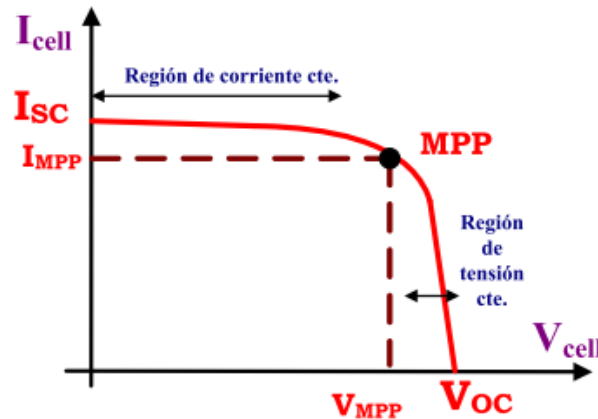


Figura 11. Curva IV típica de una célula fotovoltaica (Gimeno, Orts, & Segui, 2014).

La tensión, corriente y potencia generada por una célula fotovoltaica dependen de las condiciones ambientales donde está funcionando, que cambian a lo largo del día. Para células fotovoltaicas para uso terrestre sin concentración de energía solar, se mide la curva I-V bajo condiciones establecidas por las regulaciones internacionales (EN61215) que se denominan “Standard Test Conditions” STC o condiciones de prueba estándar (Gimeno et al., 2014). Para esta medición, generalmente se usa un simulador solar y un sistema de medición automatizado bajo las siguientes condiciones:

- Irradiación de $1000 \text{ W} / \text{m}^2$.
- Temperatura de la celda: $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Masa de aire 1.5 (espectro solar AM1.5).

g) *Modulo solar fotovoltaico*

Las células fotovoltaicas están eléctricamente asociadas y encapsuladas para formar el módulo fotovoltaico. Un módulo puede consistir en un conjunto de 36 a 216 celdas fotovoltaicas asociadas en serie y/o en paralelo, una asociación que depende de los parámetros eléctricos (voltaje, corriente y potencia) más adecuados para la aplicación para la cual está destinado el módulo fotovoltaico (Souza, 2016).

- La conexión en serie de las células fotovoltaicas aumenta la tensión (y la potencia) de salida del módulo mientras que la corriente es la misma que la de una célula.

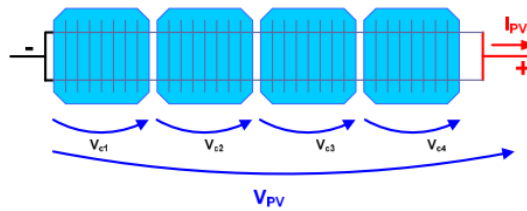


Figura 12. Conexión en serie de las células fotovoltaicas (Gimeno et al., 2014)

$$I_{PV} = I_c^*$$

$$V_{PV} = \sum V_c^*$$

- La conexión en paralelo de las células fotovoltaicas aumenta la corriente (y la potencia) salida del módulo mientras que la tensión es la misma para todas las células

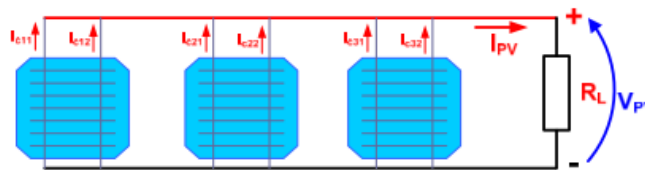


Figura 13. Conexión en paralelo de las células fotovoltaicas (Gimeno et al., 2014)

$$I_{PV} = \sum I_c^*$$

$$V_{PV} = V_c^*$$

2.4.3 Energía Solar Térmica

Según, Gimenez (2019), Otra de las formas más comunes de obtener energía a partir del sol es la conocida como energía solar térmica. A diferencia de la fotovoltaica, que emplea la radiación para generar electricidad, esta técnica emplea la energía procedente de la radiación solar para calentar agua u otros fluidos, empleados con infinidad de propósitos. La aplicación más común de la misma es la obtención de agua caliente sanitaria ACS, sistemas de calefacción y refrigeración de edificios y viviendas, la generación eléctrica mediante la vaporización de agua que circulan por el interior de captadores solares térmicos.

2.5 Radiación solar

Es la energía emitida por el sol en forma de radiaciones electromagnéticas, estas radiaciones atraviesan el espacio interplanetario desde el sol hasta llegar a la atmosfera de la Tierra sin necesidad de un medio material para su irradiación. Sin embargo, no toda la radiación emitida por el sol es visible a nuestros ojos, sino únicamente aquella correspondiente al espectro de la luz visible. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiación, que mide la energía por unidad de tiempo y área en la superficie de la tierra. La radiación que llega a la tierra no es constante, mucha de esta energía es absorbida por la atmosfera mediante diferentes fenómenos y un 40% de la radiación en la superficie no llega en forma de luz visible sino como radiación infrarroja (Marengo, Merino, & Orellana, 2017).

En los siguientes apartados se profundizará la explicación de estas ciencias.

2.5.1 Radiometría y fotometría

El estudio de las radiaciones electromagnéticas surge la diferenciación entre el estudio de la radiación en su vertiente luminosa, siendo aquellas frecuencias perceptibles por el ojo humano y por otra parte el estudio de la energía presente en ella, siendo esta todo el rango de frecuencias radiadas por el sol (espectro electromagnético). Las ciencias responsables del estudio de cada uno de estos campos son, respectivamente, la fotometría y la radiometría.

De todas las frecuencias radiadas por el sol únicamente son visibles por el ojo humano aquellas frecuencias cuya longitud de onda se encuentran entre los 390 y 750 nm, correspondientes al espectro de la luz visible.

a) *La radiometría*

Es la ciencia relacionada con la medida de la radiación electromagnética, cuyo objeto de estudio es la energía transferida a través de la radiación solar en todas sus frecuencias. Sus parámetros más relevantes vinculados al objeto de estudio del presente trabajo fin de grado son los siguientes:

- **Energía radiante (Q_e):** se trata de la cantidad de energía incidente en una superficie en un cierto tiempo. Su unidad es la propia de la energía en el Sistema Internacional de Unidades (S.I.), el Julio (J).

- **Flujo o potencia radiante (ϕ_e):** describe la cantidad de energía radiante por unidad de tiempo. su unidad en el S.I. es el Vatio (W).
- **Irradiancia (E_e):** este concepto designa la cantidad de potencia radiante que atraviesa una superficie determinada. Su unidad del S.I. es el vatio por metro cuadrado (W/m^2).

b) La fotometría

Es la ciencia que habla sobre el estudio de la transferencia de aquella energía contenida en las frecuencias a las que es sensible el ojo humano, se restringe al rango visible del espectro y tiene en cuenta la respuesta del ojo humano. La fotometría también posee magnitudes características.

- **Energía luminosa (Q_v):** consiste en la fracción de energía solar transportada por la luz visible en un cierto tiempo. Su unidad de medida es el Talbot (T) que es equivalente a un lumen por segundo ($lm \cdot s$).
- **Flujo o potencia luminosa (ϕ_v):** representa la potencia de luz visible percibida y es la magnitud básica de la fotometría. Esta potencia varía en función de la longitud de onda recibida, siendo para la longitud de onda de 555 nm (la más fácilmente perceptible por el ojo humano) de 683 lm en presencia de 1 W de radiación. Su unidad en el S.I. es el lumen (lm).
- **Iluminancia (E_v):** consiste en el flujo luminoso que incide sobre una determinada superficie. Se mide en luxes ($lx=lm/m^2$) y es un concepto relacionado con la Irradiancia que será desarrollado más adelante.

Tabla 4

Comparativa entre magnitudes radiométricas y fotométricas

Magnitud radiométrica	Símbolo	Unidad	Magnitud fotométrica	Símbolo	Unidad
Energía radiante	Q_e	Julio (J)	Energía luminosa	Q_v	Talbot (T)
Fujo radiante	ϕ_e	Vatio (W)	Flujo luminoso	ϕ_v	Lumen (L)
Irradiancia	E_e	W/m ²	Iluminancia	E_v	$lx=lm/m^2$

Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Distribución Espectral de la radiación solar

El espectro solar que llega a la superficie de nuestro planeta está compuesto por radiación ultravioleta, luz visible e infrarroja. La Figura 14, muestra la distribución del espectro electromagnético en nanómetros (nm).

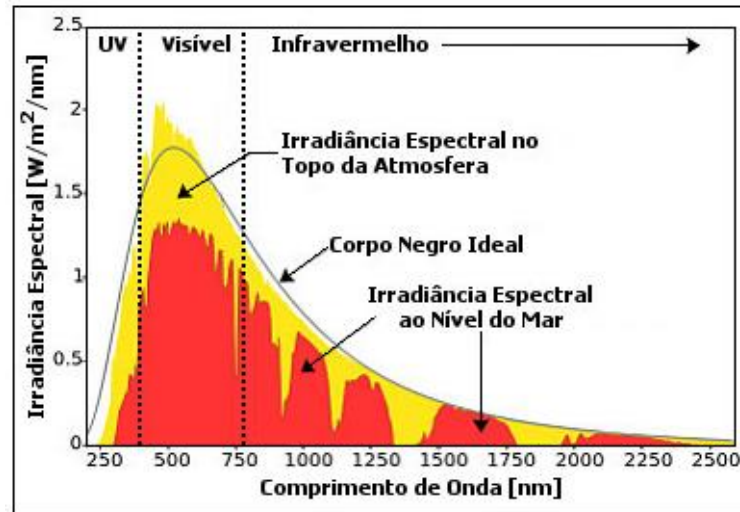


Figura 14. Espectro electromagnético (GeoDesign, 2020).

La luz visible, cual sea su origen ya sea natural como el sol, o artificial generado por una bombilla o led, está formado por un conjunto de radiaciones electromagnéticas que está contenida dentro de un determinado rango de frecuencias, al que se lo denomina espectro visible. La intensidad de la radiación luminosa varía con la frecuencia. El espectro de irradiación ultravioleta (UV) cubre longitudes de onda de 100 a 400 nm y normalmente se subdivide en tres subintervalos: UVA: entre 320 y 400 nm; UVB: entre 280 y 320 nm; y UVC: entre 100 y 280 nm (Andrade, 2016).

Tabla 5

Rangos de longitud de onda aproximados de la radiación solar y terrestre

Tipos de radiación solar	Longitud de onda
Ultravioleta	0,20 - 0,39 μm
Visible	0,39 - 0,78 μm
Infrarrojos	4,00 - 100,00 μm

Fuente: elaboración propia

2.5.3 Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta, conocida también como radiación UV, tiene la menor longitud de onda y es una parte del espectro electromagnético del rango comprendido 10 a 400 nm. Estas ondas son absorbidas por la parte alta de la atmósfera, especialmente por la capa de ozono. Por los efectos biológicos y nocivos en especial a la salud se divide en tres bandas (UV-C, UV-B y UV-A) como lo considera (Marenco et al., 2017).

Tabla 6
Tipos de radiación ultravioleta

Tipos de radiación	Longitud de onda	Efecto sobre la piel
UVA	400-135 nm	Pigmentación inmediata
UVB	315-280 nm	Pigmentación retardada
UVC	≤ 280 nm	Retenidos por la capa de ozono

Fuente: Elaboración propia

Rayos UV-A: con longitud de onda entre 315 a 400 nm esta es absorbida en menor cantidad por el ozono, esta radiación es la menos dañina llega en un 90 % de la radiación que corresponde al UV, produce efectos menos peligrosos por ser menos energéticos es responsable del bronceado de la piel y el envejecimiento (Chambi, 2018).

Rayos UV-B: con longitud de onda entre 280 a 315 nm, Esta radiación de baja longitud de onda y muy energética, produce daños, además reduce el crecimiento de plantas, la exposición prolongada a esta radiación causa daños a la piel, quemaduras o mutaciones en el ADN de las células cutáneas que a largo plazo podría generar cáncer (Chambi, 2018).

Rayos UV-C: con longitud de onda de 100 a 280 nm, este tipo de radiación es la más dañina y nociva principalmente para los seres vivos, pero afortunadamente, debido a su menor longitud de onda, no llegan a la superficie terrestre, esta radiación es absorbida por el oxígeno y el ozono en la estratosfera como lo mencionan (Chambi, 2018). También la radiación UV es dañina para las plantas, algas, etc.

2.5.4 Radiación visible

La radiación visible o espectro visible correspondiente a la zona visible por el ojo humano cuya longitud de onda está entre 400 nm (violeta) y 700 nm (rojo), por la energía que lleva, tiene gran influencia en los seres vivos como en el proceso de la fotosíntesis. Este

espectro es lo que hace que los objetos sean visibles a los ojos humanos. Los arcos iris son un ejemplo de refracción del espectro visible, la luz visible atraviesa con bastante eficacia la atmósfera limpia, pero cuando hay nubes o masas de polvo parte de ella es absorbida o reflejada (Andrade, 2016).

2.5.5 Radiación infrarroja

La radiación infrarroja cubre las longitudes de onda de 760 a 2500 nm, es la que corresponde a longitudes de onda más largas y lleva poca energía asociada. Este espectro es invisible para los ojos humanos y tiene aplicaciones en el área de imágenes. El CO_2 , el vapor de agua y las pequeñas gotas de agua que forman las nubes absorben con mucha intensidad las radiaciones infrarrojas (Pereira et al., 2017).

La atmósfera se desempeña como un filtro, para la radiación electromagnética ya que mediante sus diferentes capas distribuyen la energía solar para que a la superficie terrestre llegue solo una pequeña parte de esta energía.

2.5.6 Radiación solar extraterrestre

La radiación solar extraterrestre es la cantidad total de energía que proviene del Sol por unidad de área, que está presente en todo momento por encima de la atmósfera terrestre o frontera extraterrestre en cual varía a lo largo del año. El sol hace llegar un Irradiancia directa a la superficie de la atmósfera, se le acepta como representativo el valor del llamado también “Constante Solar” de $1367 \text{ W} / \text{m}^2$ propuesto por la Organización Meteorológica Mundial, valor considerado también por los autores (Quaschnig, 2005) y (Perpiñan, 2018). Desde la superficie de la Tierra, dicho valor varía en función del momento del día, estaciones del año, los componentes atmosféricos y la latitud.

2.6 Irradiancia

La Irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. La Irradiancia solar directa tiene una dirección de incidencia en la línea imaginaria entre la superficie y el Sol y representa la porción que no ha sufrido los procesos de absorción y dispersión radiactiva que ocurren en la atmósfera. El componente difuso abarca la radiación de todas las demás direcciones que son causadas por los procesos de propagación de gases y partículas presentes en la atmósfera (Pereira et al., 2017).

Eliseo (2020), refiere que no hay un valor único de Irradiancia debido a que la distancia Tierra-Sol no es constante además que la radiación solar disminuye o aumenta con la distancia a través de la Ley del Universo y la trayectoria elíptica Tierra-Sol.

La Irradiancia es la Potencia de la radiación incidente sobre una superficie por lo que la Unidad de la Irradiancia es KW / m^2 .

$$I = \frac{P_{inc}}{A}$$

I = Irradiancia Solar en (W / m^2).

P_{inc} = es la potencia incidente.

A = es el área de la superficie en que incide la onda (m^2).

Tabla 7
Componentes de Irradiancia Solar

Símbolo	Nombre	Significado
G_0	Irradiancia extraterrestre	Tasa de energía incidente por unidad de área en un plano horizontal imaginario situado en la parte superior de la atmósfera.
G_n	Irradiancia directa normal	Tasa de energía por unidad de área que proviene directamente del sol que incide perpendicularmente a la superficie.
G_{dif}	Irradiancia difusa horizontal	Tasa de energía incidente sobre una superficie horizontal por unidad de área, resultante de la dispersión del rayo solar directo por los constituyentes atmosféricos.
G_{dir}	Irradiancia directa horizontal	Tasa de energía por unidad de área del rayo solar directo sobre una superficie horizontal. Puede determinarse como el producto entre la Irradiancia directa normal y el coseno del ángulo cenital solar.
G	Irradiancia global horizontal	Tasa de energía total por unidad de área incidente sobre una superficie horizontal. La Irradiancia global viene dada por la suma de $G = G_{dif} + G_{dir}$ o $G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$.
G_i	Irradiancia en el plano inclinado	Tasa de energía total por unidad de área incidente en un plano inclinado en la latitud de la ubicación en relación con la superficie de la Tierra.

Fuente: Adaptado de Pereira et al. (2017)

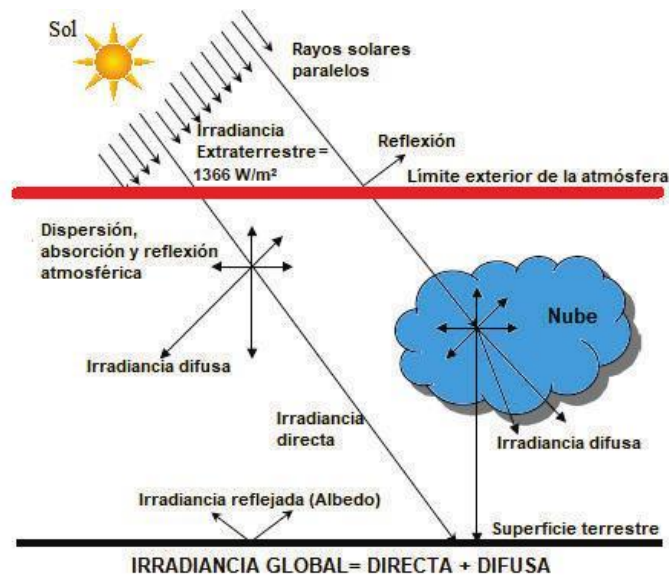


Figura 15. Irradiancia directa, difusa y reflejada (Collaguazo, 2019)

2.7 Irradiación solar

La irradiación también conocida como insolación se refiere a la cantidad de energía solar recibida durante un determinado periodo de tiempo (KWh / m^2). Eliseo, (2020) señala que la Insolación se le conoce como a la Acumulación de Energía promedio durante un período de Tiempo (día, mes, anual, estacional). Es la misma irradiancia, pero considerando un tiempo promedio de permanencia sobre una superficie. Sus unidades de medida son:

$$\text{cal/cm}^2, \text{MJ/m}^2, \text{Btu/ft}^2, \text{KWh} / m^2$$

2.8 La insolación solar

La insolación u hora solar pico (HSP) concierne a la cantidad de energía emitida por el sol en forma de radiación solar que llega en la superficie horizontal de la Tierra en un día correcto (insolación diurna) o en un año (insolación anual). En otras palabras, es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. Su unidad es el Watts-hora por metro cuadrado (KWh / m^2). También se puede expresar en hora pico solar (HPS), equivalente a la energía recibida durante un tiempo determinado (Gomez, 2015)



Figura 16. Curva entre la irradiación diaria y las HPS (Gomez, 2015)

2.8.1 Factores que influyen con el nivel de radiación solar en la superficie

La radiación solar que llega sobre una superficie plana tiene variaciones, estas variaciones se deben básicamente a factores astronómicos, atmosférico y de orientación. A continuación, una descripción de cada uno de ellos:

a) *Angulo de incidencia solar*

Según Andrade, (2016), la incidencia de la radiación solar, en cualquier lugar del planeta, depende de la posición instantánea del sol en el cielo. El ángulo de acimut se forma entre la proyección horizontal del rayo solar y se mide en el sentido de las agujas del reloj, desde norte geográfico (acimut igual a 0°). El ángulo vertical, formado entre esta proyección y el rayo de sol, es la altura solar, que se mide desde el plano horizontal y varía de 0° a 90° . La altura del sol es máxima cuando alcanza el punto más alto del cielo al mediodía; esta posición se conoce como el cenit.

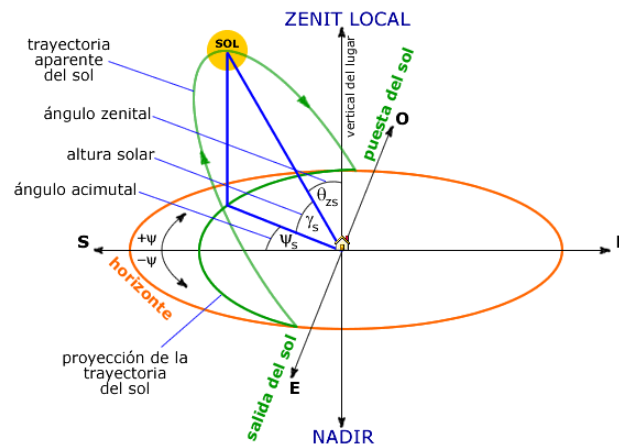


Figura 17. Posición del sol respecto a superficies horizontales (Pereira et al., 2017).

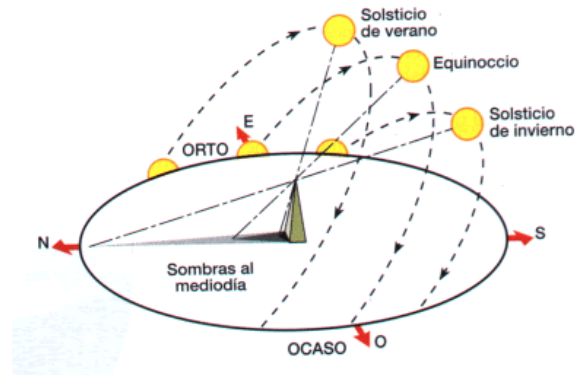


Figura 18. Rango de valores del ángulo de declinación (Pereira et al., 2017).

b) Latitud

La cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre depende de la altura del Sol, los niveles de radiación solar aumentan cuanto más cerca están del ecuador, donde los niveles de radiación son muy altos. Sin embargo, a medida que el sitio está más lejos del ecuador, en las regiones polares los niveles de radiación debido a este efecto son bajos o moderados, incluso en verano (Rodríguez, 2015).

c) Altitud

Los niveles de radiación solar dependen de la altura sobre el nivel del mar. A mayor altitud la atmósfera es más delgada y absorbe una menor proporción de radiación. La radiación solar viaja una distancia más corta a través de la atmósfera y por lo tanto, los niveles de irradiación son mayores cuando se consideran ubicaciones adyacentes y en condiciones de cielo despejado (Rodríguez, 2015).

d) Estaciones del año

Las estaciones se caracterizan por variaciones a lo largo del año y en los momentos que varía la intensidad de la radiación solar en nuestra superficie terrestre, debido al movimiento de traslación y la inclinación existe una variación en la cantidad de radiación solar recibida en diferentes épocas del año. La Tierra toma diferentes posiciones con respecto a la incidencia de la energía radiante en sus hemisferios, provocando que el ángulo de incidencia de los rayos solares influya en la potencia de radiación recibida (Paulo & Ramos, 2017).

2.8.2 Instrumentos de medición de Irradiancia solar

a) *Pirheliómetros*

El pirheliómetro es un radiómetro que utiliza el mismo principio de medida de la radiación solar empleada en el piranómetro por termopila. Sin embargo, este instrumento está equipado con un colimador con suficiente apertura para permitir que solo el componente directo normal de la radiación solar (G_n) afecte al sensor. La radiación directa normal se mide con un pirheliómetro, instrumento de tipo telescópico con una apertura de pequeño diámetro. Las superficies receptoras del pirheliómetro deben mantenerse en todos momentos perpendiculares a la dirección de la radiación solar. Un instrumento cuyo comportamiento ha sido determinado con un alto grado de precisión se denomina pirheliómetro absoluto (Pinho & Galdino, 2016).



Figura 19. Pirheliómetro (Pinho & Galdino, 2016)

b) *Piranómetro*

Según Pereira et al., (2017), define que el piranómetro es un instrumento diseñado para medir la Irradiancia solar global (directa + difusa) mediante una termopila que convierte la energía térmica en energía eléctrica. La termopila está recubierta con una tinta negra especial para simular la respuesta de un "cuerpo negro" de modo que la energía solar radiante incidente sea prácticamente absorbida y convertida en calor y que, a su vez, se convierte en una diferencia de potencial eléctrico proporcional a la Irradiancia solar incidente en la termopila. A diferencia de los pirheliómetros, los elementos sensores son planos que a su vez está montada en un casco aislado. El sensor está rodeado por uno o dos hemisferios de cristal de cuarzo que debe ser transparente para cualquier longitud de onda.



Figura 20. Piranómetro tipo termopila (Rodríguez, 2015).

2.9 Iluminancia

La iluminancia depende profundamente del flujo luminoso, que es la potencia con la que incide la luz visible. Esta potencia varía en función de la longitud de onda recibida, siendo, para la longitud de onda de 555 nm (la más fácilmente perceptible por el ojo humano en casos de respuesta ocular fotópica) de 683 lm en presencia de 1 W de radiación. La iluminancia recibida en la Tierra por el Sol fluctúa a lo largo entre valores de 0 a 120 Klux. Estas fluctuaciones se deben a posición orbital de la Tierra, lo que también hace variar su distancia al Sol, de la latitud en la que incide y, sobre todo, de la atmósfera y de la meteorología (Gimenez, 2019).

La medición de la iluminancia se realiza con instrumentos llamados luxómetros, que funcionan por medio de una célula fotovoltaica o mediante una fotorresistencia.

2.10 Nubes

Las nubes son manifestaciones visibles de condensación y deposición de vapor de agua en la atmósfera. Pueden definirse como conjunto de pequeñas partículas de agua líquida o hielo, o una mezcla de ambos al mismo tiempo. El vapor de agua es un gas invisible, pero los productos de condensación y deposición de vapor son visibles. Las nubes son manifestaciones visibles de condensación y deposición de vapor de agua en la atmósfera. Los principales factores que intervienen en la descripción de la apariencia de una nube son sus dimensiones, forma, estructura y textura, así como su luminancia y color. Estos factores son el principal atenuador de la radiación solar en la atmósfera mete (Grimm, 2020).

Según el atlas internacional de las nubes de la OMM (organización meteorológica mundial), se tiene 3 categorías de nubes en términos de su ubicación según su altura y apariencia.

- **Nubes altas.** - Tienen una base de más de 6 km de altura: sólida (formada por cristales de hielo).
- **Nubes medias.** - Se basan en 2 a 4 km de altura en los polos, entre 2 y 7 km en latitudes medias y entre 2 y 8 km en el ecuador: líquido y mixto (formado por gotas de agua y cristales de hielo).
- **Nubes bajas.** - Tienen una base de hasta 2 km de altura - líquida (formada por gotitas de agua).

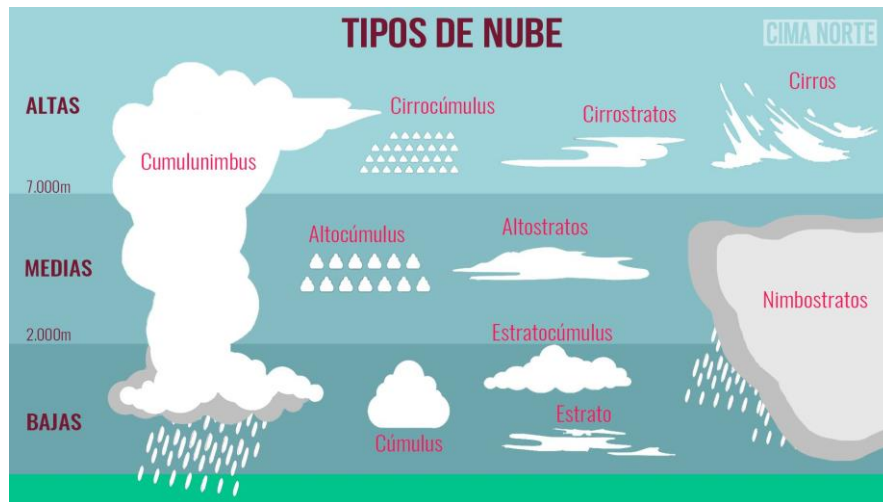


Figura 21. Presenta los diferentes tipos de nubes con sus altitudes medias (Andrade, 2016).

2.11 Protocolo MQTT

El protocolo MQTT, cuyas siglas corresponden (Message Queuing Telemetry Transport), es un protocolo de comunicación de mensajes Cliente/Servidor basado en publicaciones y suscripciones, que se desarrolla principalmente para conectar dispositivos a través de redes inalámbricas. Es un protocolo de comunicación y mensajería muy simple entre varios dispositivos, para su aplicación en internet de las cosas o IOT. Está basado en el envío de datos comprimidos a los servidores de medida vía Wifi empleando un protocolo ampliamente utilizado en el internet de las cosas. Este protocolo es de aplicación tanto para manejo de actuadores por parte de dispositivos de control como para lectura de datos procedentes de un sensor generalmente en tiempo real (Gimenez, 2019).

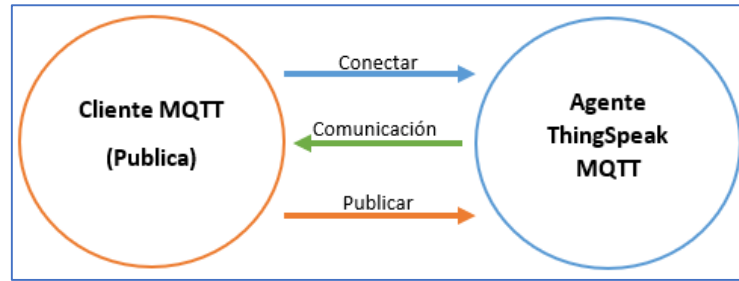


Figura 22. Describe la estructura de publicación MQTT (MathWorks, 2020).

2.12 EL bus I2C

El bus I2C (Inter Integrated Circuit Communications) es un protocolo de comunicación entre dispositivos, que fue desarrollado por Philips en 1982 para la comunicación interna de dispositivos electrónicos en sus proyectos. Actualmente es empleado por todos los dispositivos electrónicos que emplean procesadores o microcontroladores. El bus I2C funciona en el modelo maestro-esclavo, con al menos un dispositivo actuando como maestro y los otros dispositivos actuando como esclavo, el dispositivo maestro inicia la comunicación con los esclavos, y puede mandar o recibir datos de los esclavos y requiere únicamente dos cables para su funcionamiento, uno para la señal de reloj (CLK) y otro para el envío de datos (SDA) (Mendonça, 2016).

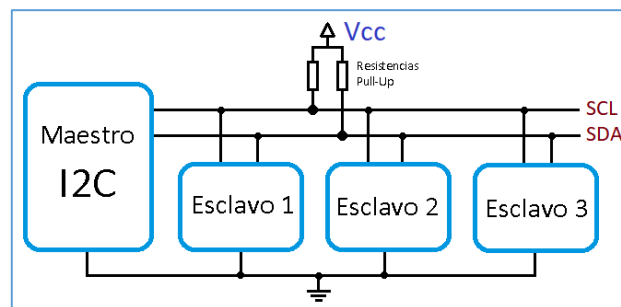


Figura 23. Estructura de conexión del bus I2C (Mendonça, 2016).

2.13 Eventos extremos de Irradiancia debido a la contribución de las nubes

Según Yordanov et al. (2012), realizó estudios de medición de eventos extremos de Irradiancia solar al (sur de Noruega, latitud $58^{\circ} 21'N$), casi al nivel del mar utilizando 2 sensores de Irradiancia en paralelo, alcanzando así una medición de 1150 W/m^2 con el piranómetro de termopila con una resolución temporal de 20 segundos y una medición que supera los 1300 W/m^2 con la celda fotovoltaica con una resolución de 10 ms, lo que explica que los eventos extremos de Irradiancia solar son presenciados a nivel de milisegundos o segundos. Los eventos

de sobreirradiación en el sur de Noruega pueden ser bastante frecuentes, lo que explica que la Irradiancia solar alcanza su punto máximo en condiciones parcialmente nubladas.

El análisis de las variaciones de Irradiancia que se producen en una escala de tiempo, a resoluciones de 1 segundo es ventajoso en relación con el muestreo cada minuto. Sin embargo, muy pocos laboratorios en el mundo parecen registrar la Irradiancia a resoluciones inferiores a 1 minuto. Es por ello que el tiempo de respuesta del sensor se convierte en un factor limitante. Por lo tanto, los piranómetros de termopila no se recomiendan para estudios detallados de Irradiancia extrema, mientras que los dispositivos con fotodiodos basados en FV pueden tener tiempos de respuesta satisfactorios, del orden de milisegundos (Andrade, 2016).

Según Piacentini, Salum, Fraidenraich, & Tiba, (2011), señala que las variaciones o mejora de Irradiancia solar se producen en condiciones específicas de nubosidad parcial. Estos períodos de mayor Irradiancia solar pueden durar desde varios segundos hasta algunos minutos, según el movimiento de las nubes. Propuso que se presentan en las siguientes condiciones

- Presencia de cúmulos alrededor del disco solar con el sol despejado, es decir, las nubes no deben estar presentes entre disco solar y el punto de medición en el suelo. La radiación directa del sol debe reflejarse en los bordes de las nubes.
- La cobertura mínima de nubes no debe ser inferior al 50% y la máxima no debe superar el 90%, permitiendo así parches de cielo despejado entre nubes.
- Las nubes deben ser muy espesas para dispersar la radiación solar. y aumentar la intensidad de la Irradiancia difusa.

En instalaciones pequeñas, la ocurrencia del fenómeno de Irradiancia extrema puede iniciar arcos eléctricos en los módulos y causar daños parciales a las células fotovoltaicas. Como señala G. Yordanov et al., (2012), sobre estos efectos, indican que estas severas condiciones de operación de los módulos fotovoltaicos pueden ocurrir naturalmente en todas las latitudes dentro de $\pm 60^\circ$ de latitud alrededor del ecuador. Por lo tanto, el uso de equipos de detección de arco es altamente recomendado en todos los sistemas fotovoltaicos con tensiones nominales superiores a cierto nivel. De igual manera estas condiciones de Irradiancia extrema posiblemente, estos efectos nocivos también pueden estar asociados al aporte de las nubes en relación con el aumento de la radiación solar UV sobre los organismos vivos.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta los materiales y metodología utilizados para el desarrollo de la plataforma sensorial, basada en medición de variables eléctricas de módulos fotovoltaicos y parámetros ambientales a través de un microcontrolador y sensores. Se describen las herramientas utilizadas como (hardware y software libre), que se tomaron como base y sustento para realizar el desarrollo de cada etapa del proyecto de investigación.

3.1 Formulación de hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

La plataforma sensorial basado en IOT y con autonomía energética hará posible la medición y monitoreo in situ de eventos extremos de Irradiancia solar (Irradiancia extrema $>1000 \text{ W/m}^2$) e Irradiancia muy extrema (1300 W/m^2) en Puno y Juliaca.

3.1.2 Hipótesis específico

- El microcontrolador ESP8266 y sensores serán adecuados para la comunicación y almacenamiento de datos en el monitoreo in situ de eventos extremos de Irradiancia solar.
- El módulo fotovoltaico calibrado hará posible la medición e identificación de eventos extremos de Irradiancia solar (Irradiancia extrema $>1000 \text{ W/m}^2$) e (Irradiancia muy extrema $> 1300 \text{ w/m}^2$) en Puno y Juliaca.
- Los parámetros geográficos y climatológicos influirán en los datos registrados de eventos extremos de Irradiancia solar en la medición y monitoreo in situ en Puno y Juliaca.

3.2 Materiales

3.2.1 Recursos Materiales o Equipos

El NodeMCU ESP8266

NodeMCU es una placa de desarrollo basada en el módulo WiFi ESP-12E, que combina el chip ESP8266, que es el nombre de un micro controlador diseñado por Espressif Systems, preparado para comunicación inalámbrica de baja potencia, que funciona con la red

WiFi a una frecuencia de 2.4 GHz. El NodeMCU tiene una antena incorporada y un conector micro-usb para la conexión a la computadora y un regulador de voltaje de 3.3 V. La programación se puede hacer usando LUA o Arduino IDE, un componente electrónico desarrollado especialmente para proyectos robóticos o de automatización y prototipos orientados a IOT, con mayor facilidad y bajo costo (FilipeFlop, 2018).

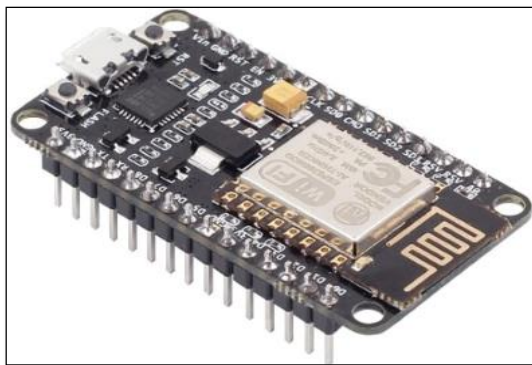


Figura 24. Placa de desarrollo NodeMCU ESP8266 con WiFi (FilipeFlop, 2018).

Tabla 8
Especificaciones del NodeMCU ESP8266

N°	Ítems	Parámetros
1	Voltaje de funcionamiento	4.5 ~ 9 V
2	Protocolos	802.11 b/g/n (HT20)
3	Procesador CPU	Tensilica L106 32-bit processor
4	Voltaje de salida en los pines	2.5 V ~ 3.6 V
5	Consumo de corriente	10 μ A – 200 Ma
6	Memoria Flash	4 MB
7	Velocidad de transferencia	300 bps a 1.5 Mbps
8	Máximas conexiones simultáneas	Admite 5 TCP/IP
9	Conexión	Micro-Usb

Fuente: Elaboración propia

Mini módulos fotovoltaicos

Es un dispositivo utilizado en el desarrollo de proyectos electrónicos para obtener y generar energía a través de la luz solar, que es muy eficiente hoy en día. La energía eléctrica producida se convierte a través de células solares integradas en el Mini Panel Solar y responsables de capturar la luz solar. Es un equipo que utiliza una gran tecnología y practicidad por su tamaño para aquellos aficionados en la electrónica que quieran hacer sus proyectos y estudios al nivel de microescala.



Figura 25. Modulo Solar Fotovoltaico 5.5V 240mA (USINAINFO, 2020).



Figura 26. Modulo Solar Fotovoltaico 5V 500mA (USINAINFO, 2020).

Tabla 9
Especificaciones de los mini módulos FV

N°	Ítems	Módulo FV 2.5 Wp (Alimentación)	Módulo FV 1.3 Wp (Sensor de Irradiancia)
1	Potencia	2.5 Wp	1.3 Wp
2	Voltaje Voc	5 V	5.5 V
3	Corriente Isc	500 mA	240 mA
4	Eficiencia	17 %	17 %
5	Dimensiones (LxWxH)	130x150x3 mm	135x64,7x2 mm
6	Peso	Peso: 85 g	25,4 g

Fuente: Elaboración propia

Sensor de Voltaje y Corriente INA219

Es un pequeño módulo electrónico desarrollado para su aplicación en varios circuitos eléctricos. A través de Arduino, AVR, PIC, Raspberry PI, prototipos u otras plataformas es posible medir el voltaje y la corriente continua. El principal diferencial de este modelo es su alta precisión de medición, que permite voltajes continuos entre 0 y 26 V CC, además de permitir una corriente máxima de 3.2A con una increíble capacidad de resolución de 0.8mA usando el ADC interno (convertidor analógico digital). Muy fácil de integrar con otros módulos electrónicos y microcontroladores, tiene comunicación tipo I2C, lo que significa que puede funcionar junto con el módulo ESP8266, con Arduino o cualquier otro con interfaz

I2C admite hasta 128 mediciones continuas para una mayor precisión de lectura (Texas Instruments, 2011).

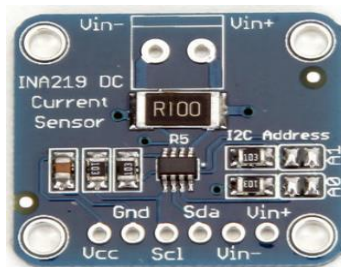


Figura 27. Sensor de corriente CC INA219 I2C (FilipeFlop, 2018).

Tabla 10

Especificaciones del sensor INA219

Nº	Ítems	Parámetros
1	Fuente de alimentación	3.3 a 5V DC
2	Tensión de medición	0 ~ 26V DC
3	Corriente de medición	0 ~ 3.2A (precisión ± 0.1 a ± 0.8 mA)
4	Interfaz	I2C
5	Dimensiones (LxWxH)	25.5x22x10mm
6	Peso	3 g

Fuente: Elaboración propia

Sensor de presión y temperatura

El sensor de presión BMP280 es un módulo electrónico capaz de medir la presión atmosférica y la temperatura. También conocido como barómetro, es un módulo digital de alta capacidad y resolución, utilizado en las más diversas aplicaciones junto con microcontroladores, entre ellos, Arduino. A través de su conexión por defecto I2C o SPI, la presión del sensor BMP280 aumenta su practicidad de uso y contribuye a la mayor precisión de obtener resultados, y el bajo consumo de energía le permite funcionar durante largos períodos con batería (Bosch, 2015).

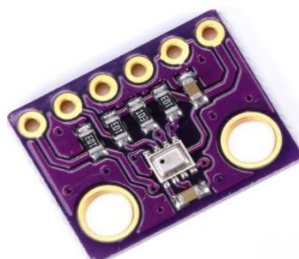


Figura 28. Sensor de Temperatura y Presión BMP280 (FilipeFlop, 2018).

Tabla 11
Especificaciones del sensor BMP280

N°	Ítems	Parámetros
1	Fuente de alimentación	3.3 V DC
2	Rango de temperatura	40 a 85° C
3	Precisión de temperatura	± 1.0 ° C
4	Rango de presión	300 a 1100hPa
5	Precisión de presión	± 0.12hPa
6	Interfaz de comunicación	I2C y SPI
7	Dimensiones (LxWxH)	15.5x11.5x2.5mm
8	Peso	1.5 g

Fuente: Elaboración propia

Módulo de reloj de tiempo real RTC DS3231

El DS3231 Real Time Clock (RTC) es un reloj en tiempo real de alta precisión y bajo consumo de energía, es un módulo compacto que tiene la capacidad de calcular el tiempo con precisión, realizando el recuento exacto de segundos, minutos, horas, así como días, semanas, meses y años. La aplicación del DS3231 Real Time Clock Module se realiza en placas de microcontroladores, con la función de registrar y controlar fechas y horas. Permitir que la placa del microcontrolador realice varias tareas programadas en las fechas y horas correctas (Maxim Integrated, 2015).



Figura 29. Reloj de tiempo real RTC DS3231 (FilipeFlop, 2018).

Tabla 12
Especificaciones del módulo RTC DS3231

N°	Ítems	Parámetros
1	Fuente de alimentación	3.3 a 5 V DC
2	Rango de temperatura	0 a 40 ° C
3	Precisión del sensor de temperatura	± 3 ° C
4	Almacenamiento de memoria	AT24C32 EEPROM I2C 32K
5	Interfaz de comunicación	I2C
6	Dimensiones (LxWxH)	38x23x11mm
7	Peso	5 g

Fuente: Elaboración propia

Módulo de tarjeta SD Card / Micro SD Card

Este módulo de tarjeta SD permite leer y escribir en la tarjeta SD, con una fácil conexión a Arduino y otros microcontroladores. Todos los pines de conexión se identifican en el módulo, que admite formatos de archivo FAT16 y FAT32, y alimentación de 3.3V o 5V. La comunicación se realiza a través de la interfaz SPI (pines MOSI, SCK, MISO y CS), y el nivel de señal es de 3.3V, lo que requiere un divisor de voltaje para conectarse a microcontroladores de 5V, como Arduino (USINAINFO, 2020).



Figura 30. Modulo Arduino Micro SD Card (FilipeFlop, 2018).

Tabla 13

Especificaciones del módulo Micro SD Card

N°	Ítems	Parámetros
1	Fuente de alimentación	3.3V o 5 V DC
2	Interfaz de comunicación	SPI: MOSI, SCK, MISO y CS
3	Formato	FAT16 o FAT32
4	Dimensiones (LxWxH)	41 x 24 mm
5	Peso	5 g

Fuente: Elaboración propia

Pantalla LCD 16X2

La pantalla LCD 16x2 es una pequeña pantalla con un fondo azul que se utiliza en el desarrollo de proyectos de automatización robótica y el hogar, que es compatible con un gran número de sistemas de microcontroladores de gran utilidad para la presentación y visualización de información junto a los proyectos.



Figura 31. Pantalla LCD (FilipeFlop, 2018).

Tabla 14
Especificaciones del LCD 16X2

N°	Ítems	Parámetros
1	Voltaje de operación	4.5 ~ 5.5 V DC
2	Corriente de trabajo	1.0 mA ~ 1.5 mA
3	Voltaje del LED (luz fondo)	1.5 V ~ 5.5 V
4	Corriente del LED (luz fondo)	75 mA ~ 200 mA
5	Interfaz de comunicación	I2C
6	Dimensiones (LxWxH)	80x36x10mm
7	Peso	30 g

Fuente: Elaboración propia

Módulo cargador de batería de litio TP4056

Módulo cargador de batería TP4056 para baterías de litio, con led indicador de carga y fácil conexión por cable mini USB, no necesita quitar la batería del circuito para cargarlo, ya que todo el proceso de carga lo realiza el módulo utilizando una fuente externa o incluso el USB de la computadora. TP4056 es un componente que proporciona voltaje y corriente continuamente para baterías de litio de celda única, con protección térmica. El módulo también tiene un circuito de protección para evitar daños a la batería de litio, que es sensible a las sobrecargas de voltaje y corriente (Corp, 2015).



Figura 32. Módulo cargador de batería de litio TP4056 (FilipeFlop, 2018).

Tabla 15
Especificaciones del módulo cargador de batería de litio TP4056

N°	Ítems	Parámetros
1	Voltaje de operación	4.5V ~ 5.5V DC
2	Corriente de carga	1A (ajustable)
3	Voltaje de carga completa	4.2V DC
4	Temperatura de trabajo	-10°C a 85°C
5	Precisión de carga	1.5%
6	Interfaz	Micro USB
7	Dimensiones (LxWxH)	26x17x4mm
8	Peso	1,8 g

Fuente: Elaboración propia

Baterías ion litio

La batería 18650 es una excelente opción para el almacenamiento de energía en proyectos electrónicos de los tipos más diversos, es una batería cilíndrica recargable de 3.7V, lo que significa que puede usarse cientos de veces después de la recarga. La plataforma sensorial esta implementado y configurado por 2 baterías de ICR18650 Li-ion 3.7 Vcc / 6.0 Ah conectados en paralelo.



Figura 33. Batería recargable de iones de litio 3.7 V (FilipeFlop, 2018).

Multímetro FLUKE 179

El Multímetro digital portátil de verdadero valor eficaz con pantalla retroiluminada y medidor de temperatura. Gracias a su precisión, confiabilidad y facilidad de uso, el multímetro inalámbrico de valor eficaz verdadero Fluke 179 es perfecta para medir y solucionar problemas y reparar muchas averías de los sistemas eléctricos y electrónicos, este tester ha superado las más exigentes pruebas para garantizar su utilización de forma segura en entornos CAT IV 600V y CAT III 1000V.

Tabla 16

Especificaciones eléctricas del multímetro FLUKE 179

Especificaciones		
Tensión de CC	Precisión	$\pm(0.09 \% + 2)$
	Resolución máxima	0.1 mV
	Máximo	1000V
Tensión CA	Precisión	$\pm(1.0 \% + 3)$
	Resolución máxima	0.1 Mv
	Máximo	1000V
Corriente CC	Precisión	$\pm(1.0 \% + 3)$
	Resolución máxima	0.01 mA
	Máximo	10 A
Corriente CA	Precisión	$\pm(1.5 \% + 3)$
	Resolución máxima	0.01 mA
	Máximo	10 A
Resistencia	Precisión	$\pm(0.9 \% + 1)$
	Resolución máxima	0.1 Ω
	Máximo	10 M Ω
Capacidad	Precisión	$\pm(1.2 \% + 2)$
	Resolución máxima	1 nF
	Máximo	10.000 uF
Frecuencia	Precisión	$\pm(0.1 \% + 1)$
	Resolución máxima	0.01 Hz
	Máximo	100 kHz



Figura 34. Multímetro digital FLUKE 179 (Elaboración propia).

Clinómetro y brújula Suunto Tandem 360pc/360r

Suunto Tandem es una combinación de clinómetro y brújula de precisión. Es un instrumento de precisión relleno de líquido con brújula de precisión e inclinómetro dentro de una compacta carcasa de aleación anodizada. Cuenta con escalas de medición en grados y porcentaje, medición precisa de direcciones con corrección de declinación ajustable, lectura óptica de la tarjeta para mayor precisión y roscas para montaje en trípode para un funcionamiento estables.

Tabla 17

Especificaciones técnicas del clinómetro Suunto Tandem 360cp/360r

Especificaciones		
Clinómetro	Balanzas clinómetro	$0 \pm 90^\circ$, $0 \pm 150\%$
	Precisión de alineación	$1/4^\circ$
	Resolución de inclinación	1° y 1%
Brújula	Escala de dirección	Grados
	Precisión de brújula	$1/3^\circ$
	Resolución de brújula	$1/2^\circ$
Características	Dimensiones	126 x 76 x 15 mm
	Peso	177 g
	Observación	Óptica
	Material de vidrio	Acrílico
	Tipo de batería	No requiere batería

Fuente: Elaboración propia



Figura 35. Clinómetro Suunto Tandem 360cp/360r (Elaboración propia).

Modulo fotovoltaico calibrado (Patrón)

El equipo que se utilizó como modelo o patrón para la calibración de los datos, es un módulo fotovoltaico i925W-Slim poli cristalino (po-Csi), para la comparación y validación de los datos con la plataforma sensorial implementado. Los parámetros del módulo fotovoltaico patrón en condiciones de prueba estándar, fueron obtenidos de pruebas de simulador solar, realizados en las instalaciones del Grupo de Estudios y Desarrollo en Energías Alternativas (GEDAE) de la Universidad Federal de para (UFPA) en la ciudad de Belén – Brasil. Figura 36, muestra el MODULO FV CALIBRADO.

Tabla 18

Especificaciones del MODULO FV CALIBRADO (patrón)

DIRETO – i925 – Slim		Irradiance Channel	
			1
Monitor cell temperature	25.16 °C	Fill factor	70.98 %
DUT temperature	25.97 °C	Cell efficiency	14.36 %
Compensated	25.00 °C	DUT efficiency	12.46 %
Gavg	999.71 W/m ²		
GstdDev	0.15 W/m ²		
Compensated Irradiance	1000.00 W/m ²		
Regression linear for Voc	3.728 V		
Linear regresión Isc	7.926 A		
Regression linear for	0.080 Ω		
Regression linear for	100.570 Ω		
Maximun power	20.975 W		
Voltage at maximun	2.847 V		
Current at maximun	7.366 A		

Fuente: Elaboración propia



Figura 36. Modulo fotovoltaico calibrado (patrón) (Elaboración propia).

3.3 Metodología

El presente trabajo de investigación se desarrolló entre los meses de enero a septiembre 2020. La Figura 37, muestra el diagrama de desarrollo de la investigación.

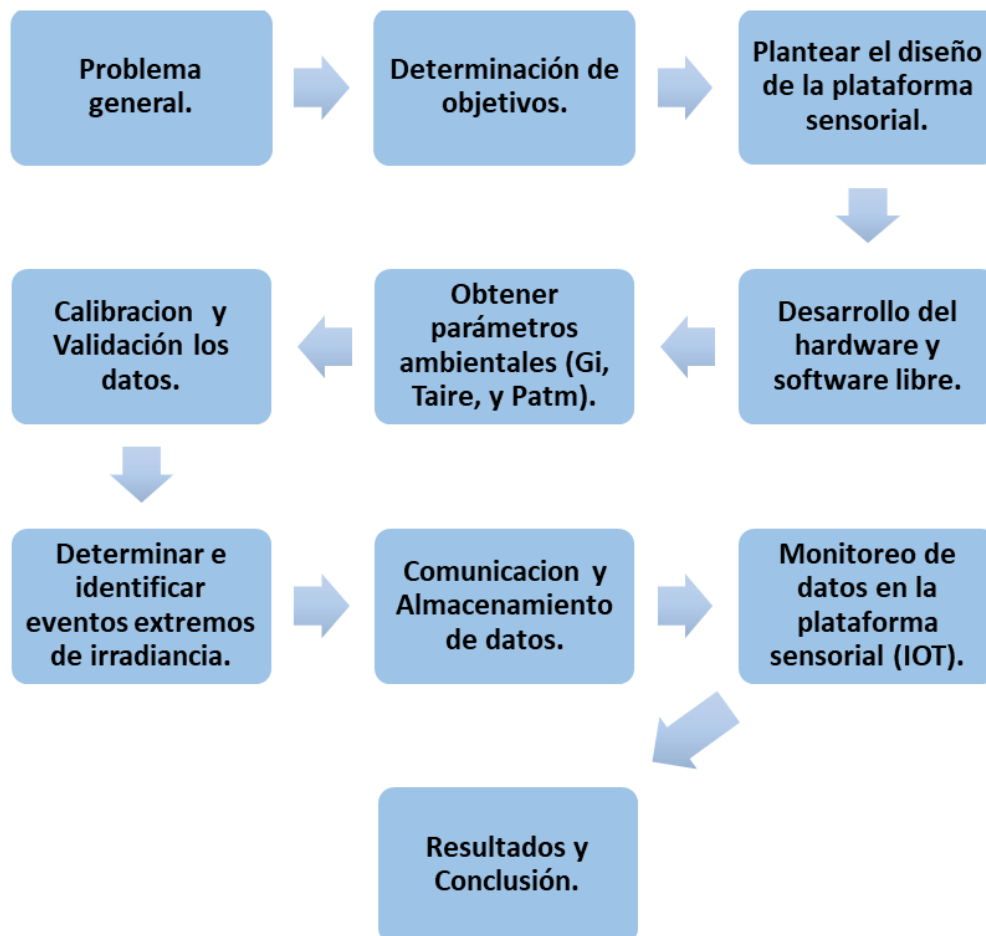


Figura 37. Diagrama de la metodología propuesta (elaboración propia).

3.3.1 Método de la investigación

Tipo y nivel de investigación

De acuerdo a los objetivos de la investigación de desarrollo, implementación, identificación y análisis de la plataforma de medición de eventos extremos de Irradiancia solar, Se realizo una investigación del nivel exploratorio y descriptivo, pues no se cuenta con investigaciones, información y antecedentes sobre la presente tesis. Así mismo se busca descubrir la situación y condición de estos fenómenos de eventos extremos de Irradiancia solar en nuestra región altiplánica, para poder comprobar y conocer en las condiciones que se presentan estos fenómenos. El tipo de investigación es tecnológico y aplicativo, que principalmente se vinculan a las ciencias de la ingeniería.

Método y diseño de la investigación

El enfoque de nuestra investigación es cuantitativo. El diseño de investigación es no experimental, además como el objetivo de la tesis es desarrollar una plataforma de medición y monitoreo de eventos extremos de Irradiancia solar, en nuestro estudio no se pretende manipular variables para analizar las consecuencias del fenómeno. El análisis por nuestra parte será de manera natural o sea observar las variables en su contexto natural. Se realizo una investigación transversal de un periodo de 6 meses debió a que estas investigaciones se recolectan datos en diferentes periodos. Como ya se había mencionado la investigación es exploratoria y descriptiva el cual generalmente se aplica a problemas de investigación poco conocidos o nuevos.

Línea de investigación

La principal línea de investigación es el campo de “generación de energía eléctrica con recursos energéticos renovables”, donde se encuentra la radiación solar, tema y objeto de investigación.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

El estudio se llevó a cabo en las ciudades de Puno y Juliaca. la investigación se realizó en viviendas de dichos lugares, para su recolección de datos y poder compararlas entre estas. Para nuestro enfoque cuantitativo, la recolección de datos es medir las variables en el periodo ya mencionado anteriormente, donde se busca identificar y obtener la información necesaria para poder describir y su posterior análisis sobre la ocurrencia de los eventos extremos de Irradiancia solar. El instrumento por el medio del cual se pretende obtener estos datos es la

plataforma de medición desarrollado en el proyecto de investigación. Está basado en las normas estándar IEEE 802.11, el cual se basa en redes de comunicación.

Técnicas de procesamiento de datos

Se utilizará el programa Microsoft office Excel. La técnica que se utiliza en el procesamiento de datos será la estadística descriptiva que consiste en un conjunto de procedimientos que tienen por objeto presentar masas de datos por medio de tablas, gráficos.

3.3.2 Metodología para la Arquitectura de la plataforma sensorial

Presentamos una breve descripción del trabajo desarrollado que es implementar una plataforma sensorial para la medición y monitoreo de parámetros ambientales rentable y autónomo, analizado en las condiciones geográficas y climatológicas de las ciudades de Puno y Juliaca. La implementación y arquitectura de la plataforma sensorial proporcionan el desarrollo de soluciones de medición y monitoreo en cualquier parte de la región y lugares con recursos limitados sin necesidad de estar conectado a la red eléctrica convencional y así obtener datos de una manera fácil y económica.

a) Diagrama de bloques

El diagrama de bloques de la plataforma sensorial muestra las diferentes etapas que fueron considerados inicialmente para su desarrollo. Según el diagrama, la plataforma comprende 3 etapas.

- **Etapa de medición.** - constituido por el sensor de corriente INA219, sensor BMP280 y el mini módulo fotovoltaico.
- **Etapa de procesamiento.** - comprende la etapa de procesamiento de las señales analógicas en digitales A/D mediante la programación y comunicación de los datos con la interfaz I2C con el microcontrolador.
- **Etapa de comunicación y monitoreo.** - constituida por un dispositivo de salida como el LCD, memoria SD y el monitoreo en el servidor de ThingSpeak del (IOT).

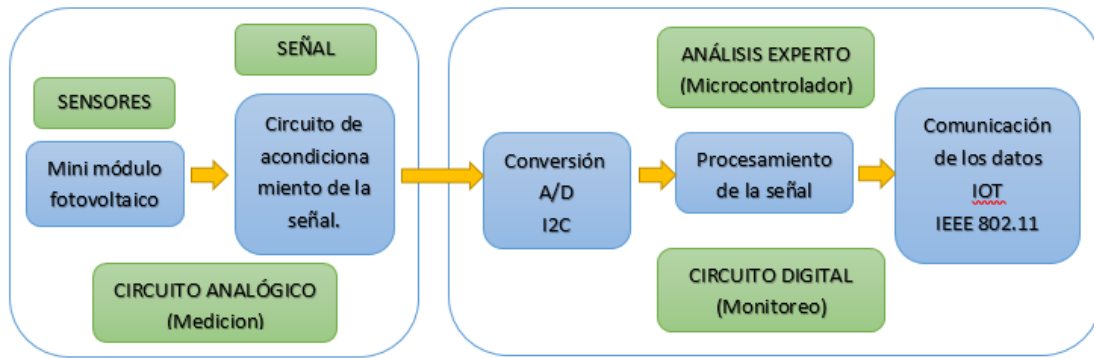


Figura 38. Arquitectura del funcionamiento del hardware y software de la plataforma sensorial (Elaboración propia).

La plataforma se basa en tres sensores de medición para monitorear parámetros ambientales como Irradiancia solar, temperatura de aire y presión atmosférica. La Figura 39, muestra la plataforma sensorial instalado en la ciudad de Puno y Juliaca.

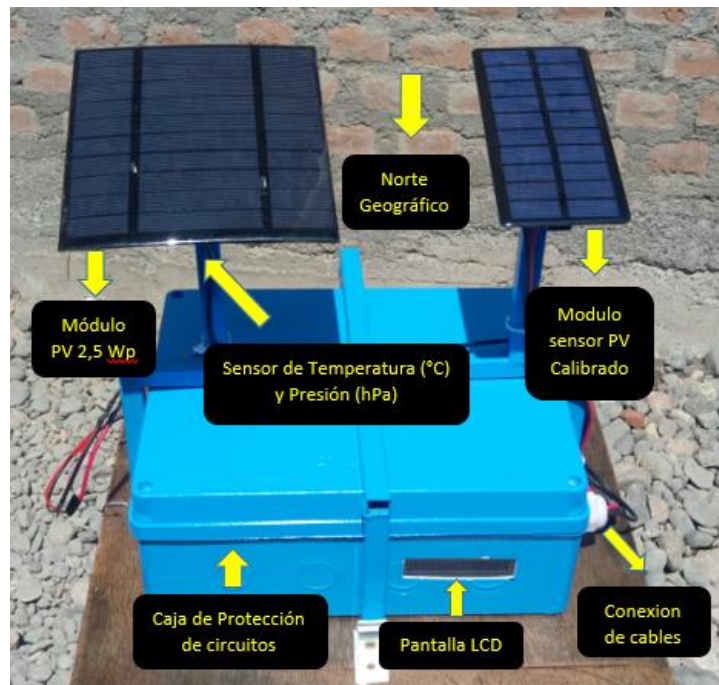


Figura 39. Plataforma sensorial de medición de eventos extremos de Irradiancia solar implementados en Puno y Juliaca (Elaboración propia).

Los componentes electrónicos (hardware) de la plataforma sensorial fueron colocados en una caja con grado de protección IP, siendo resistentes al polvo y agua. Para nuestra plataforma utilizaremos sensores de voltaje y corriente INA219, mini módulos

fotovoltaicos de 1.3 Wp y 2.5 Wp, uno que funcione como sensor y el otro como generador de energía para la autonomía del sistema, un sensor BMP280 para la temperatura y presión atmosférica, un reloj de tiempo real RTC DS3231, un módulo de tarjeta SD para el almacenamiento de datos, una pantalla LCD, un controlador de carga lineal TP4056 DC para la protección de baterías ion litio. La comunicación de datos con los componentes se emplea una placa de desarrollo NodeMCU ESP8266 basada en el módulo wifi ESP-12E, es un microcontrolador y componente electrónico de bajo costo desarrollado especialmente para la comunicación IOT y aplicaciones que involucran wifi a una frecuencia de 2.4GHz, con soporte para WPA y WPA2 con un procesador de 32 bits. La Figura 40, muestra un diagrama de bloques de los componentes de la plataforma sensorial.

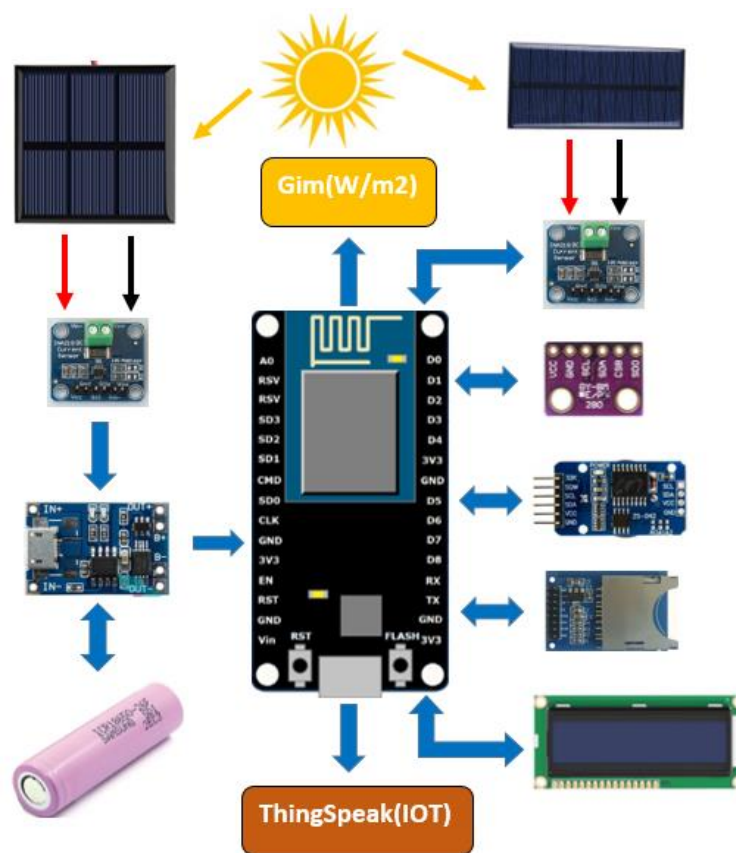


Figura 40. Diagrama de bloques de conexión de los componentes (Elaboración propia).

La alimentación de la plataforma sensorial es generada por el mini modulo fotovoltaico de mono c-Si de 2.5 Wp, con una corriente de corto circuito (I_{sc}) de 500 mA y un voltaje de 5 V. Esta energía se almacena en un banco de baterías de iones de litio equivalente a 6000 mA el cual alimenta la placa NodeMCU ESP8266 que incluye un

regulador de voltaje de 5 V a 3.3 V, que posteriormente alimenta los demás dispositivos. El módulo TP4056 DC cargador lineal de baterías de litio, equilibra la carga entre el módulo fotovoltaico y la batería, protegiendo al circuito de sobrecargas y descargas por completa de las baterías (Corp, 2015).

La plataforma registra y almacena los datos recopilados por los sensores, en un módulo que tiene un lector de tarjetas de memoria SD de 8 GB, que consume una corriente de 0,18 mA, la comunicación entre el ESP8266 con modulo SD para el almacenamiento de datos se realiza a través del bus SPI (Serial Peripheral Interface). El DS3231 RTC (reloj de tiempo real) es un módulo que genera la referencia de tiempo con precisión para la plataforma sensorial, realizando el conteo exacto de segundos, minutos, horas, así como días, semanas, meses y años, la comunicación es a través de la interfaz con el ESP8266, con una demanda de corriente de 3 mA (Maxim Integrated, 2015).

Para medir la Irradiancia se utilizó el sensor de tensión y corriente INA219 de alta precisión con interfaz que facilita la comunicación con el ESP8266, el sensor integra una resistencia de derivación de 0.1Ω (2 W), para medir potencia, las mediciones con este chip tienen una precisión de $\pm 0.5\%$. Este dispositivo tiene un rango de detección en tensión DC entre 0 y 26 V y corriente de medición máxima de $\pm 3,2$ A, con Resolución de 0,8 mA y un tiempo de respuesta de 68 milisegundos (Texas Instruments, 2011). La parte de medición del sensor es la corriente que está en el lado alto del INA219, donde la resistencia de derivación se coloca entre la fuente de alimentación y la carga. Este método permite que el dispositivo mida tanto la corriente circulante como el voltaje en la carga. La Figura 41, muestra el diagrama de bloques del INA219.

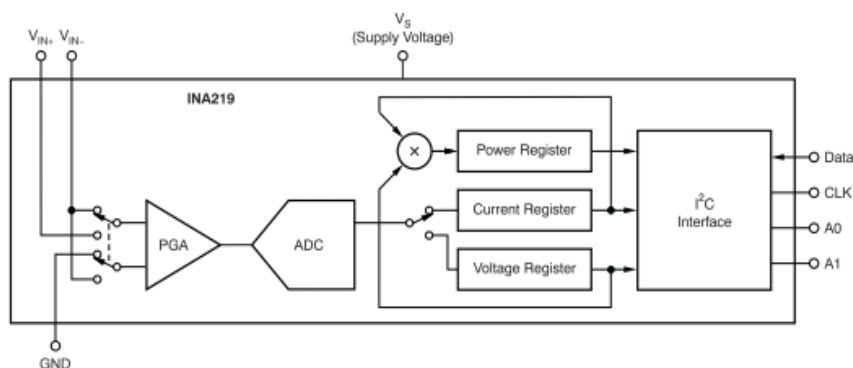


Figura 41. Diagrama de bloques del INA219 (Texas Instruments, 2011).

Los pines SDA (Datos) y SCL (CLK) son para la comunicación I^2C y deben conectarse a los pines I^2C del microcontrolador ESP8266, respectivamente. Los pines $Vin+$ y $Vin-$ presentes tanto en la barra de pines como en el conector de tornillo se utilizan para monitorear la carga. La fuente que alimenta la carga (con voltajes de 0 a 26 V) ingresa al terminal $Vin+$, cruza el resistor shunt (derivación) y sale del terminal $Vin-$, dirigiéndose a la carga a monitorear. El GND (tierra) del circuito de medición debe estar conectado al GND de la carga, el terminal negativo de la batería debe estar conectado al GND general. Esto asegura que los circuitos funcionen bajo la misma referencia, al tiempo que asegura que la potencia se medirá correctamente.

Las mediciones de los parámetros de temperatura de aire y presión atmosférica son tomadas con el módulo sensor BMP280 fabricado por Bosch. Mediante su interfaz de comunicación I^2C , que puede medir en un rango de 300 a 1100 hPa (± 0.12 hPa), mientras que la temperatura se puede medir entre -40 y 85 ° C (± 1.0 °C), tensión de funcionamiento de 3.3 V y una demanda de corriente de 24,8 μ A (Bosch, 2015).

El sensor de medición de Irradiancia solar es un mini modulo fotovoltaico de silicio mono cristalino (mono c-Si) de una potencia de 1.3 Wp, con corriente de corto circuito (I_{SC}) de 240 mA y un voltaje de circuito abierto (V_{OC}) de 5.5 V, en condiciones de prueba estándar (STC) y una eficiencia de 17%. Para leer los valores de corriente de corto circuito (I_{SC}), los terminales positivo y negativo del mini módulo fotovoltaico están conectados a la entrada $Vin+$ y $Vin-$ del sensor INA219, respectivamente. La variación de la Irradiancia influye directamente en la variación de la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico. La conversión de I_{SC} a Irradiancia en W / m^2 se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$Gi_{FV} = \frac{\text{lectura}(I_{SC}) * Gi_{ref}}{Isc_{ref}} \quad (1)$$

Donde:

- Gi_{FV} = Valor de la Irradiancia solar en la superficie del módulo fotovoltaico.
- $\text{lectura}(I_{SC})$ = lectura de la corriente de corto circuito medida por el sensor INA219 mA

- $G_{i_{ref}}$ = La Irradiancia solar terrestre de 1000 W / m^2 .
- $I_{sc_{ref}}$ = Es la corriente de corto circuito máxima posible del mini modulo fotovoltaico en condiciones estándar (STC).

Las mediciones de irradiancia, temperatura del aire y la presión atmosférica ya mencionados anteriormente, se tomaron cada 1 segundo, obteniendo un total de aproximadamente 36000 datos almacenados diariamente desde las 7:00 hasta las 17:00 de cada día, también los datos registrados son enviados y subidos para el monitoreo al servidor de ThingSpeak (IOT) en modo gratuito donde se visualizan los datos cada 15 segundos. Posteriormente entra en modo sueño profundo entre las 17:00 y las 6:59 donde el sistema entra al final de su ciclo de monitoreo diario.

b) Sistema fotovoltaico implementado (autonomía)

El dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos integrados para aplicaciones de IOT se debe considerar muy bien la capacidad de la batería para la alimentación y autonomía del sistema ya que la plataforma de medición implementada no va a tener normalmente una alimentación de la red eléctrica esto dependerá a la disposición que se tiene del lugar de la implementación. Para el dimensionamiento se debe considerar el consumo de cada componente de la plataforma sensorial y obtener el consumo nominal diario (L) mediante la siguiente ecuación.

$$L = (T * \text{peso})_1 * Pot_1 + (T * \text{peso})_2 * Pot_2 + \dots + (T * \text{peso})_n * Pot_n$$

$$L = (24h * 0.40) * 170mW + (24h * 0.60) * 65mW$$

$$L = 2.56Wh$$

Para obtener ese consumo de energía en la plataforma sensorial de 2.37 Wh, el banco de baterías debe ser dimensionado teniendo en cuenta los días de autonomía y la profundidad de descargar de 20 % (PDmax), como se muestra en la ecuación.

$$C_B = \frac{L * N}{PD_{max}}$$

$$C_B = \frac{2.56 * 2}{0.2} = 25.6Wh$$

Siendo:

- C_B = Capacidad del banco de las baterías

- L = Consumo diario
- N = Número de días de autonomía
- PD_{max} = Profundidad de descarga máxima de la batería

Entonces la capacidad total del banco de baterías en Ah se obtiene de la siguiente ecuación:

$$C_{TB} = \frac{C_B}{V}$$

$$C_B = \frac{25.6}{3.7} = 6.4Ah$$

Siendo:

- C_{TB} = Capacidad del banco de baterías en A
- V = tensión de las baterías

El banco de baterías para la plataforma sensorial fue configurado por 2 baterías de iones de litio ICR18650 de 3.7V / 6.0Ah conectados en paralelo. La tabla muestra las principales especificaciones de la batería implementada.

La generación fotovoltaica (FV) debe suplir la demanda de consumo diario de la carga (L) y se calcula con siguiente ecuación.

$$Potencia_{FV} = 1.7x \frac{L}{HSP_b}$$

$$Potencia_{FV} = 1.7x \frac{2.56}{4.11} = 1.05Wp$$

Siendo:

- $Potencia_{FV}$ = Potencia del módulo FV en Wp
- HSP_b = Valor mínimo de insolación en KWh/m²
- L = Consumo diario necesario en Wh

Es importante considera el dimensionamiento del sistema (FV) para la alimentación del microcontrolador, así como dimensionar el tiempo de consumo alto de energía y en modo de ahorro de energía. La potencia calculada de la ecuación es de 1.5 Wp, el módulo utilizado fue de 2.5 Wp debido a la disponibilidad comercial.

Para alargar el tiempo de vida útil de las baterías es necesario establecer un límite máximo de carga para evitar la sobrecarga de la batería que puede provocar hasta explosión de las baterías de litio, de igual manera en la descarga no se recomienda el 100 % de descarga de las baterías. La vida útil de una batería ion litio depende directamente del porcentaje de descarga que es hasta un máximo del 20 %.

Es por ello que se requiere un circuito controlador para monitorear la carga y descarga de las baterías. El TP4056 ya mencionado anteriormente en el informe, es un controlador de carga y descarga que cuenta con un circuito de protección que es sensible a las sobrecargas de voltaje y corriente para evitar daños a la batería. El TP4056 proporciona voltaje y corriente continuamente y cuenta también con una entrada para el módulo fotovoltaico de baja potencia y un puerto mini USB con voltaje hasta 5.5 V en DC y salida para la batería y carga (Corp, 2015). En la Figura 42, se muestra el ciclo de carga completa del TP4056.

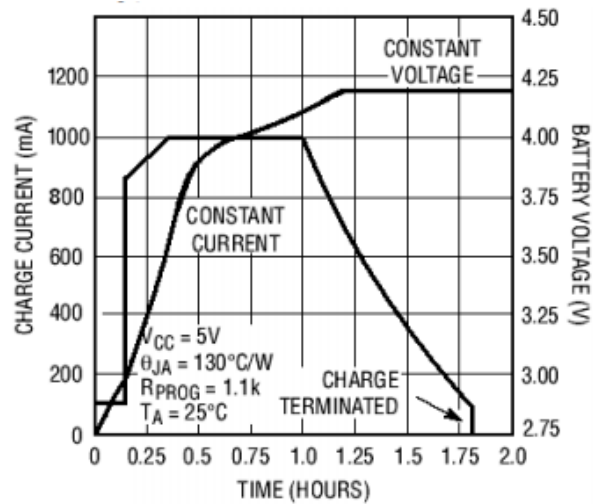


Figura 42. Ciclo de carga completo del TP4056 (Corp., 2015).

3.3.3 Metodología del diseño eléctrico y electrónico de la plataforma sensorial

En la presente etapa se va a detallar en resumen de la elaboración ejecutable de la parte del software y el diseño físico del hardware de la plataforma sensorial para la medición de Irradiancia solar extrema, en base a literatura y arquitectura ya diseñada y mencionada anteriormente. La Figura 43, se puede visualizar el diseño físico del hardware ya armado en su caja de protección y listo para realizar las mediciones de Irradiancia solar.

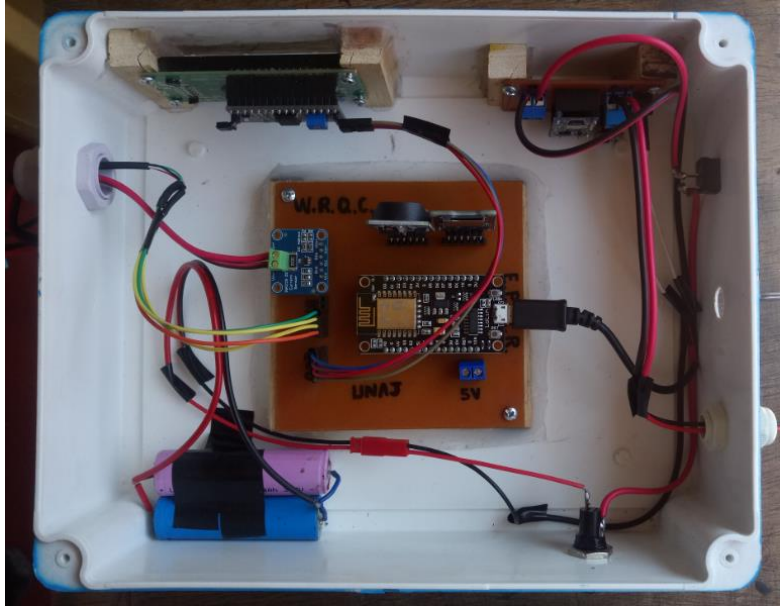


Figura 43. Diseño del hardware de la plataforma sensorial (Elaboración propia).

a) *Circuito de conexión de pruebas*

Con el fin de realizar la implementación de la plataforma, primero se empezó realizando las pruebas en un protoboard con los diferentes elementos que componen el sistema de medición descritos con anterioridad en el capítulo de materiales y equipos. El diseño eléctrico y electrónico de la plataforma sensorial (hardware) se comprobó la conexión y comunicación (software), que es la programación ejecutable realizada por el microcontrolador Node MCU ESP8266.

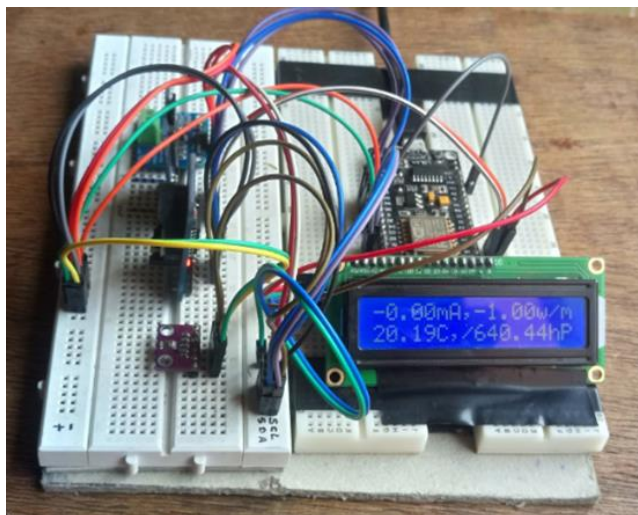


Figura 44. Circuito de conexión de pruebas (Elaboración propia).

b) Diseño del PCB del circuito de la plataforma

Ya realizado las pruebas de conexión en el protoboard y programación en el software de arduino, se procedió a realizar el diseño de una placa de circuito impreso PCB que se diseñó EAGLE y FRITZING, para su mejor manejo y practicidad al momento del montaje y conexión de la plataforma sensorial, ya que en esta placa de PCB se unen todos los componentes y funciones de la plataforma sensorial de medición, monitoreo y almacenamiento de datos. En la Figura 45, se muestra el diseño de la PCB de comunicación, medición, monitoreo y almacenamiento de datos.

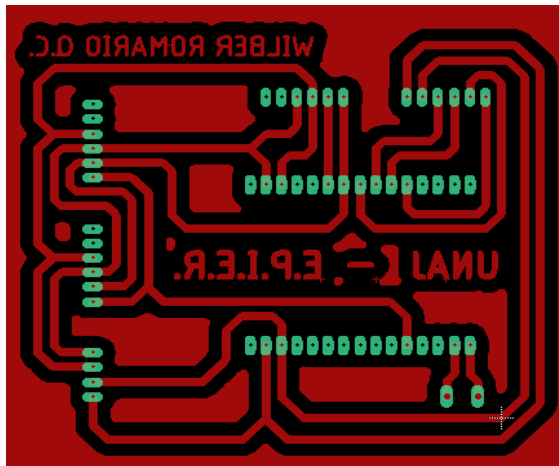


Figura 45. PCB de Medición y almacenamiento de datos de la plataforma sensorial (Elaboración propia).

De igual manera se realizó el diseño de una placa de circuito impreso (PCB), para la fuente de alimentación de la plataforma sensorial, para conectar los elementos que componen la fuente de alimentación. El circuito impreso de PCB está diseñado para el almacenamiento de energía generado por el módulo fotovoltaico de 2.5 Wp y alimentar el microcontrolador con una fuente de 5 V, con un circuito de respaldo de baterías de 3.7V de 6000 mA que siempre alimentara al microcontrolador y este al circuito.

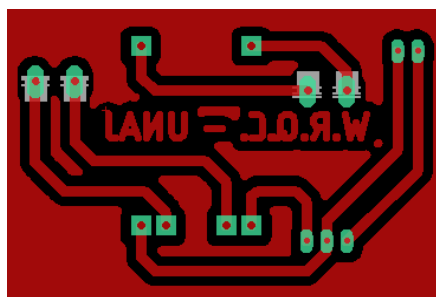


Figura 46. PCB de alimentación para autonomía de la plataforma sensorial (Elaboración propia).

La Figura 47, muestra el diagrama unifilar de conexión de la plataforma sensorial de los componentes de medición y autonomía energética para la alimentación de la plataforma sensorial, elaborado con el software EAGLE para su diseño en la PCB.

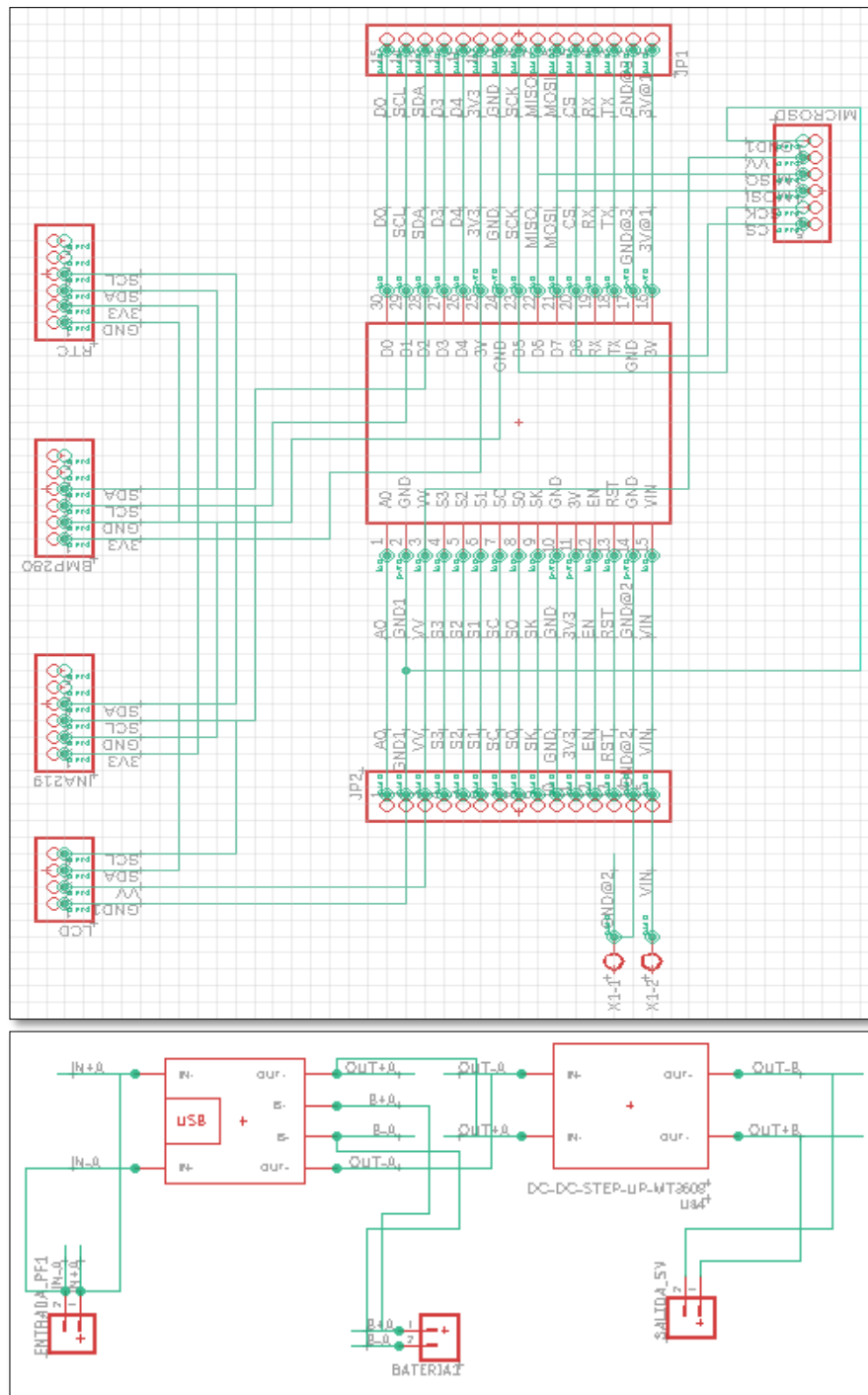


Figura 47. Diagrama unifilar de conexión en EAGLE (Elaboración propia).

La Figura 48, se muestra el diagrama de conexión del circuito electrónico general de la plataforma sensorial, elaborado con el software FRITZING. El microcontrolador NodeMCU ESP8266 conecta a los diferentes componentes como el sensor INA219, sensor BMP280, reloj RTC DS3231, modulo SD pantalla LCD, a través de la interfaz de comunicación I2C (SDA, SCL) a los diferentes componentes del circuito. También cuenta con una fuente de alimentación generado por el Módulo FV 2.5 Wp y almacenadas en un banco de baterías ion litio.

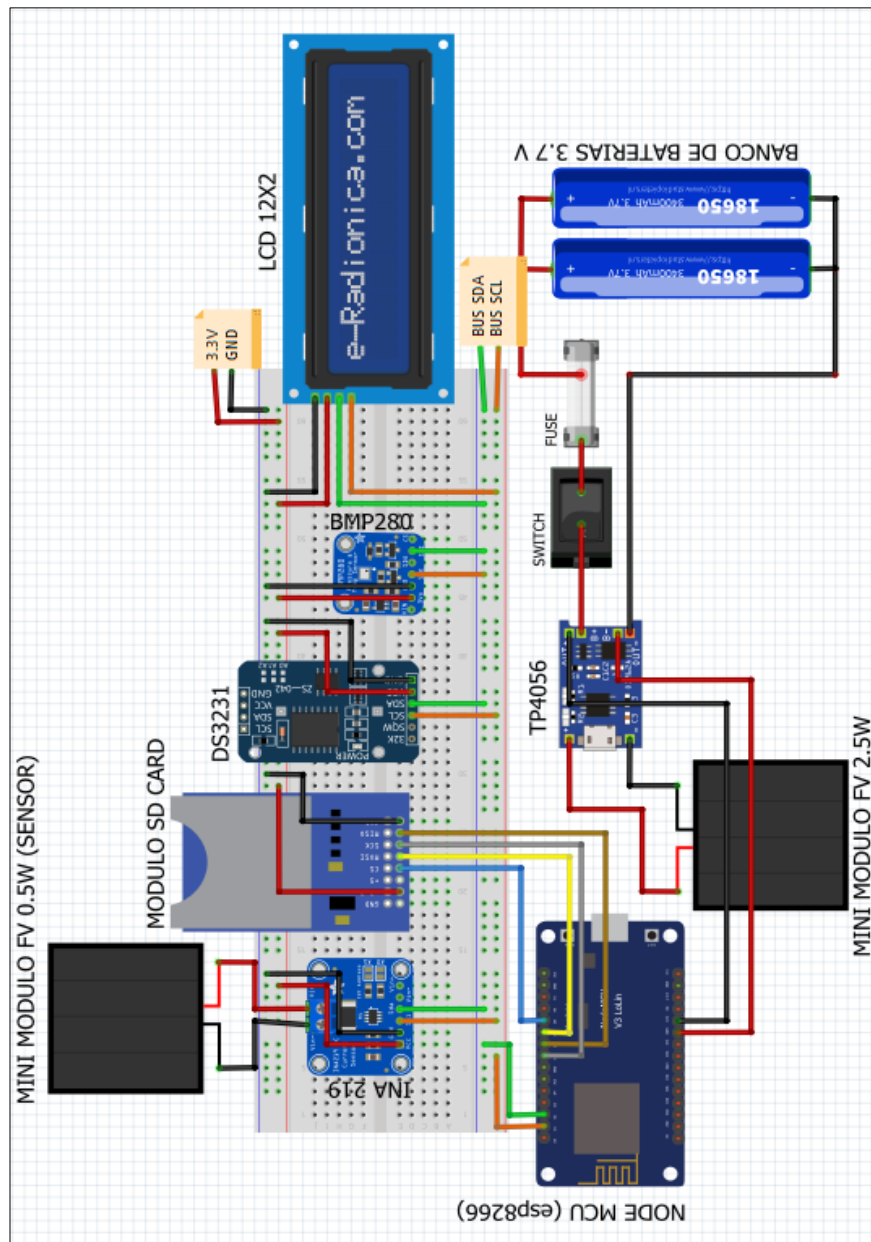


Figura 48. Diagrama de conexión de la plataforma sensorial (Elaboración propia).

3.3.4 Metodología para la implementación de la plataforma

Se implementa un algoritmo de medición y comunicación con el microcontrolador mediante la IDE de arduino, utilizando el software de Arduino donde se realizó la programación y compilado. En la elaboración del programa se han incluido operaciones matemáticas, conversiones, asignación de unidades y procesos de comunicación con la plataforma ThingSpeak (IOT). Mediante el siguiente diagrama de flujo se presenta el funcionamiento de la plataforma sensorial Figura 49.

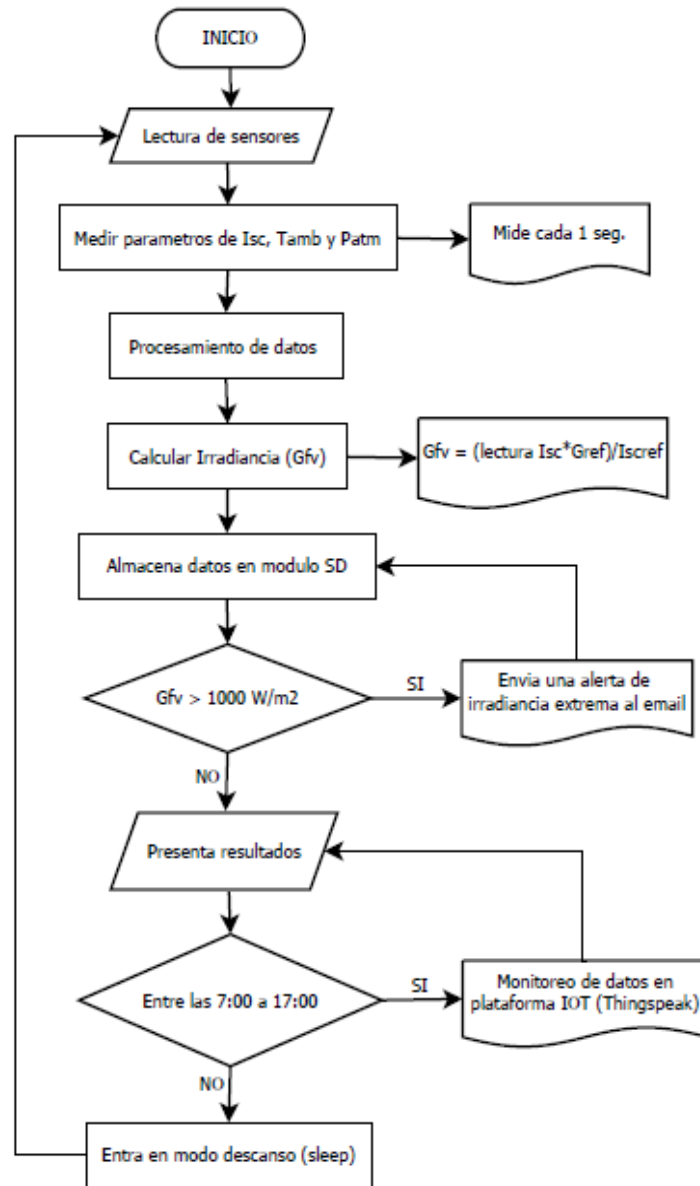


Figura 49. Diagrama de funcionamiento de la plataforma sensorial (Elaboración propia).

3.3.5 Metodología para la programación y control en la plataforma implementada

En los capítulos anteriores se ha explicado y diseñado el hardware del medidor de Irradiancia solar. Ahora, explicaremos el software para la programación en el microcontrolador que será el que ejecute el código en la IDE de arduino para realizar las mediciones de señales analógicas a digitales mediante sus interfaces de comunicacion. La plataforma de medición (hardware) NodeMCU ESP8266 es un microcontrolador que requiere de una programación para realizar una acción específica, la programación se basa en C/C++ y uno de los principales requisitos para programar conocer el lenguaje de programación y conocer tema de la aplicación que deseamos. En este código Arduino que implementamos se aplicaron conocimientos de sistemas fotovoltaicos y meteorología para realizar funciones de medición Irradiancia solar, temperatura y presión atmosférica. La Figura 50, muestra el código arduino básico implementado para el medidor de irradiancia.

```
#include <Wire.h>           // librería de comunicación I2C
#include <Adafruit_INA219.h> // librería del sensor INA219
Adafruit_INA219 placa0(P0);
const int P0 = 0X40;       // direccionamiento del INA219
float Isc = 0;             // variable de tipo decimal para la corriente
float Gim = 0;            // variable de tipo decimal para la irradiancia
float Iscref = 0.240;     // corriente Isc de nuestro modulo FV
float Giref = 1000.0;     // valor de referencia 1000 W/m2
void setup(void) {
  Serial.begin(9600);      // inicia la comunicación con el monitor serie
  placa0.begin();         // inicia la comunicación con el INA219
}
void loop() {
  Isc = placa0.getCurrent_mA()/1000.0; // variable que muestra la corriente en mA
  Gim = Isc*Giref/Iscref;              // variable que muestra la Irradiancia en W/m2
  Serial.print("Isc: ");
  Serial.print(Isc);
  Serial.print(" mA");
  Serial.print("\t");
  Serial.print("Gim: ");
  Serial.print(Gim);
  Serial.print(" W/m2");

  Serial.println("");
  delay(1000);
}
```

Figura 50. Programación básica para medir Irradiancia con Arduino UNO (Chase et al., 2018).

a) **Presentación de datos en el servidor de ThingSpeak de (IOT)**

Los datos registrados por la plataforma sensorial se pueden ver en el servidor WEB de ThingSpeak del IOT para el monitoreo in situ de los parámetros medidos, como se ilustra en la Figura 51. En este proyecto de investigación utilizamos el modo gratuito del servidor ThingSpeak centrado en los servicios de internet de las cosas y desarrollado por MathWorks. Esta herramienta utiliza canales para la recepción y almacenamiento de datos en tiempo real, enviados desde un dispositivo. La comunicación se realiza a través del microcontrolador NodeMCU ESP8266 mediante una red wifi (protocolos de comunicación), además permite también el desarrollo de aplicaciones para transformar y visualizar datos o activar una acción, utilizando el mismo lenguaje utilizado en Matlab (Oliveira, 2017).

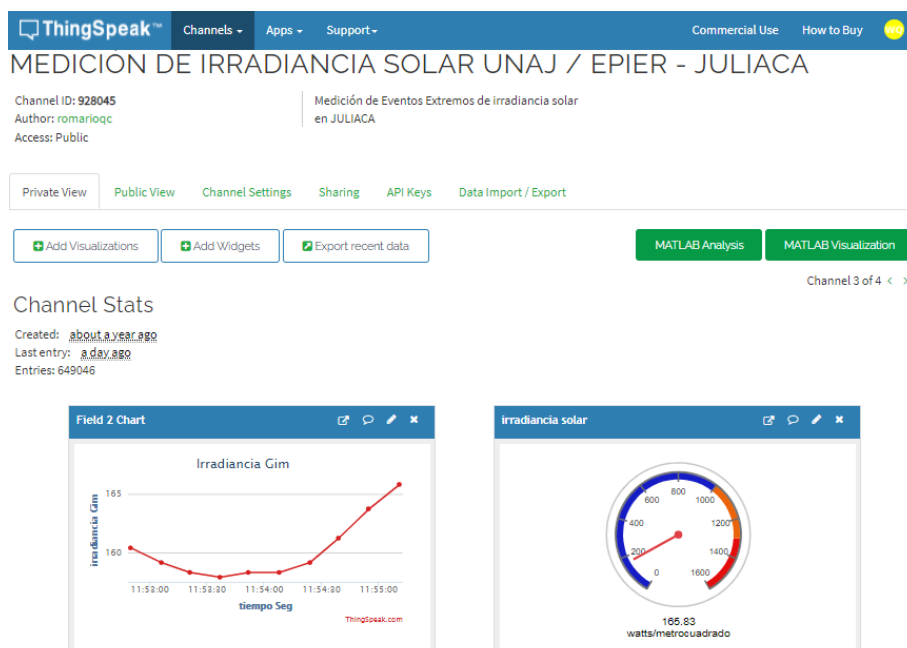


Figura 51. Servidor de monitoreo diario de eventos extremos con ThingSpeak (ThingSpeak, 2019).

El servidor ThingSpeak (IOT) cuenta con aplicaciones. Estas aplicaciones se utilizan para transformar y visualizar o activar una acción de los datos enviados al servidor. Para este estudio implementamos la aplicación de visualización de datos en MATLAB y reacción cuando cumplan cierta condición (Irradiancia muy extrema > 1367 W/m²) enviados al correo.

3.3.6 Metodología para la adquisición y procesamiento de datos

Las mediciones de la Irradiancia solar se importan de los archivos de mediciones realizadas con la plataforma, que se guardaron en un archivo de tipo *.txt que posteriormente son analizados en el software Excel. La plataforma de ThingSpeak (IOT), guarda también los datos en un archivo de importación de tipo CSV, que son descargados de la misma plataforma.

La Figura 52, muestra el archivo de texto que se genera en el monitor serie del arduino y se almacena en la memoria micro SD para los valores medidos por la plataforma. En ella podemos observar un encabezado el cual nos dice que se ejecutó toda la programación en la IDE de arduino, después tenemos los encabezados del orden de los datos registrados como la fecha, tiempo, corriente de corto circuito, irradiancia, temperatura y por último la presión atmosférica, todas sucesivamente en columnas.

```
{Iniciando tarjeta SD...
inicializando modulo RTC...
inicializando rtc para la funcion
inicializando modulo bmp280...
FECHA | HORA | Isc_mA | Gim_W/m2 | TEMPERATURA | PRESION - hPa
Connecting to
QCROMA
.....
WiFi connected
% send to Thingspeak
15/9/2020,15:1:37,-0.30,-1.25,22.89,644.75
% send to Thingspeak
15/9/2020,15:1:42,-0.30,-1.25,22.87,644.74
% send to Thingspeak
15/9/2020,15:1:47,0.00,0.00,22.87,644.74
```

Figura 52. Visualización del registro de datos en monitor serie de Arduino (Elaboración propia).

3.4 Validación y calibración de la plataforma sensorial

El proceso de calibración del sensor de Irradiancia basado en FV (mini módulo fotovoltaico + INA219) y el módulo fotovoltaico patrón, debe ser medida en condiciones idénticas, por ambos sensores. Los datos de intensidad de radiación que se generan por estos mismos deben estar en sincronía con respecto al tiempo. Por tanto, calibrar el instrumento de medición construido, consiste en hacer los ajustes necesarios de este, para que las lecturas de Irradiancia sean iguales o semejantes observadas en el patrón.

La calibración de la plataforma de medición se realizó en la ciudad de Juliaca, durante un periodo de tiempo de 3 horas desde las 10:00 a 13:00 horas con intervalos de lectura de 5 minutos. Se determinó comparando las salidas de los datos de la plataforma sensorial implementado con la del módulo fotovoltaico estándar (patrón), con lecturas leídas por un multímetro digital Fluke 179 de alta precisión de valor eficaz con mediciones en mA, y una pinza Amperimetrica Amprobe 330. La Figura 53, muestra el diagrama de bloques de calibración y validación de datos de la plataforma de medición y monitoreo de eventos extremos de Irradiancia solar.

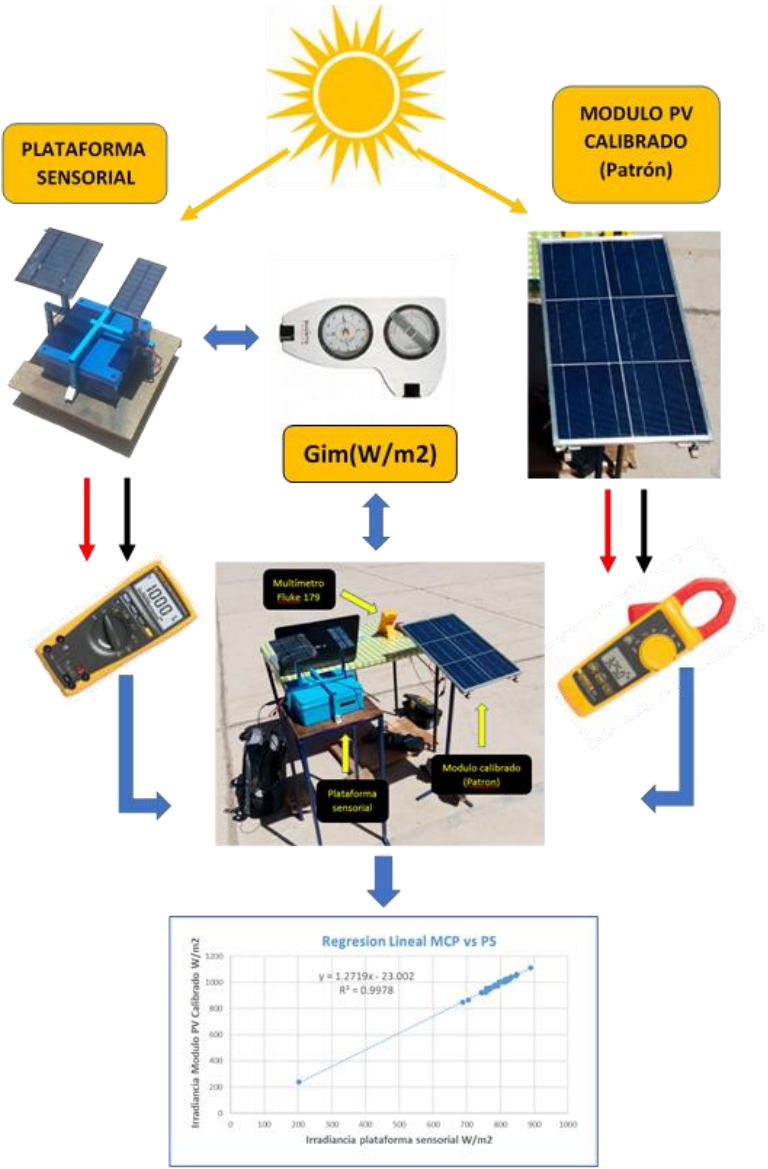


Figura 53. Diagrama de bloques de calibración y validación de datos (Elaboración propia).

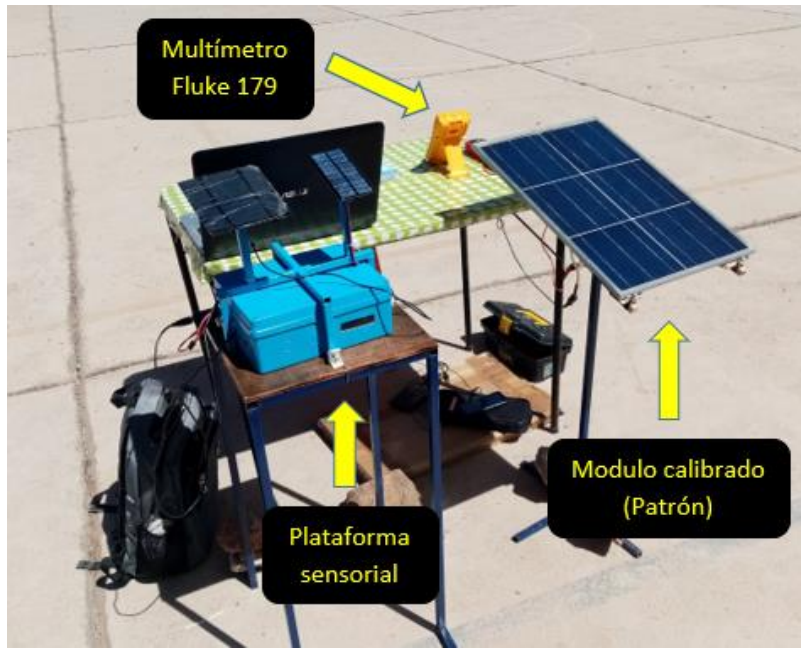


Figura 54. Calibración de la plataforma sensorial (Elaboración propia).

El multímetro FLUKE 179 de alta precisión para la medición de corriente en mA, lo utilizaremos para la lectura de los parámetros (I_{sc}) del módulo fotovoltaico calibrado (patrón).

3.4.1 Presentación de resultados de calibración y validación de datos

La calibración y validación de los datos de la plataforma sensorial, se obtuvieron de la ecuación empírica para la corrección de la magnitud del sensor de Irradiancia (plataforma sensorial). La Figura 55, muestra la línea de tendencia de plataforma sensorial vs modulo FV calibrado (patrón) para la corrección de los datos.

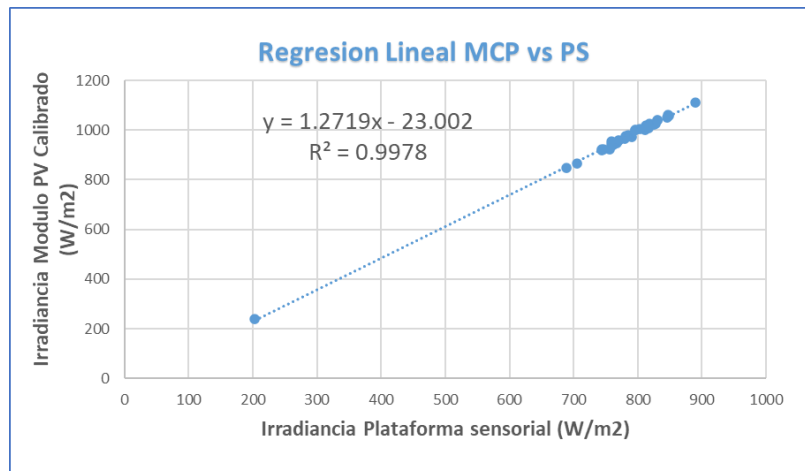


Figura 55. Regresión lineal entre el módulo calibrado (patrón) – plataforma sensorial (Elaboración propia).

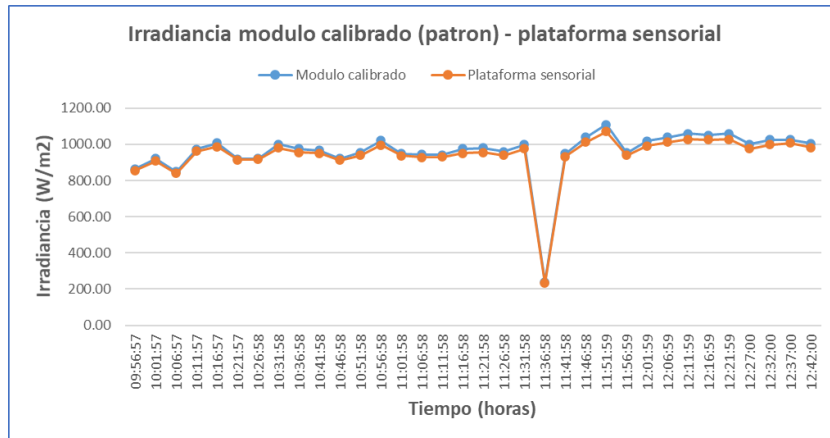


Figura 56. Comparación entre modulo calibrado (patrón) – plataforma sensorial (Elaboración propia).

La Figura 56, muestra la comparación de datos registrados de irradiancia, donde se aprecia que los valores obtenidos por la plataforma de medición implementados en el proyecto y el módulo calibrado (patrón), son muy aproximados teniendo un porcentaje de error aceptable menor a 5 %. En Anexo 3, se muestra la tabla de datos registrados.

3.4.2 Obtención de la ecuación de calibración

La ecuación de calibración se obtuvo mediante la regresión de lineal entre las lecturas del módulo FV estándar (patrón) y la plataforma sensorial en mismas condiciones reales de funcionamiento, de donde se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) y correlación de Pearson (R). De donde se obtuvo la ecuación empírica para la corrección de la magnitud del sensor de Irradiancia (plataforma sensorial)

$$Y = 1.2719 * X - 23.002 \quad (2)$$

$$R = 0.9989$$

$$R^2 = 0.9978$$

Reemplazamos la ecuación para la corrección de los datos, obteniendo así la Irradiancia solar calibrada G_{i_m} .

$$G_{i_m} = 1.2719 * G_{i_{FV}} - 23.002 \quad (3)$$

$$G_{i_m} = 1.2719 * \left(\frac{\text{lectura}(Isc) * G_{i_{ref}}}{Isc_{ref}} \right) - 23.002 \quad (4)$$

Siendo G_{i_m} la Irradiancia solar calibrada en W / m^2 . De la ecuación (1) convierte Isc a $G_{i_{FV}}$ tomando los valores de Isc_{ref} 240 mA y $G_{i_{ref}}$ 1000 W / m^2 , reemplazamos la

ecuación (3) en (4), obteniendo así G_{i_m} . La ecuación de calibración asegura que los resultados de las mediciones del sensor de Irradiancia en la plataforma sensorial (mini módulo FV + INA219) estarán lo suficientemente cerca a los resultados generados por el módulo fotovoltaico patrón.

3.5 Ubicación e implementación del lugar de estudio

La Plataforma de medición de este trabajo de investigación fue implementada en las ciudades de Puno y Juliaca. ubicado a más de 3800 m.s.n.m. Juliaca se ubica $15^{\circ}30'$ de latitud sur y $70^{\circ}8'$ de longitud oeste es decir a -15.48395 de latitud y -70.15839 de longitud y Puno se ubica $15^{\circ}50'$ de latitud sur y $70^{\circ}1'$ de longitud oeste es decir a -15.82574 de latitud y -70.01119 de longitud.

Una vez de haber diseñado y desarrollado el software y hardware de la plataforma sensorial con todos los componentes, únicamente queda implementar y ubicar el mismo en el lugar de medición, libre de sombras y orientados al norte geográfico que se realizó con el clinómetro Sunnto, dando la orientación correcta de la plataforma de medición. El dispositivo de medición se ubicó en los domicilios, de la ciudad de Juliaca y otro en la ciudad de Puno. La Figura 57, muestra la ubicación de implementación de las plataformas sensoriales de medición y monitoreo de eventos extremos de irradiancia solar.



Figura 57. Ubicación e implementación de las plataformas sensorial (Google Maps).

Las mediciones de temperatura, presión e Irradiancia solar se realizaron en el periodo de enero a agosto del 2020 meses. La plataforma de medición se fijó horizontalmente, con una inclinación de 15° hacia el norte geográfico. El clima en la región de Puno, el promedio de porcentaje de cielo cubierto con nubes sufre variaciones estacionales importantes en el

transcurso del año. En la primera quincena de Julio, el periodo más despejado del año o menos nublada del año. La parte más despejada del año en la región de Puno comienza el 21 de abril y termina aproximadamente el 27 de septiembre. La parte más nublada del año comienza aproximadamente el 27 de septiembre y se termina aproximadamente el 21 de abril.



Figura 58. Plataforma sensorial implementados en Juliaca y Puno (Elaboración propia)

3.6 Análisis costo beneficio

En cuanto a la importancia en base a la presente propuesta que se ha redactado en el documento sobre el desarrollo e implementación de una plataforma sensorial para la medición y monitoreo de eventos extremos a través del servidor de ThingSpeak basado en IOT y con autonomía energética. Uno de los problemas que se presenta hoy en día, es la falta de información en referencia a este tema de estudio no se tiene, por ello es de gran importancia y beneficio para el desarrollo de la investigación en los sistemas fotovoltaicos y sus efectos al estar expuesto a este tipo de radiación solar. Cabe recordar que, en cuanto a costo como ya se mencionó, los equipos de medición de este tipo de estudio tienen costo muy elevados que superan los S/. 3000.00, mientras la propuesta implementada se encuentra alrededor de S/. 500.00. Además, la arquitectura de la plataforma es escalable, ya que se puede agregar más sensores, algoritmos expertos y otras aplicaciones, a medida que surgen nuevas necesidades. La Tabla 19, muestra el presupuesto de los componentes de la plataforma de medición.

Tabla 19
Presupuesto de la plataforma sensorial

Componentes	Cantidad	P. Venta Unitario S/.	Valor total S/.
Modulo fotovoltaico mono cristalino 2.5 Wp	1	35.00	35.00
Modulo fotovoltaica mono cristalino 0.5 Wp	1	75.00	75.00
NodeMCU ESP8266	1	50.00	50.00
Sensor INA219	1	30.00	30.00
Sensor BMP280	1	30.00	30.00
Baterías ion litio	2	35.00	75.00
Modulo TP4056	1	20.00	20.00
Modulo DS3231 (RTC)	1	20.00	20.00
Modulo micro SD	1	18.00	18.00
Memoria SD	1	25.00	25.00
Caja de plástico IP67	1	50.00	50.00
Otros accesorios	1	75.00	75.00
TOTAL		S/.	498.00

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

En este capítulo se describe el desarrollo del procesamiento de los datos registrados por la plataforma sensorial, para identificar eventos extremos de Irradiancia solar durante el periodo de medición que fue de seis meses, implementados en la ciudad de Puno y Juliaca, estos datos registrados por la plataforma sensorial generan una base de datos e información suficiente para caracterizar y analizar los resultados del sistema de medición de Irradiancia solar.

4.1.1 Resultados de la recolección de datos de eventos extremos de Irradiancia solar registrados en Puno y Juliaca.

El recuento y estudio estadístico se realizó para todos los eventos extremos de Irradiancia solar registrados y clasificados por (Irradiancia muy extrema $> 1367 \text{ W/m}^2$) e (Irradiancia extrema $> 1000 \text{ W/m}^2$), Como se puede ver en las tablas a continuación.

Las Tablas 20, 21, 22 y 23, muestran los parámetros estadísticos resumidos relacionados con las ocurrencias de eventos extremos de Irradiancia solar registrados en Puno y Juliaca durante el periodo de medición y ejecución del proyecto de investigación. Las Tablas muestran la ocurrencia de eventos de irradiancia clasificados por (Irradiancia extrema $> 1000 \text{ W/m}^2$) e (Irradiancia muy extrema $> 1367 \text{ W/m}^2$) registrados en cada mes, clasificados por el valor más alto registrado y alcanzado por cada mes, el número de días y su tiempo de duración máxima del evento extremó.

Tabla 20

Ocurrencias de eventos muy extremos de Irradiancia ($> 1367 \text{ W/m}^2$) en Juliaca

Meses	Irradiancia máxima muy extrema (W/m^2)	Nº de días con Irradiancia muy extrema	Duración máxima (seg.)	Duración mensual total (minutos)	% de frecuencia
Enero	1460.86	5	6	6	0.25
Febrero	1513.88	8	9	12	0.31
Marzo	1567.87	11	13	24	0.39
Abril	1460.88	4	2	3	0.05
Junio	1389.34	1	2	-	0.00
Julio	-	-	-	-	0.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21*Ocurrencias de eventos extremos de Irradiancia (> 1000 W/m²) en Juliaca*

Meses	Irradiancia máxima extrema (W/m ²)	N° de días con Irradiancia extrema	Duración máxima (seg.)	% de frecuencia
Enero	1366.78	14	17	16.92
Febrero	1354.89	12	34	9.37
Marzo	1354.89	18	11	13.16
Abril	1354.89	26	30	17.01
Junio	1338.47	1	9	0.76
Julio	1338.47	4	2	0.92

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22*Ocurrencias de eventos muy extremos de Irradiancia (> 1367 W/m²) en Puno*

Meses	Irradiancia máxima muy extrema (W/m ²)	N° de días con Irradiancia muy extrema	Duración máxima (seg.)	Duración mensual total (minutos)	% de frecuencia
Enero	1407.89	2	29	2	0.04
Febrero	1407.89	3	27	3	0.03
Marzo	-	-	-	-	0.00
Julio	-	-	-	-	0.00
Agosto	-	-	-	-	0.00
Septiembre	-	-	-	-	0.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23*Ocurrencias de eventos extremos de Irradiancia (> 1000 W/m²) en Puno*

Meses	Irradiancia máxima extrema (W/m ²)	N° de días con Irradiancia extrema	Duración máxima (seg.)	% de frecuencia
Enero	1248.90	7	39	2.35
Febrero	1354.89	19	34	3.98
Marzo	1354.89	18	11	1.13
Julio	-	-	-	0.00
Agosto	1025.78	2	9	0.01
Septiembre	1267.44	8	2	0.58

Fuente: Elaboración propia

De las tablas y resultados identificados, se tiene que los eventos extremos están relacionados con el fenómeno de mejora de nubes en la Irradiancia solar global y esto varía de acuerdo a las condiciones geográficas y climatológicas del lugar de estudio. Confirmando así, que los eventos extremos se presentan con mayor intensidad en épocas con mayor nubosidad en el año que comienza en septiembre y termina en abril aproximadamente mencionado por (SENAMHI). Los eventos extremos de Irradiancia solar son producidos por el efecto y aporte de cierto tipo de nubes, también conocida como fenómeno de mejora de la nube. Estos eventos extremos se encuentran por encima del nivel de radiación estándar (1000 W/m^2) y en algunos casos, por encima de la constante solar (1367 W/m^2) o también llamada Irradiancia extraterrestre.

4.1.2 Análisis Estadístico de los datos registrados de eventos extremos de Irradiancia solar en Puno y Juliaca.

Se presenta los resultados de eventos con Irradiancia muy extrema, más alta y de mayor duración registrada por la plataforma de medición, tomando así el día más representativo de cada mes tanto en Puno y Juliaca. Para una mejor evaluación de los datos se hace uso de la tabla de frecuencias de estadística a través de la herramienta de Excel, para determinar la frecuencia de los datos registrados de ocurrencia de eventos de Irradiancia extrema ($>1000 \text{ W/m}^2$) e Irradiancia muy extrema ($>1367 \text{ W/m}^2$).

a) Mediciones registradas por la plataforma sensorial de eventos extremos de Irradiancia solar implementado en la ciudad de Juliaca.

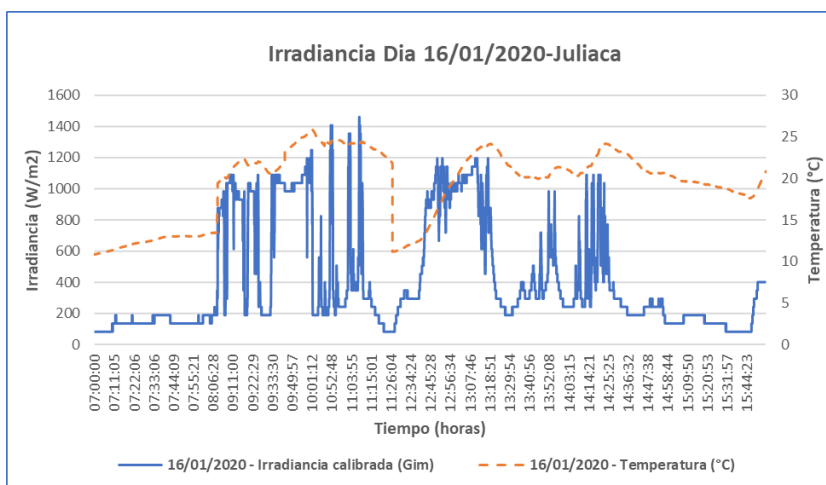


Figura 59. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 16/01/2020-Juliaca.

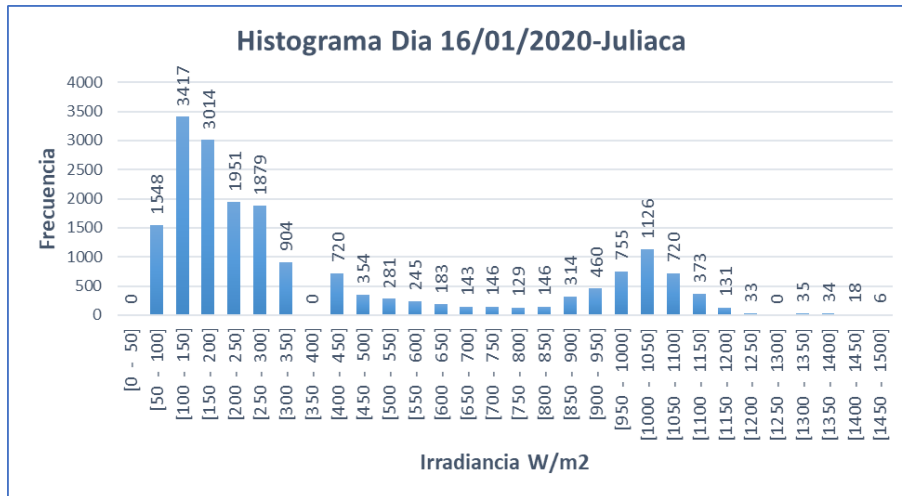


Figura 60. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 16/01/2020-Juliaca.

La Figura 59 y 60, presentan los resultados de medición de ocurrencias de eventos de Irradiancia muy extrema y extrema, se muestra mediante un histograma la distribución de frecuencia del día 16 de enero del 2020, donde ocurre el evento de Irradiancia muy extrema del mes de 1460.86 W/m² a las 11:08:21hrs., con una frecuencia de 6 veces y una duración de 6 seg.,. Para un rango de [1350 W/m²-1460.86 W/m²] se repiten 58 veces y una insolación de 2.28 horas solar pico, así mismo en este día se alcanzó una temperatura dentro de la cabina de medición de 25.87 °C y una presión atmosférica de 647.10 hPa. En este día, se tiene registrado los eventos de Irradiancia muy extrema (>1367 W/m²) que constituyeron el 0.3 % de todas las mediciones.

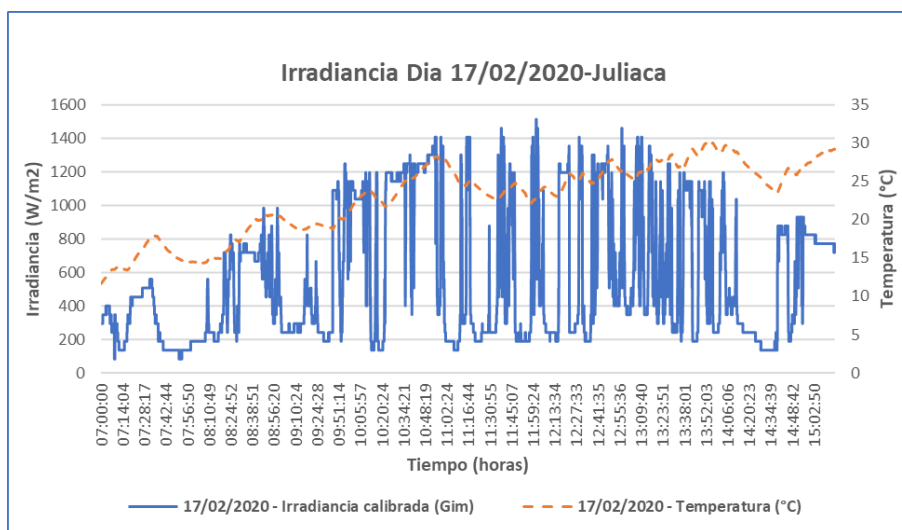


Figura 61. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 17/02/2020-Juliaca.

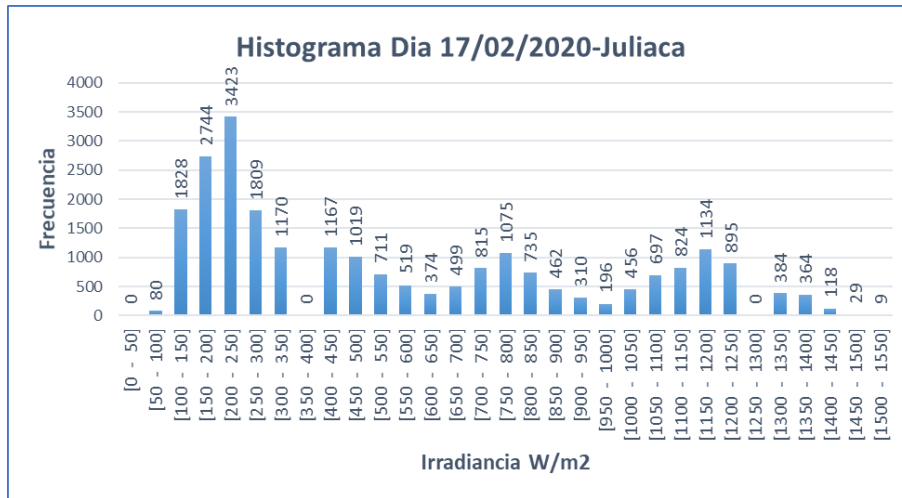


Figura 62. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 17/02/2020-Juliaca.

Se observa la Figura 61 y 62, que el 17 de febrero se tiene el evento de Irradiancia muy extrema de 1513.88 W/m² a las 12:01:19hrs., con una frecuencia de 9 veces y una duración de 9 seg., como máximo y mínimo de 1 segundo. Para un rango de [1350 W/m²-1513.88 W/m²] se repiten 520 veces, así mismo en este día se alcanzó una temperatura dentro de la cabina de medición de 23.02 °C. y una insolación de 3.86 HSP. En este día, se tiene registrado los eventos de Irradiancia muy extrema (>1367 W/m²) que constituyeron el 2.18 % de todas las mediciones.

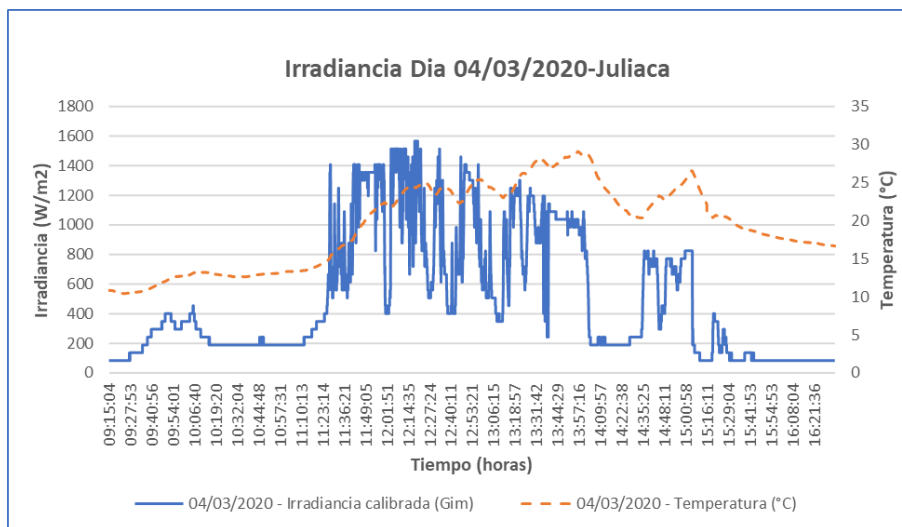


Figura 63. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 04/03/2020-Juliaca.

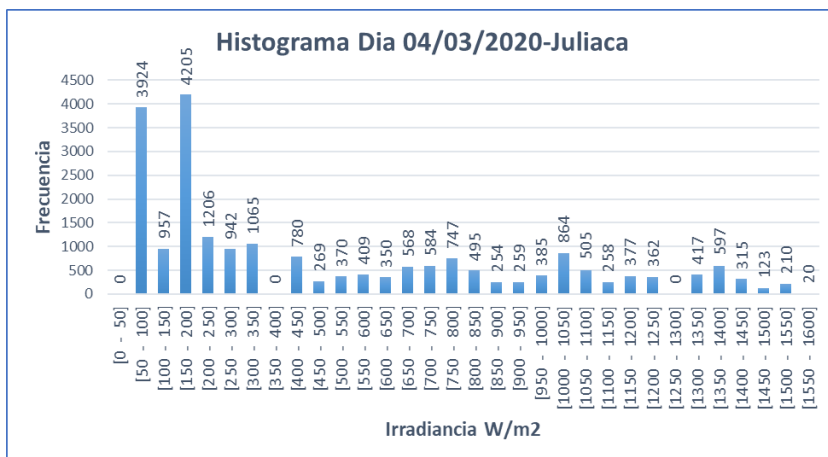


Figura 64. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 04/03/2020-Juliaca.

El día 04 de marzo del 2020, ocurre el evento de Irradiancia muy extrema de 1566.87 W/m² a las 12:19:26hrs., se repiten 20 veces y con una duración de 43 seg., como máximo y mínimo de 1 seg., con una temperatura de aire a 26.67 °C. Este es el primer registro del evento de la mayor Irradiancia muy extrema de la plataforma sensorial a una latitud -15.48805 °S y una altitud de 3832 m sobre el nivel del mar. Siendo la mayor Irradiancia muy extrema registrada en los 6 meses del periodo de medición en la ciudad de Juliaca. Para un rango de [1400 W/m² – 1567 W/m²] se repiten 668 veces, con una insolación de 3.13 kWh/m². En este día, se tiene registrado los eventos de Irradiancia muy extrema (>1367 W/m²) que constituyeron el 5.79 % de todas las mediciones. Como se muestran en las Figuras 63 y 64.

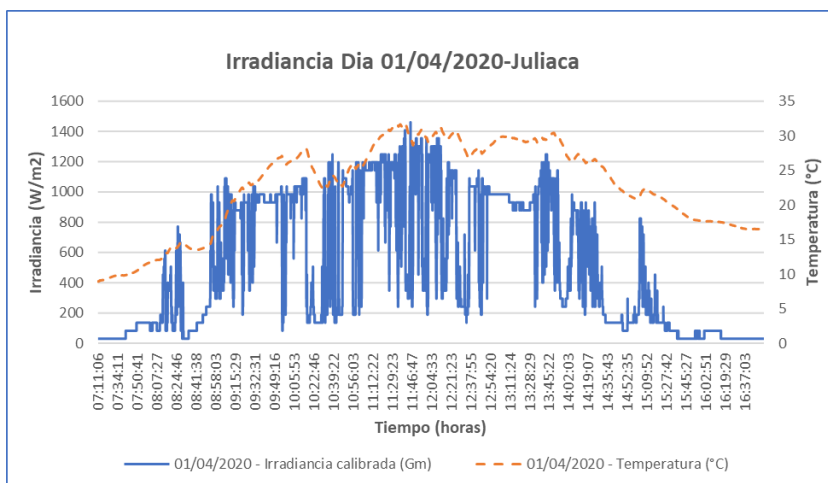


Figura 65. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 01/04/2020-Juliaca.

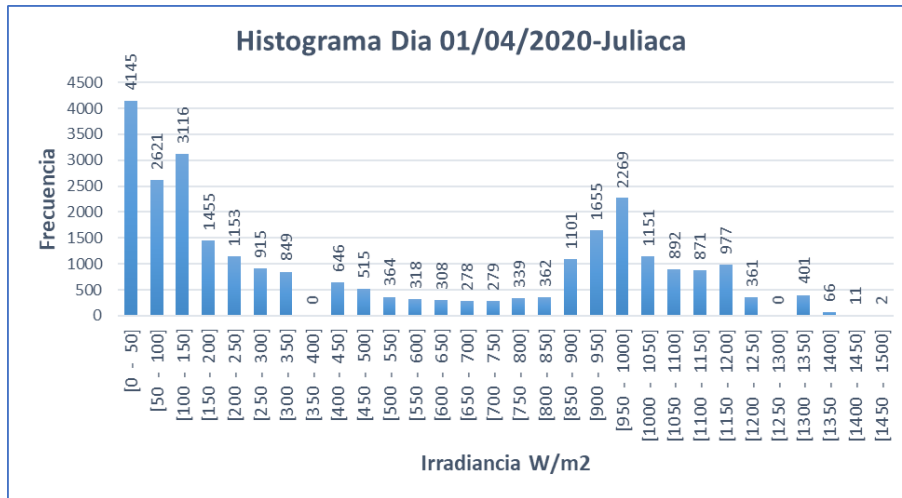


Figura 66. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 01/04/2020-Juliaca.

La Figura 65 y 66, muestra el grafico y el histograma de distribución de frecuencia de Irradiancia del día 01 de abril del 2020, se registra la mayor Irradiancia muy extrema del mes de 1460.86 W/m² a las 11:45:39 hrs., con temperatura del aire a 29.61 °C y presión atmosférica a 647.21 hPa, teniendo una duración de 2 segundos. Para un rango de [1350 W/m²-1460.86 W/m²] se repiten 79 veces y una insolación de 4.03 W/m². En este día, se tiene registrado los eventos de Irradiancia extrema (>1000 W/m²) que constituyeron el 16.97 % de todas las mediciones y un 0.29 % de Irradiancia muy extrema.

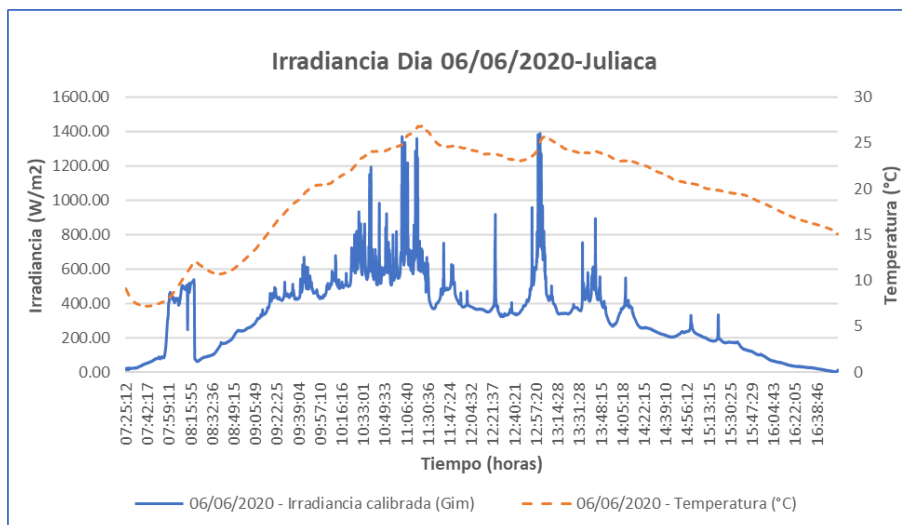


Figura 67. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 06/06/2020-Juliaca.



Figura 68. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 06/06/2020-Juliaca.

La Figura 67 y 68, muestra los resultados de medición de Irradiancia para el día 06 de junio de 2020. La ocurrencia del evento de Irradiancia muy extrema del mes fue de 1389.34 W/m² a las 13:00:55hrs., con una frecuencia de 3 veces y una duración de 2 segundos como máximo. Para un rango de [1367 W/m²-1389 W/m²] se repiten 5 veces, así mismo en este día se alcanzó una temperatura dentro de la cabina de medición de 25.12 °C y una presión atmosférica de 646.65 hPa. y una insolación de 2.71 W/m². En este día, los eventos de Irradiancia extrema (>1000 W/m²) constituyeron el 2.33 % de todas las medidas y 0.04 % de Irradiancia muy extrema.

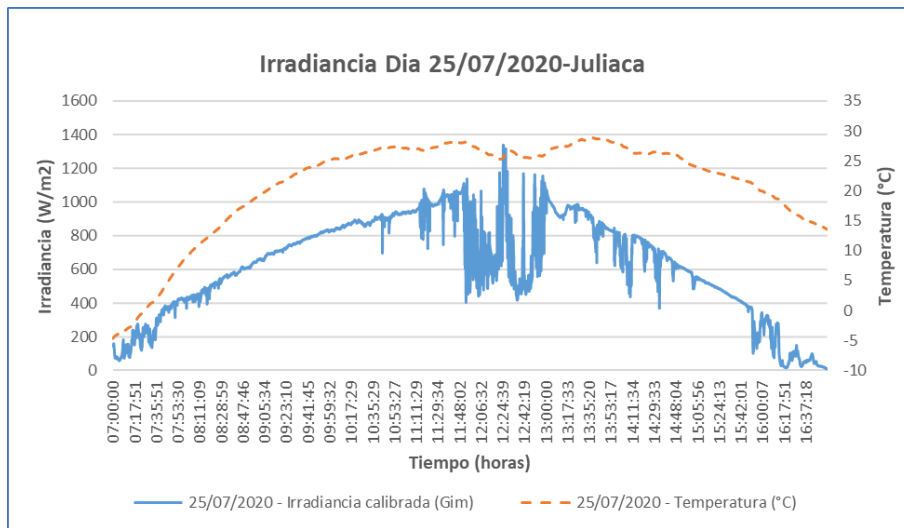


Figura 69. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 25/07/2020-Juliaca.

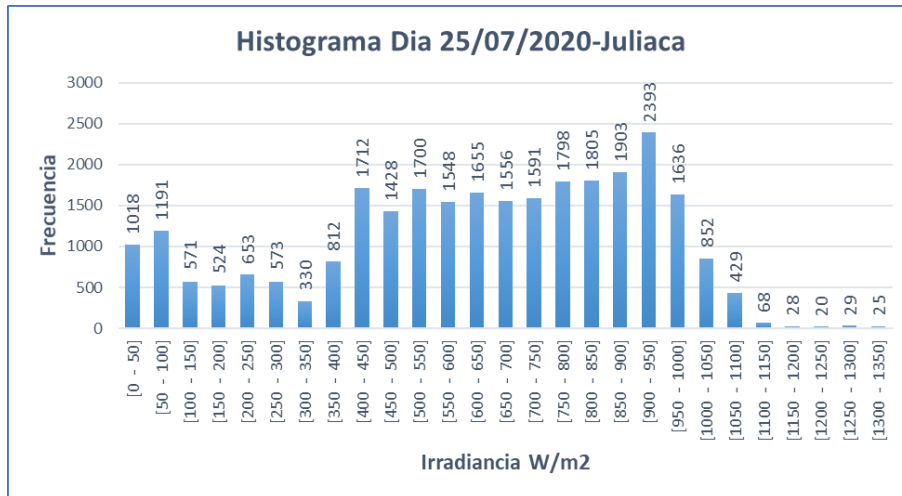


Figura 70. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 25/07/2020-Juliaca.

Las Figuras 69 y 70, se puede observar que no se tiene eventos de Irradiancia muy extrema ($> 1367 \text{ W/m}^2$), pero si, se registraron eventos de Irradiancia extrema ($>1000 \text{ W/m}^2$). La Irradiancia más alta registrada del mes de Julio fue de 1338.47 W/m^2 , el día 25 del mencionado mes a las 12:25:18 hrs., con una frecuencia de 7 veces con duración de 2 segundos. Para un rango de $[1000 \text{ W/m}^2\text{-}1338.47 \text{ W/m}^2]$ se repiten 1451 veces, así mismo en este día se alcanzó una temperatura de aire dentro de la cabina de medición de $31.07 \text{ }^\circ\text{C}$ y una insolación de 5.00 horas solar pico. En este día, los eventos de Irradiancia extrema ($>1000 \text{ W/m}^2$) constituyeron el 11.07 % de todas las medidas.

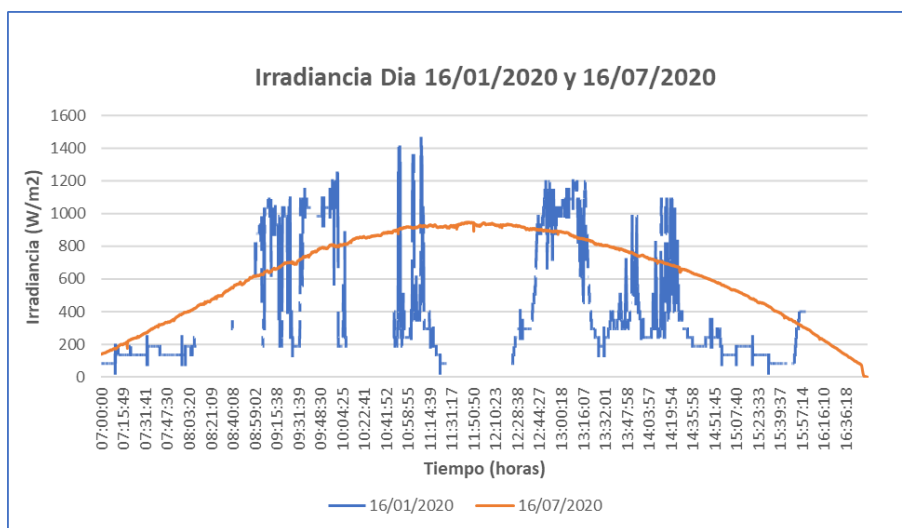


Figura 71. Gráfico de Irradiancia en un día con presencia de nubes y sin presencia de nubes en la ciudad Juliaca.

La Figura 71, muestra la Irradiancia medida en un día nublado y un día de cielo casi despejado. Se observa que, los días con cielo despejado no se producen saltos de amplificación de Irradiancia solar, sin embargo, con días de cielo nublado se observa el efecto conocido como mejora de nube que es más que la amplificación de la Irradiancia solar por encima de los niveles de Irradiancia estándar (Irradiancia extrema > 1000 W/m²) e (Irradiancia muy extrema > 1367 W/m²) conocido también como constante solar.

b) Mediciones registradas por la plataforma sensorial de eventos extremos de Irradiancia solar implementado en la ciudad de Puno.

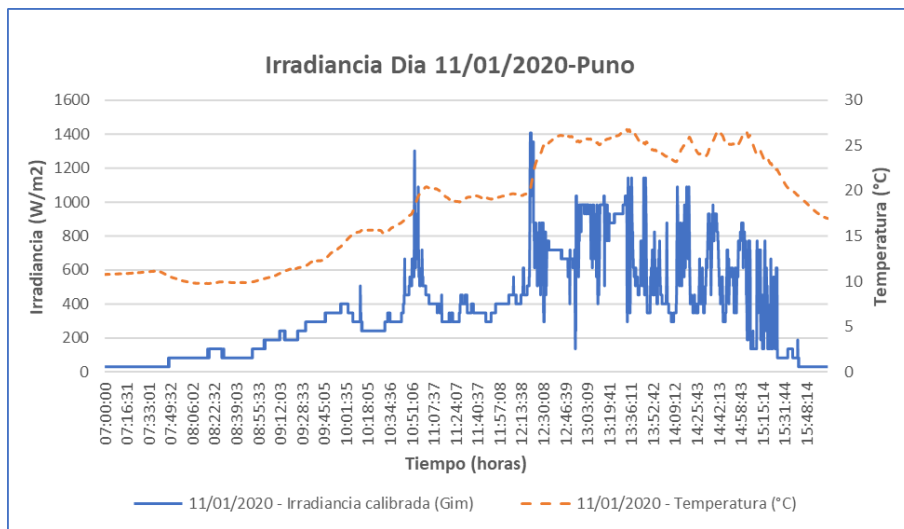


Figura 72. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 11/01/2020-Puno.

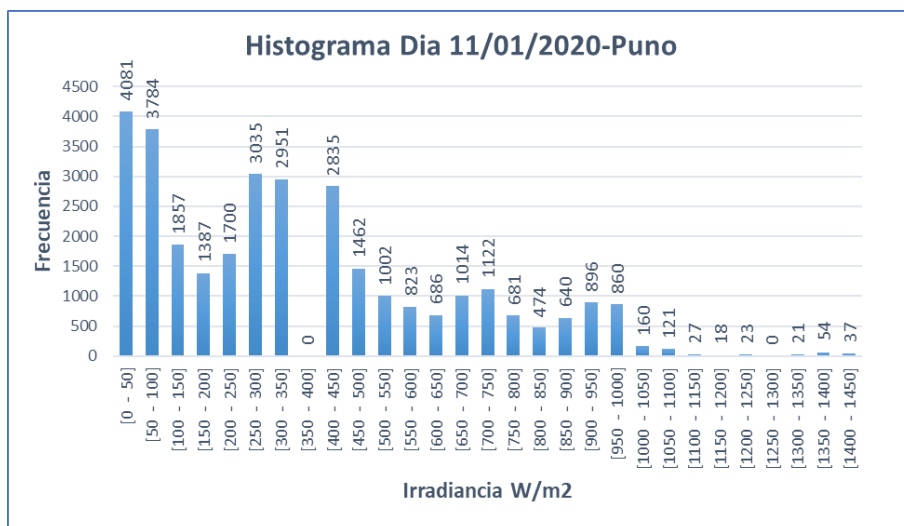


Figura 73. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 11/01/2020-Puno.

Durante el mes de enero el evento extremo registrado en Puno fue de 1407.88 W/m² de Irradiancia muy extrema, el 11 de enero del 2020 a las 12:20:18hrs., con una frecuencia de 37 veces y con duración de 29 segundos como máximo y mínimo de 1 segundo. Desde un rango de [1350 W/m²-1407.88 W/m²] se repiten 91 veces, así mismo en este día se alcanzó una temperatura dentro de la cabina de medición de 26.77 °C y una insolación de 3.43 W/m². En este día, se tiene registrado los eventos de Irradiancia muy extrema (>1367 W/m²) que constituyeron el 0.29 % de todas las mediciones. Como se muestra en la Figura 72 y 73.

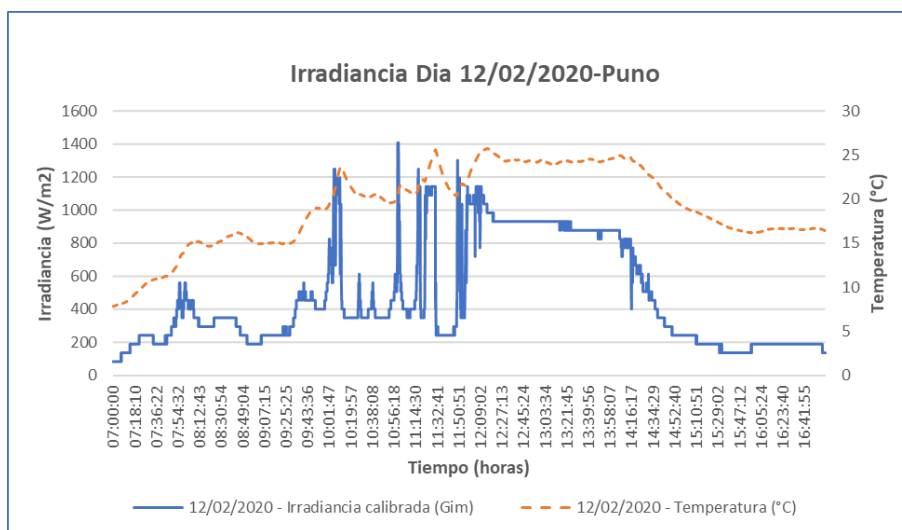


Figura 74. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 12/02/2020-Puno.

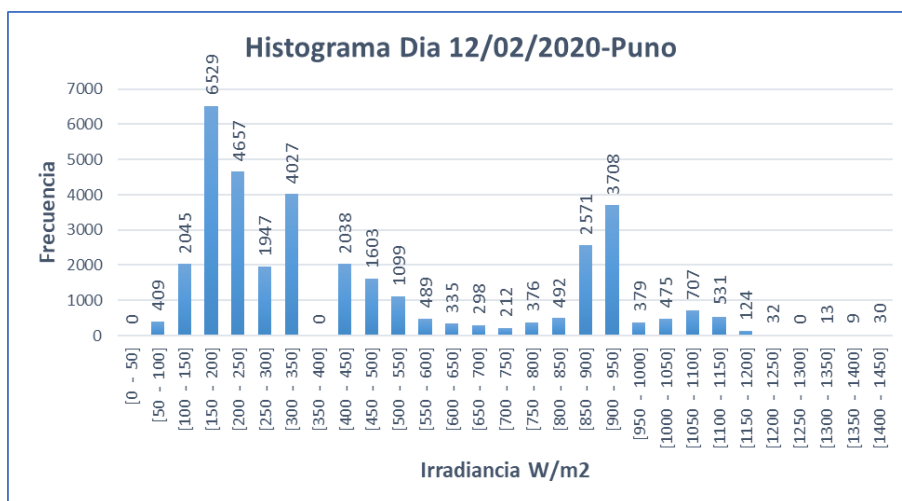


Figura 75. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 12/02/2020-Puno.

El día 12 de febrero del 2020, ocurre el evento de Irradiancia muy extrema del mes de 1407.89 W/m^2 a las 10:59:47hrs., con una frecuencia de 30 veces y con duración de 27 segundos como máximo y mínimo de 2 segundos. Para un rango de [1350 W/m^2 - 1407.88 W/m^2] se repiten 39 veces, así mismo en este día se alcanzó una temperatura dentro de la cabina de medición de $25.76 \text{ }^\circ\text{C}$ y una insolación de 4.65 W/m^2 . En este día, se tiene registrado los eventos de Irradiancia muy extrema ($>1367 \text{ W/m}^2$) que constituyeron el 0.12 % de todas las mediciones. Como se muestra en las Figuras 74 y 75.

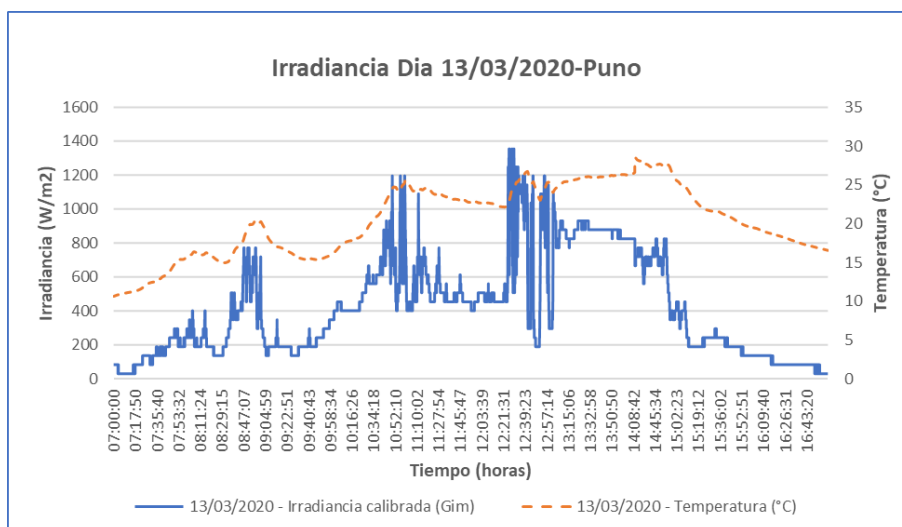


Figura 76. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 13/03/2020-Puno.

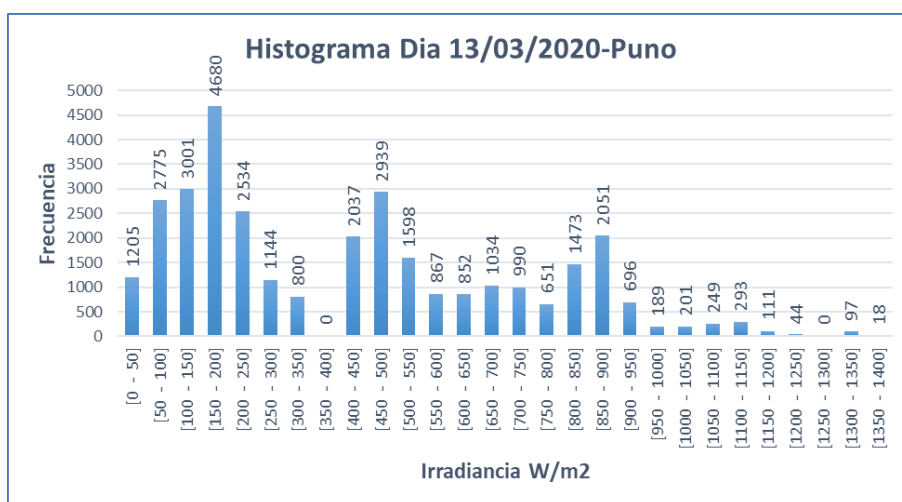


Figura 77. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 13/03/2020-Puno.

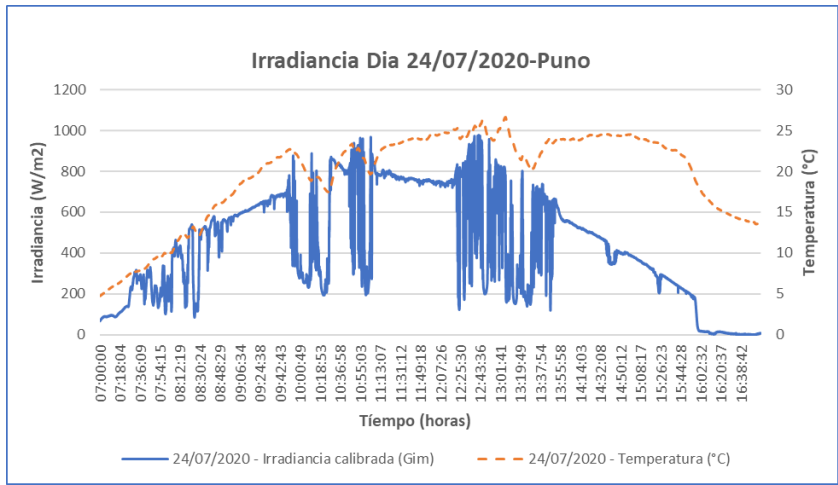


Figura 78. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 24/07/2020-Puno.

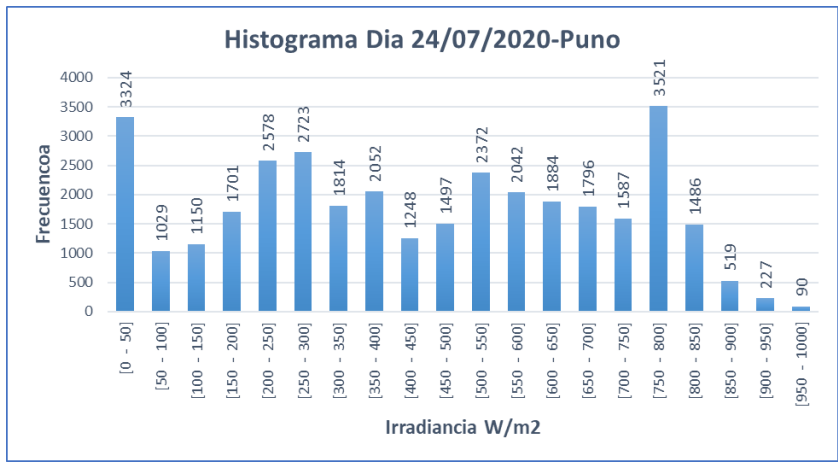


Figura 79. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 24/07/2020-Puno.

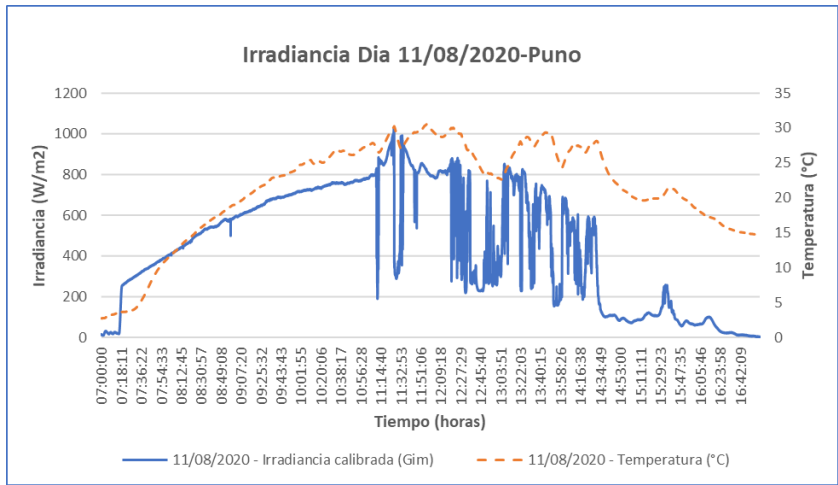


Figura 80. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 24/07/2020-Puno.

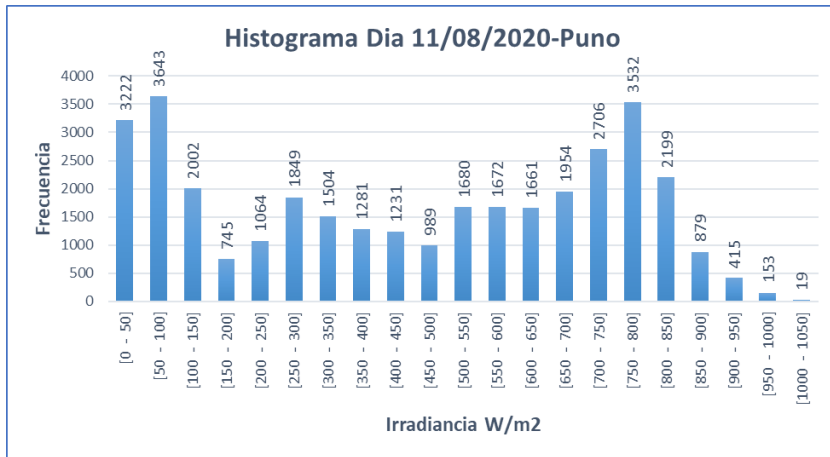


Figura 81. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 24/07/2020-Puno.

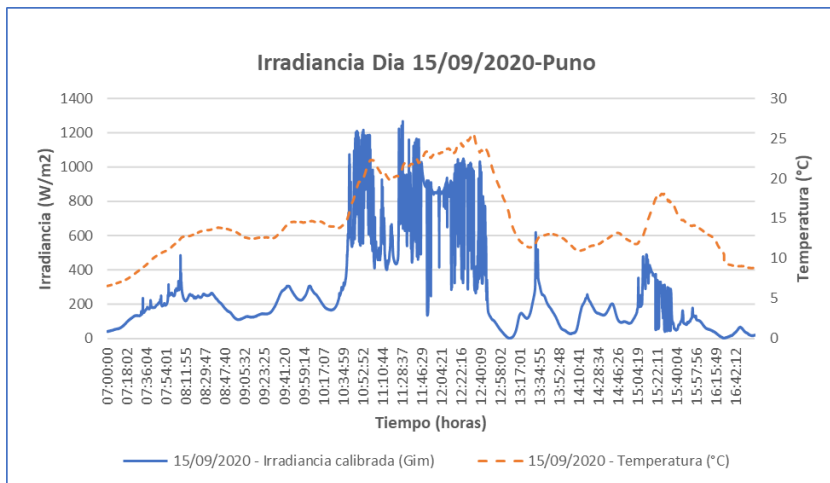


Figura 82. Gráfico de ocurrencia de Irradiancia muy extrema para el 15/09/2020-Puno.

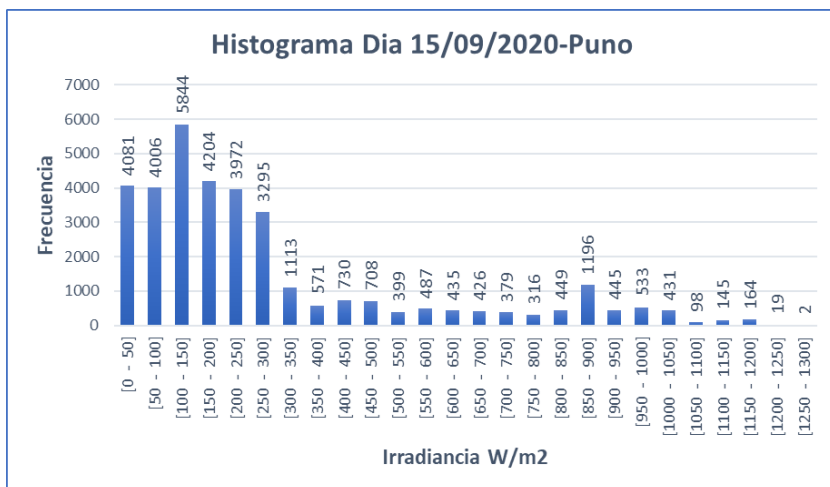


Figura 83. Histograma de frecuencia de Irradiancia muy extrema para el 15/09/2020-Puno.

Durante el periodo de medición marzo, julio, agosto y septiembre no se registró eventos de Irradiancia muy extrema que superan la constante solar (1367 W/m^2), pero si la presencia de Irradiancia extrema que superan el estándar (1000 W/m^2), entre [1075 W/m^2 - 1375 W/m^2] tal como se aprecia en las figuras 71, 73, 75 y 77. Registrando así, el 13 de marzo una Irradiancia extrema de 1354.89 W/m^2 a las 12:26:11hrs., con una duración de 11 segundos y una insolación de 4.01 HSP; el día 24 de julio no se registró ningún evento extremo de Irradiancia solar; el 11 de agosto se registró una Irradiancia extrema máxima medida de 1025.78 W/m^2 a las 11:26:11hrs., con una duración de 9 segundos y una temperatura de aire de $24.57 \text{ }^\circ\text{C}$ y una insolación de 4.54 HSP; el 15 de septiembre se tiene una Irradiancia extrema máxima registrada de 1267.44 W/m^2 a las 11:29:34hrs., con una duración de 2 segundos y una temperatura de $21.50 \text{ }^\circ\text{C}$ y una insolación de 2.94 HSP.

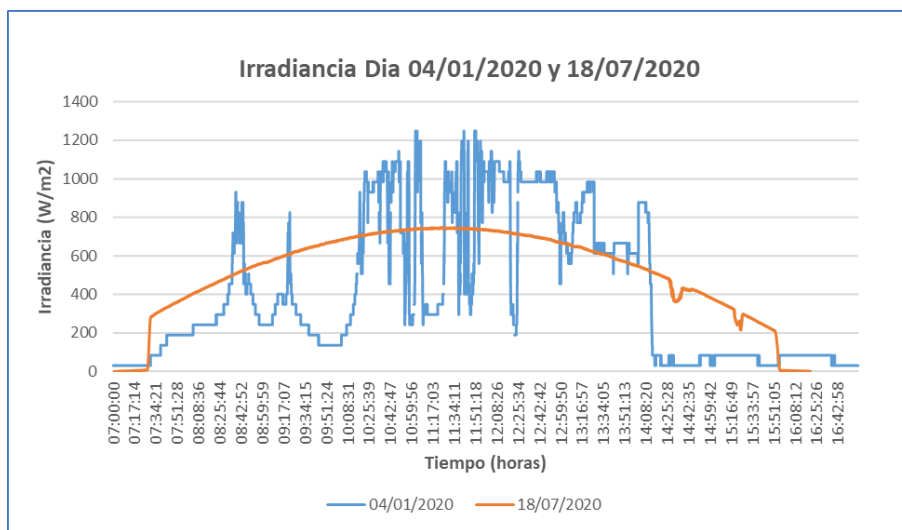


Figura 84. Gráfico de Irradiancia en un día con nubes y sin presencia de nubes en Puno.

Finalmente, la Figura 84, muestra la Irradiancia medida en un día nublado y un día de cielo casi despejado en la ciudad de Puno. Se observa y verifica que nuevamente en los días con cielo despejado no se producen saltos de amplificación de Irradiancia solar, sin embargo, con días de cielo nublado o cierto tipo de nubes, se observa el efecto conocido como mejora de nube que es la amplificación de la Irradiancia solar por encima de los niveles de Irradiancia estándar (Irradiancia extrema $> 1000 \text{ W/m}^2$) e (Irradiancia muy extrema $> 1367 \text{ W/m}^2$) conocido también como constante solar.

La situación climática en nuestra región de Puno, el promedio de porcentaje del cielo cubierto con nubes varía considerablemente en el transcurso del año. La parte más despejada del año en la región puno comienza aproximadamente el 21 de abril y tiene una duración de 5.2 meses y se termina aproximadamente el 27 de septiembre. La parte más nublada del año comienza aproximadamente el 27 de septiembre y tiene una duración de 6.8 meses y se termina aproximadamente el 21 de abril. Durante el periodo de cielo cubierto en nuestra región aumenta la posibilidad de los eventos extremos, debido a los reflejos en los bordes de las nubes conocido también como el efecto de mejora de nube.

Estas mediciones se lograron como resultado de una plataforma sensorial diseñada para brindar información sobre eventos extremos de Irradiancia solar implementadas en las ciudades de Puno y Juliaca. En resumen, todos los resultados indican que los sistemas de medición con estas características podrían proporcionar un excelente soporte para aplicaciones de medición, monitoreo y almacenamiento de datos en tiempo real y con una baja inversión para sistemas fotovoltaicos pequeños y plantas fotovoltaicas. Finalmente, estos eventos extremos de Irradiancia solar registrados deben tomarse en consideración en estudios de sistemas fotovoltaicos y radiación solar relacionados con los rayos UV.

4.2 Discusión

A partir de los resultados encontrados durante el periodo de medición de eventos extremos de Irradiancia solar se puede compartir y mencionar que:

Estos resultados guardan relación con lo que sostiene (G. Yordanov et al., 2012), (Piedehierro et al., 2014) y (De Andrade & Tiba, 2016) en investigaciones realizadas, quienes señalan que los eventos extremos de Irradiancia solar se presentan durante condiciones nubladas. Estos autores señalan que la presencia de nubes en el cielo en la posición del sol, puede resultar directamente una disminución en la intensidad de Irradiancia directa en los sistemas fotovoltaicos y por lo tanto indirectamente en la producción de energía. Sin embargo, el comportamiento en condiciones parcialmente nubladas, la Irradiancia difusa en los sistemas fotovoltaicos puede aumentar la intensidad debido a la reflexión de la Irradiancia solar, esto por la dispersión de la Irradiancia directa desde la base de las nubes. Es por ello que las nubes juegan un papel importante en la variación de la Irradiancia solar a corto plazo, causando eventos que

van desde una reducción casi total hasta mejoras sustanciales, en ciertas condiciones. Echo que es verificable con lo que este estudio se halla

De los resultados también se ha demostrado y relacionado con estudios de (G. H. Yordanov et al., 2013), (Jamaly & Kleissl, 2018) y (Espinosa et al., 2018), que los eventos de Irradiancia solar extrema, pueden durar segundos a minutos, dependiendo de la velocidad de movimiento y cierto tipo de nube. Para un diseño adecuado de redes en medición y monitores por sensores se debe considerar cuidadosamente la respuesta de tiempo de los sensores. El principal desafío está relacionado con las variaciones drásticas de espacio y tiempo que se dan en la generación fotovoltaica producida por las nubes, el movimiento y tiempo que se tiene en cierto tipo de nube que está relacionado con las variaciones en el campo de la Irradiancia a escalas de segundos y metros, lo que impacta particularmente en pequeños sistemas fotovoltaicos. Echo que también es verificable con lo que en este estudio se halla.

Según (Tapakis & Charalambides, 2014), las condiciones meteorológicas que provocan un aumento en la Irradiancia no son raras, los valores de Irradiancia muy altos, a menudo no se mencionan en bibliografías. Esto se debe principalmente al largo tiempo de respuesta de los equipos de medición de Irradiancia utilizados, ignorando así fluctuaciones de Irradiancia instantánea y registrando así valores medios de Irradiancia y no el máximo.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En el proceso de elaboración del presente proyecto de investigación con base a la información que se ha logrado recopilar, haciendo uso de las herramientas y bibliografía para el levantamiento de la información, se pudo conocer y concluir de manera general que realmente existe eventos extremos de Irradiancia solar en nuestra región a más de 3800 m.s.n.m.

De acuerdo a nuestro planteamiento del problema enfocados en los objetivos y lineamientos se concluye que:

- El presente trabajo de investigación, se logró desarrollar e implementar una plataforma sensorial para la medición y monitoreo de eventos extremos de Irradiancia solar adaptado a las necesidades y condiciones geográficas y climatológicas de nuestra región con sistemas fotovoltaicos al nivel (micrometeorológico y microescala), basado en IOT y con autonomía energética. La plataforma sensorial realizó la comunicación y almacenamiento de datos, implementada como una red de sensores inalámbricos basada en el estándar IEEE 802.11, con los conceptos de “internet de las cosas” IOT. El sistema de medición pudo monitorear los valores registrados en tiempo real, almacenarlos y mostrárselos a usuarios remotos a través de un servidor web o aplicativo Android. Además, el sistema puede enviar una alerta de notificación al correo de Irradiancia muy extrema, aplicaciones con la que cuenta ThingSpeak.
- El módulo fotovoltaico calibrado y el microcontrolador, identificaron las variaciones y saltos más altos registrados de eventos extremos de Irradiancia solar. Durante el periodo de medición en la ciudad de Juliaca, la plataforma pudo capturar las variaciones de Irradiancia asociadas con el movimiento de las nubes. En consecuencia, la Irradiancia más alta registrada en este periodo fue de $1566.87 \text{ W} / \text{m}^2$, el día 04 de marzo de 2020 a las 12:19:26 hora local con una duración de 13 segundos, corresponde al primer evento extremo registrado y documentados a una latitud -15.48805°S y una altitud de 3832 msnm y la Irradiancia con mayor duración fue de $1407.89 \text{ W} / \text{m}^2$, el día 19 de enero de 2020 a las 11:42:19 con una duración de 46 segundos. Durante el periodo de medición

en la ciudad de Puno, de la misma manera la plataforma pudo capturar las variaciones de Irradiancia asociadas con el movimiento de las nubes. En consecuencia, la Irradiancia más alta registrada en este periodo fue de $1407.89 \text{ W} / \text{m}^2$, el día 11 de enero de 2020 a las 12:20:18 hora local con una duración de 29 segundos, la misma Irradiancia se registró el día 12 de febrero a las 10:59:54 con una duración de 27 segundos, eventos extremos registrado a una latitud $-15.82574 \text{ }^\circ\text{S}$ y una altitud de 3818 msnm y la Irradiancia con mayor duración fue de $1248.90 \text{ W} / \text{m}^2$, el día 12 de enero del 2020 a las 12:10:57 con una duración de 39 segundos.

- Se logro analizar y concluir que los eventos extremos de Irradiancia solar, han mostrado valores muy altos al nivel de la superficie de nuestra región de Puno, debido a las condiciones geográficas y climatológicas que influyen y se presentan al momento de la medición. Se observan valores mayores a la Irradiancia estándar $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ y por encima de la constante solar $1367 \text{ W} / \text{m}^2$, estos resultados se relacionan y comprueban el fenómeno de mejora de las nubes. Además, existe un comportamiento estacional para estos eventos extremos de Irradiancia solar, por su presencia en primavera y verano, estaciones del año con más presencia de nubes. El fenómeno ocurre principalmente por la mañana, la explicación de la mayor ocurrencia de eventos extremos por la mañana, se debe a mayores velocidades del viento en la tarde, lo que provoca una disipación más rápida de las nubes. Finalmente, los resultados obtenidos indican que los sistemas de medición con estas características podrían proporcionar un excelente soporte para aplicaciones de medición, monitoreo y almacenamiento de datos en tiempo real, demostrando que la plataforma sensorial es viable, confiable y de bajo costo para sistemas fotovoltaicos pequeños y centrales fotovoltaicas.

5.2 Recomendaciones

- Desarrollar una plataforma de seguimiento de mediciones y monitoreo mediante capturas de imágenes in situ de las nubes, durante eventos extremos de Irradiancia solar, para poder determinar y conocer el tipo de nube que produce el aumento de la Irradiancia solar.
- Realizar estudios profundos de mediciones con mayor duración de registro de datos con periodos de un año y por estaciones del año para obtener así una base de datos más sólida de eventos extremos de Irradiancia solar y mejores resultados.
- Implementar más proyectos de investigación basado en el IOT para mediciones de más parámetros ambientales a nivel micrometeorológico y microescala y patentar este tipo de equipamientos para su desarrollo de este tipo de aplicaciones.

5.2.1 Sugerencias

Desarrollar plataformas de medición basado en IOT para medir otros índices o parámetros ambientales relacionados con monitoreo, como velocidad del viento, confort térmico, humedad del suelo, etc.

Lo más importante del desarrollo de esta plataforma de medición fue el diseño y validación de los datos, para su implementación, lo que permitió la medición, identificación y monitoreo de eventos extremos Irradiancia solar extrema ($>1000 \text{ W/m}^2$) e Irradiancia solar muy extrema ($>1367 \text{ W/m}^2$).

Estos eventos extremos de Irradiancia solar registrados deberían tomarse en consideración y realizarse más estudios y discusión en el ámbito nacional, para estudios de sistemas fotovoltaicos y su relación con los rayos UV.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abe, F., Dias, B., Notton, G., & Faggianelli, A. (2020). Experimental application of methods to compute solar irradiance and cell temperature of photovoltaic modules. *Sensors (Switzerland)*, 20(9), 17. <https://doi.org/10.3390/s20092490>
- Almeida, P., Zilles, R., & Lorenzo, E. (2014). Extreme overirradiance events in Sao Paulo, Brazil. *ScienceDirect*, 110, 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.012>
- Andrade, R. C. (2016). *Efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global medido no nordeste do brasil*.
- Bayon, E. (2018). *Diseño de un instrumento basado en Arduino para la medida de irradiancia solar*. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.
- Bosch, S. (2015). *BMP280: Digital Pressure Sensor*. 49. Retrieved from <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP280-DS001-11.pdf>
- Ccama, P. (2017). *Diseño de un sistema de señalización utilizando sensores fotovoltaicos para la prevención de los efectos de la radiación solar para los estudiantes de la EPIE*. 122.
- Cepeda, J., & Sierra, A. (2016). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones. *Universidad Santo Tomas*, 10.
- Chambi, V. (2018). *Estudio y análisis de la actividad solar , radiación solar global y radiación UV en la Ciudad de Arequipa*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA.
- Chase, O. A., Teles, M. B., Rodrigues, M. de J. dos S., de Almeida, J. F. S., Macêdo, W. N., & da Costa Junior, C. T. (2018). A low-cost, stand-alone sensory platform for monitoring extreme solar overirradiance events. *Sensors (Switzerland)*, 18(8), 13. <https://doi.org/10.3390/s18082685>
- Collaguazo, S. (2019). *Estimación De Irradiancia Solar Basada En Modelos Matemáticos Y Medición De Variables Eléctricas De Paneles Fotovoltaicos* (Vol. 1).
- Corp, A. (2015). *TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8*. 3.

- De Andrade, R. C., & Tiba, C. (2016). Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil. *Renewable Energy*, 86, 1433–1441. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.012>
- Diaz, M., & Toro, E. (2019). *Diseño de un dispositivo para estimar y predecir la radiación solar en Lambayeque utilizando modelos empíricos y redes neuronales*. UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO FACULTAD.
- Eliseo, S. (2020). Radiación Solar, Irradiancia e Insolación. Retrieved May 19, 2020, from 2014 website: <https://eliseosebastian.tumblr.com/post/53530683135/radiación-solar-irradiancia-e-insolación>
- Enel. (2018). Rubí, Central solar fotovoltaica. Retrieved December 28, 2020, from <https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/rubi-la-central-solar-de-enel-mas-grande-del-peru.html>
- Espinosa, M., Aguera, A., Gonzales, J., & Jose, P. (2018). An on-line low-cost irradiance monitoring network with sub-second sampling adapted to small-scale PV systems. *Sensors (Switzerland)*, 18(10), 1–12. <https://doi.org/10.3390/s18103405>
- Feliciano, R. A. (2019). *Sistemas fotovoltaicos con módulos bifaciales : estudio comparativo de su rendimiento (PR) en distintas condiciones de irradiancia y temperatura*.
- Fernández, J. (2009). *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*.
- FilipeFlop. (2018). Componentes Eletrônicos - O Maior Portal Maker do Brasil. Retrieved September 29, 2020, from <https://www.filipeflop.com/>
- GeoDesign. (2020). Geodesing Recurso Solar. Retrieved from 2016 website: <http://recursosolar.geodesign.com.br/>
- Gimenez, P. (2019). *Comparativa de alternativas de bajo coste para la medición de irradiancia solar*. Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.
- Gimeno, J., Orts, S., & Segui, S. (2014). *Curso “Energía solar fotovoltaica – una apuesta de futuro sostenible”*. (Trina Sola). Retrieved from <https://www.trinasolar.com/es/about-solar/why-solar>

- Gomez, F. (2015). *Sistema Fotovoltaico para el ahorro de energía eléctrica en el servicio de alumbrado general de Condominios*. 91. Retrieved from [http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3926/Lagos Gómez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3926/Lagos_Gómez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Grimm, A. (2020). *Meteorología Básica*. Retrieved from <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Hafemeister, A. (2019). *Interface de supervisão para uma plataforma experimental de pesquisa e ensino em energia solar fotovoltaica (Vol. 53)*.
- Jamaly, M., & Kleissl, J. (2018). Robust cloud motion estimation by spatio-temporal correlation analysis of irradiance data. *Solar Energy*, 159(October 2017), 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.075>
- Luoma, J., Kleissl, J., & Murray, K. (2012). Optimal inverter sizing considering cloud enhancement. *Solar Energy*, 86(1), 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.10.012>
- Marenco, F., Merino, H., & Orellana, M. (2017). *Monitoreo de Irradiancia Solar en los diferentes Campus de la Universidad de El Salvador*.
- MathWorks. (2020). *Conceptos básicos de MQTT - MATLAB y Simulink*. Retrieved October 27, 2020, from <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/mqtt-basics.html>
- Maxim Integrated. (2015). DS 3231 RTC General Description. *Data Sheet*, 20. Retrieved from <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>
- Mejía, C., Chacón, J., Hernández, N., Talledo, L., Vega-, V., Vásquez, L., ... Cárdenas, M. (2018). Protección contra la radiación solar en trabajadores de empresas peruanas: prácticas y cuidado personal, 2016. *Rev Mex*, 2(62), 101–110. Retrieved from <https://www.medigraphic.com/pdfs/derrevmex/rmd-2018/rmd182d.pdf>

- Mendonça, H. (2016). SPI e I2C. Retrieved October 28, 2020, from <https://paginas.fe.up.pt/~hsm/docencia/comp/spi-e-i2c/>
- Messenger, R. A., & Ventre, J. (2005). *Photovoltaic Systems Engineering* (2 edición; Taylor & Francis, Eds.). <https://doi.org/10.1201/9781315218397>
- Oliveira, S. (2017). Internet das coisas com ESP8266, ARDUINO. In R. Prates (Ed.), *Novatec* (Novatec). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Paulo, J., & Ramos, A. (2017). *Calibração e avaliação de modelos para estimativa da radiação solar global para o Brasil*. Universidade de São Paulo.
- Pereira, E., Martins, F., Gonçalves, A., Costa, R., Lopez, F., Rütther, R., ... Souza, J. (2017). *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. Retrieved from <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>
- Perpiñan, O. (2018). Energia Solar Fotovoltaica. In *História, Ciências, Saúde-Manguinhos* (Vol. 8). <https://doi.org/10.1590/s0104-59702001000400018>
- Piacentini, R., Salum, G., Fraidenraich, N., & Tiba, C. (2011). Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. *Renewable Energy*, 36(1), 409–412. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.009>
- Piedehierro, A., Antón, M., Cazorla, A., Alados, L., & Olmo, J. (2014). Evaluation of enhancement events of total solar irradiance during cloudy conditions at Granada (Southeastern Spain). *Atmospheric Research*, 135–136, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.08.008>
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2016). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos* (Vol. 10). <https://doi.org/10.21439/conexoes.v10i5.1160>
- Quaschnig, V. (2005). *Understanding Renewable Energy Systems* (Earthscan).
- Ramos, J., Beltran, N., Aquino, E., Sarmiento, V., Condori, Y., & Negrao, W. (2019). *Ocurrencias de Irradiancia Solar Extrema a 3812 m . s . n . m . , a nivel del Lago Titicaca (Puno – Perú)*. 1–5.
- Rodriguez, F. (2015). *Influencia de la Radiación Solar en la Salud de las Personas en la Ciudad*

- de Moquegua, 2001 - 2010. Retrieved from http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/1031/TM187_Rodriguez_Ordon ez_FR .pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Souza, R. (2016). Os sistema de energia solar fotovoltaica. In *Bluesol - energia solar*. Retrieved from <https://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdução-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>
- Sumathi, S., Kumar, L., & Surekha, P. (2015). *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems* (Springer). <https://doi.org/10.1007/9783319149417>
- Tapakis, R., & Charalambides, A. G. (2014). Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean. *Renewable Energy*, 62, 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.001>
- Texas Instruments. (2011). *INA219: current / power monitor with I2C Interface*. (7), 1–40. Retrieved from <http://www.ti.com/product/ina219>
- ThingSpeak. (2019). Plataforma de ThingSpeak IoT. Retrieved September 29, 2020, from <https://thingspeak.com/login>
- USINAINFO. (2020). Arduino, Robótica, Componentes Eletrônicos e Ferramentas - Usinainfo. Retrieved October 2, 2020, from <https://www.usinainfo.com.br/>
- Yordanov, G. H., Saetre, T. O., & Midtgard, O. (2013). 100-millisecond Resolution for Accurate Overirradiance Measurements. *IEEE*, 3(4), 1354–1360.
- Yordanov, G. H., Saetre, T. O., & Midtgård, O. M. (2015). Extreme overirradiance events in Norway: 1.6 suns measured close to 60°N. *Solar Energy*, 115(June 2013), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.020>
- Yordanov, G., Midtgard, O., Saetre, O., Nielsen, H., & Norum, L. (2012). Overirradiance (Cloud Enhancement) Events at High Latitudes. *IEEE*, 1–7.

ANEXOS

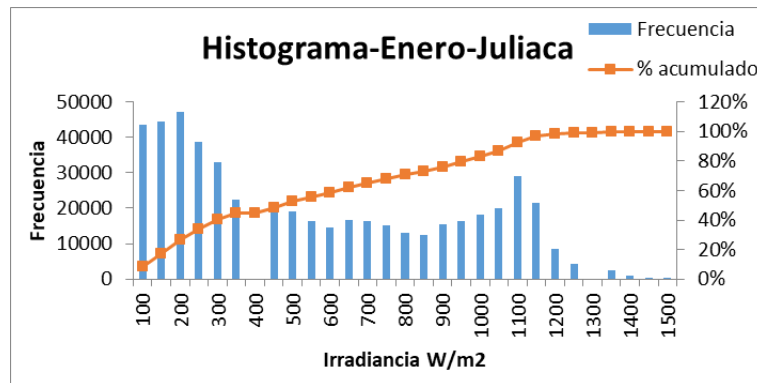
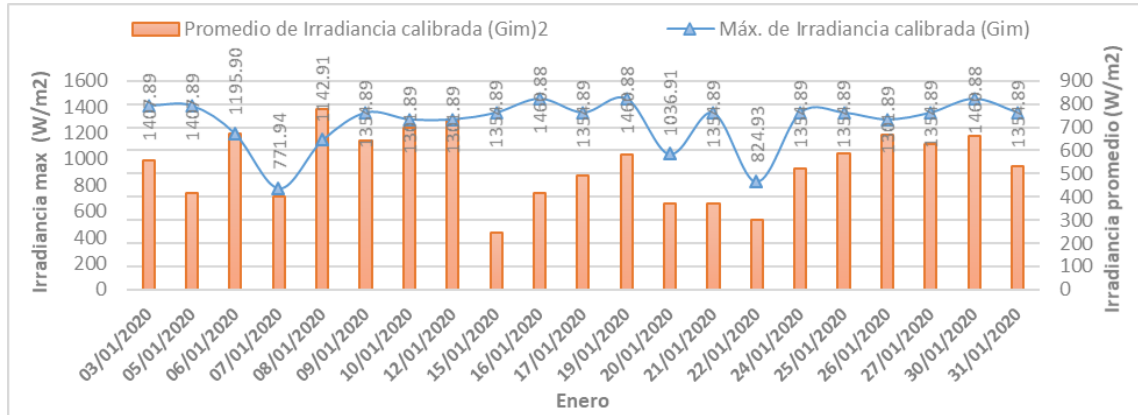
Anexo 1. Muestra de datos para su procesamiento y análisis estadístico en software de Excel

Fecha	Hora	Corriente (Isc)	Irradiancia calibrada (Gim)	Irradiancia (fv)	Temperatura (°C)	Presion (hPa)
05/01/2020	07:00:00	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:01	0.02	82.99	83.33	11.98	646.68
05/01/2020	07:00:02	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:03	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:05	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:06	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:07	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:08	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:10	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:11	0.02	82.99	83.33	11.97	646.66
05/01/2020	07:00:12	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:13	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:14	0.02	82.99	83.33	11.98	646.67
05/01/2020	07:00:16	0.02	82.99	83.33	11.98	646.67
05/01/2020	07:00:17	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:18	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:19	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:20	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:22	0.02	82.99	83.33	11.98	646.63
05/01/2020	07:00:23	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:24	0.02	82.99	83.33	11.98	646.67
05/01/2020	07:00:25	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:26	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:28	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:29	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:30	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:31	0.02	82.99	83.33	11.98	646.67
05/01/2020	07:00:32	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:34	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:35	0.02	82.99	83.33	11.99	646.64
05/01/2020	07:00:36	0.02	82.99	83.33	11.99	646.66
05/01/2020	07:00:37	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:38	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:39	0.02	82.99	83.33	11.99	646.67
05/01/2020	07:00:41	0.02	82.99	83.33	11.98	646.67
05/01/2020	07:00:42	0.02	82.99	83.33	11.99	646.66
05/01/2020	07:00:43	0.02	82.99	83.33	11.99	646.65
05/01/2020	07:00:44	0.02	82.99	83.33	11.98	646.67
05/01/2020	07:00:45	0.02	82.99	83.33	11.98	646.68
05/01/2020	07:00:46	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:48	0.02	82.99	83.33	11.98	646.68
05/01/2020	07:00:49	0.02	82.99	83.33	11.98	646.68
05/01/2020	07:00:50	0.02	82.99	83.33	11.98	646.69
05/01/2020	07:00:51	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:52	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:53	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:55	0.02	82.99	83.33	11.98	646.65
05/01/2020	07:00:56	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:57	0.02	82.99	83.33	11.98	646.64
05/01/2020	07:00:58	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66
05/01/2020	07:00:59	0.02	82.99	83.33	11.98	646.67
05/01/2020	07:01:00	0.02	82.99	83.33	11.98	646.66

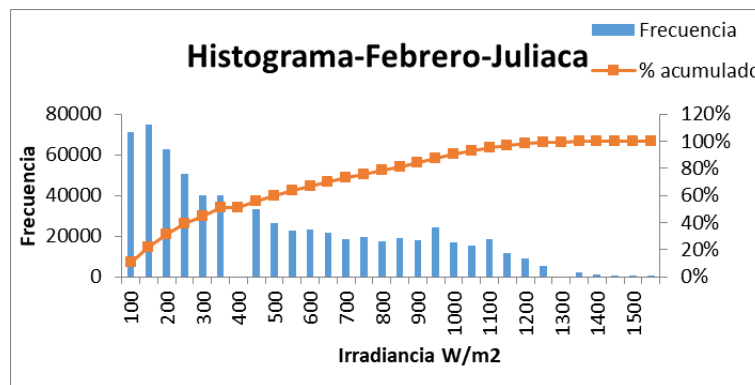
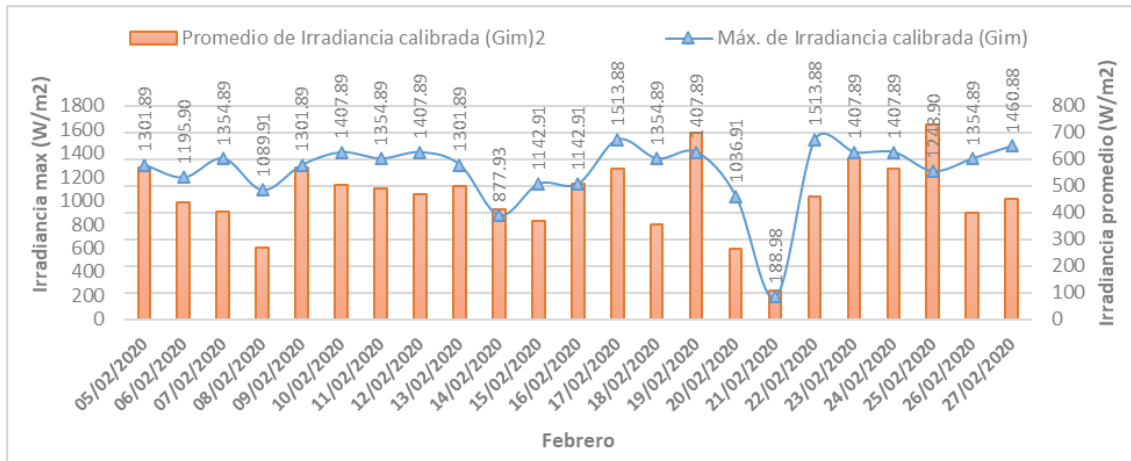
Anexo 2. Tabla comparativa de Irradiancia entre plataforma sensorial y modulo i950W-Slim calibrado (patrón)

N° Datos	Hora	Irradiancia de la Plataforma de medición (W/m ²)	Irradiancia del modulo i950W-Slim Calibrado (W/m ²)	Error absoluto	Error porcentual (%)
1	09:56:57	855.00	865.51	10.51	1.21
2	10:01:57	906.67	922.28	15.61	1.69
3	10:06:57	838.75	849.10	10.35	1.22
4	10:11:57	961.25	974.01	12.76	1.31
5	10:16:57	987.50	1008.07	20.57	2.04
6	10:21:57	913.75	918.50	4.75	0.52
7	10:26:58	916.25	921.02	4.77	0.52
8	10:31:58	980.83	1000.50	19.67	1.97
9	10:36:58	956.25	975.27	19.02	1.95
10	10:41:58	950.00	966.44	16.44	1.70
11	10:46:58	913.33	922.28	8.95	0.97
12	10:51:58	940.00	956.35	16.35	1.71
13	10:56:58	995.42	1020.69	25.27	2.48
14	11:01:58	937.92	948.78	10.86	1.14
15	11:06:58	928.75	943.73	14.98	1.59
16	11:11:58	931.25	941.21	9.96	1.06
17	11:16:58	951.67	976.53	24.86	2.55
18	11:21:58	955.42	980.32	24.90	2.54
19	11:26:58	939.58	958.87	19.29	2.01
20	11:31:58	976.25	999.24	22.99	2.30
21	11:36:58	232.92	239.09	6.17	2.58
22	11:41:58	931.67	948.78	17.11	1.80
23	11:46:58	1011.25	1038.35	27.10	2.61
24	11:51:59	1070.00	1110.27	40.27	3.63
25	11:56:59	938.75	953.82	15.07	1.58
26	12:01:59	992.50	1018.17	25.67	2.52
27	12:06:59	1010.83	1038.35	27.52	2.65
28	12:11:59	1027.50	1059.80	32.30	3.05
29	12:16:59	1025.83	1050.97	25.14	2.39
30	12:21:59	1028.33	1058.54	30.21	2.85
31	12:27:00	976.67	1000.50	23.83	2.38
32	12:32:00	997.92	1024.48	26.56	2.59
33	12:37:00	1007.50	1025.74	18.24	1.78
34	12:42:00	983.33	1004.29	20.96	2.09
				19.09	1.97

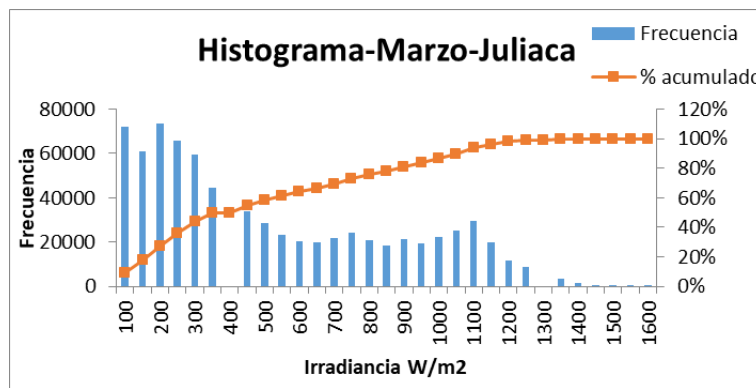
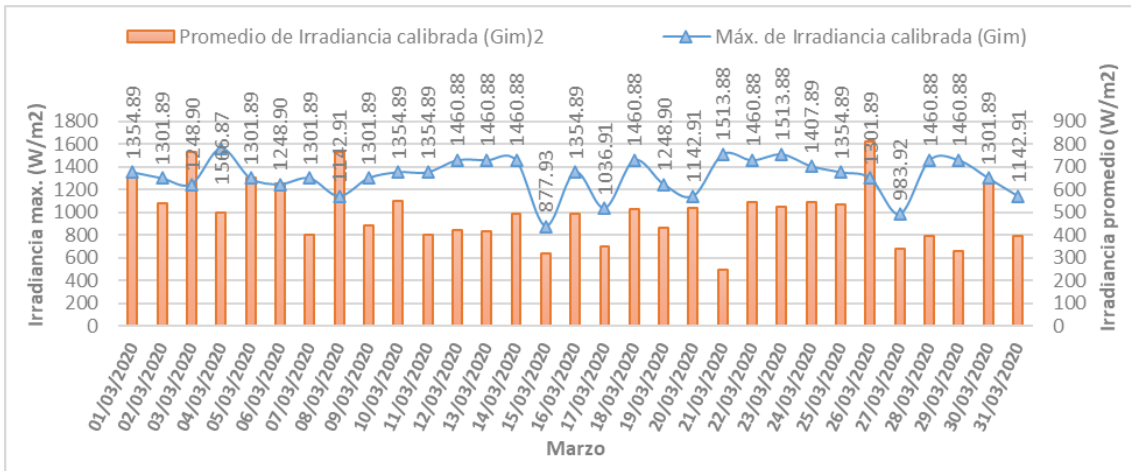
Anexo 3. Irradiancia máxima, promedio y distribución de frecuencia; registrados por la plataforma durante el periodo de medición en la ciudad de Juliaca



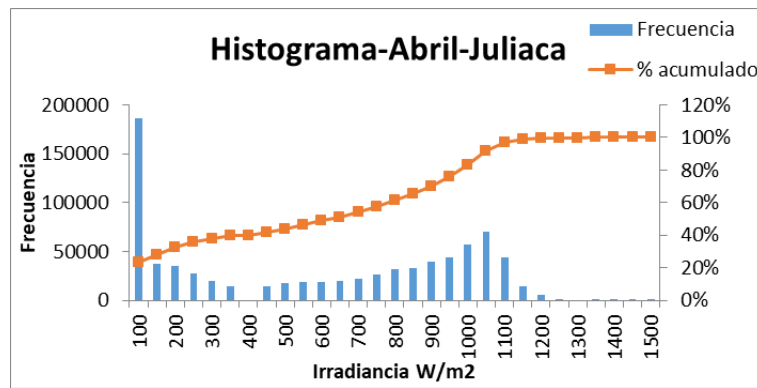
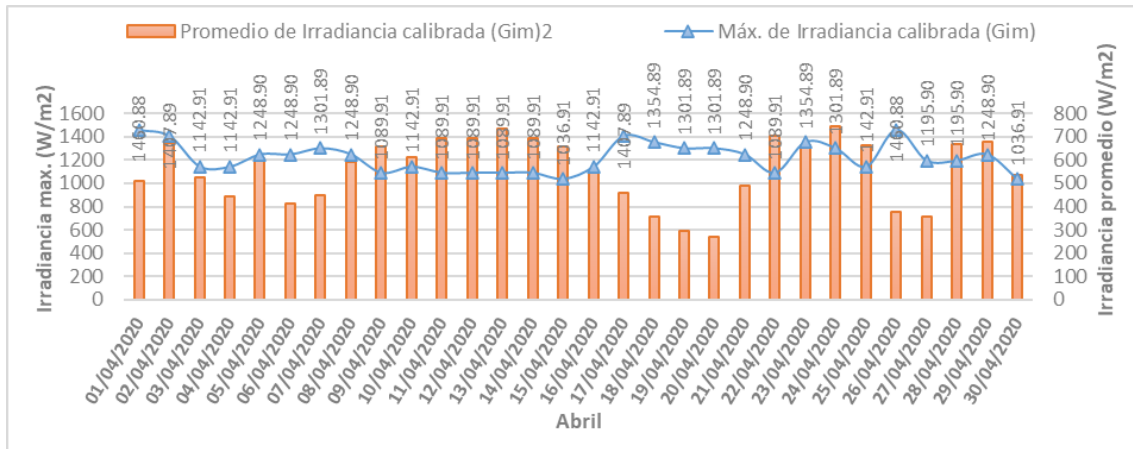
Distribución de frecuencia mes ENERO - JULIACA						
W/m²	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m²
50	[0 - 50]	0	50	0	0.00%	0.00
100	[50 - 100]	50	100	43343	8.52%	1.20
150	[100 - 150]	100	150	44333	8.71%	1.85
200	[150 - 200]	150	200	46984	9.24%	2.61
250	[200 - 250]	200	250	38748	7.62%	2.69
300	[250 - 300]	250	300	32894	6.47%	2.74
350	[300 - 350]	300	350	22374	4.40%	2.18
400	[350 - 400]	350	400	0	0.00%	0.00
450	[400 - 450]	400	450	18895	3.71%	2.36
500	[450 - 500]	450	500	19223	3.78%	2.67
550	[500 - 550]	500	550	16333	3.21%	2.50
600	[550 - 600]	550	600	14426	2.84%	2.40
650	[600 - 650]	600	650	16767	3.30%	3.03
700	[650 - 700]	650	700	16484	3.24%	3.21
750	[700 - 750]	700	750	15240	3.00%	3.18
800	[750 - 800]	750	800	12968	2.55%	2.88
850	[800 - 850]	800	850	12565	2.47%	2.97
900	[850 - 900]	850	900	15505	3.05%	3.88
950	[900 - 950]	900	950	16260	3.20%	4.29
1000	[950 - 1000]	950	1000	18113	3.56%	5.03
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	19942	3.92%	5.82
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	29142	5.73%	8.90
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	21499	4.23%	6.87
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	8535	1.68%	2.85
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	4294	0.84%	1.49
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	0	0.00%	0.00
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	2649	0.52%	0.99
1400	[1350 - 1400]	1350	1400	900	0.18%	0.35
1450	[1400 - 1450]	1400	1450	304	0.06%	0.12
1500	[1450 - 1500]	1450	1500	33	0.01%	0.01
N° DATOS				508753	HSP	3.76



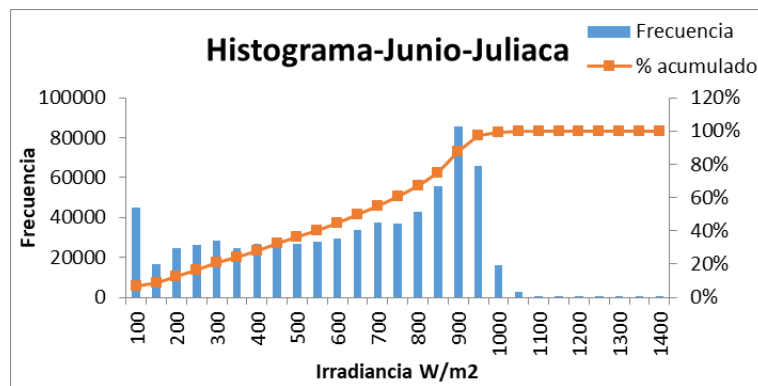
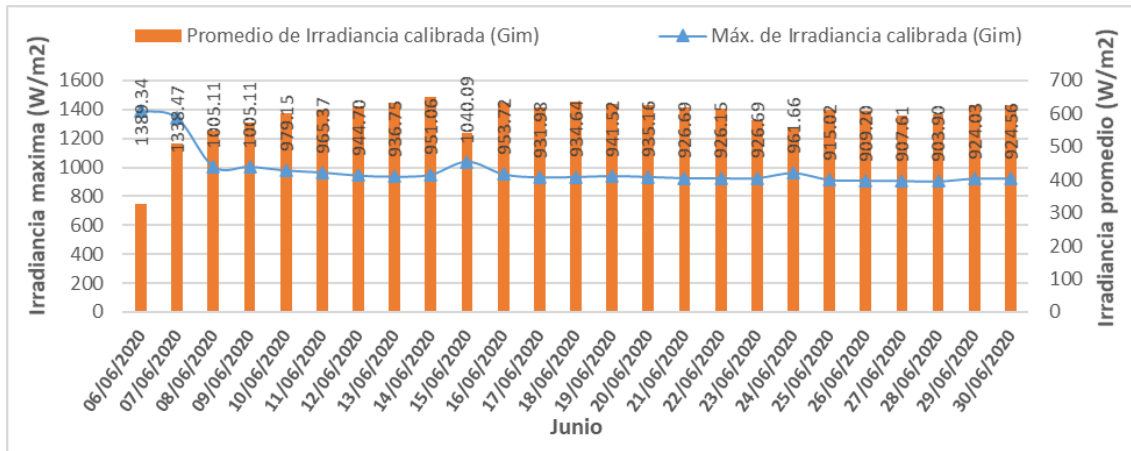
Distribución de frecuencia mes FEBRERO - JULIACA						
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2
50	[0 - 50]	0	50	0	0.00%	0.00
100	[50 - 100]	50	100	71400	10.73%	1.98
150	[100 - 150]	100	150	74959	11.27%	3.12
200	[150 - 200]	150	200	62651	9.42%	3.48
250	[200 - 250]	200	250	50491	7.59%	3.51
300	[250 - 300]	250	300	39955	6.01%	3.33
350	[300 - 350]	300	350	40037	6.02%	3.89
400	[350 - 400]	350	400	0	0.00%	0.00
450	[400 - 450]	400	450	32996	4.96%	4.12
500	[450 - 500]	450	500	26243	3.94%	3.64
550	[500 - 550]	500	550	22954	3.45%	3.51
600	[550 - 600]	550	600	23343	3.51%	3.89
650	[600 - 650]	600	650	21431	3.22%	3.87
700	[650 - 700]	650	700	18659	2.80%	3.63
750	[700 - 750]	700	750	19467	2.93%	4.06
800	[750 - 800]	750	800	17581	2.64%	3.91
850	[800 - 850]	800	850	19279	2.90%	4.55
900	[850 - 900]	850	900	18076	2.72%	4.52
950	[900 - 950]	900	950	24243	3.64%	6.40
1000	[950 - 1000]	950	1000	17084	2.57%	4.75
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	15449	2.32%	4.51
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	18455	2.77%	5.64
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	11644	1.75%	3.72
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	9161	1.38%	3.05
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	5289	0.79%	1.84
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	0	0.00%	0.00
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	2377	0.36%	0.89
1400	[1350 - 1400]	1350	1400	1380	0.21%	0.54
1450	[1400 - 1450]	1400	1450	548	0.08%	0.22
1500	[1450 - 1500]	1450	1500	119	0.02%	0.05
1550	[1500 - 1550]	1500	1550	17	0.00%	0.01
N° DATOS				665288	HSP	3.94



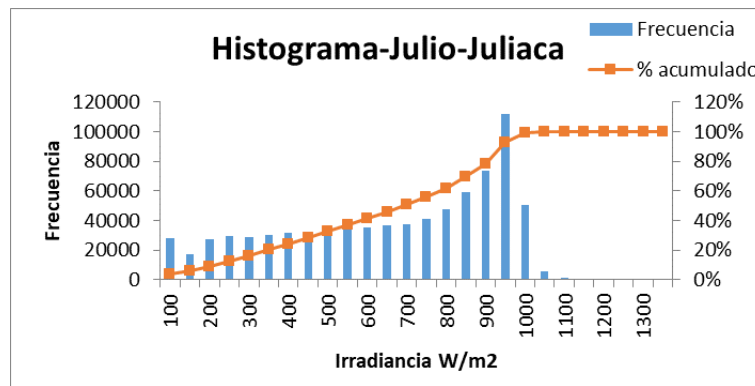
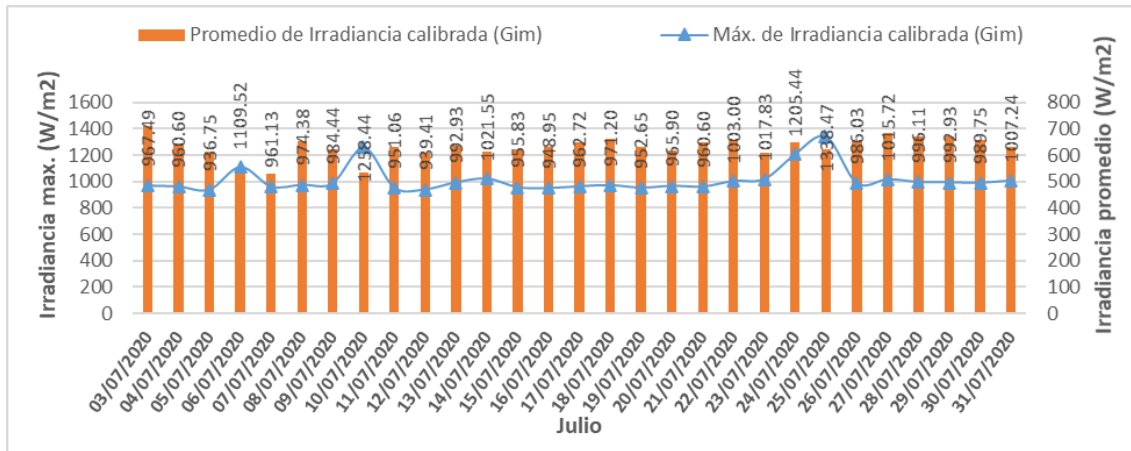
Distribución de frecuencia mes MARZO - JULIACA						
W/m2	intervalo	Lim Inf.	Lim Sup.	frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2
50	[0 - 50]	0	50	0	0.00%	0.00
100	[50 - 100]	50	100	71813	9.54%	1.99
150	[100 - 150]	100	150	61063	8.11%	2.54
200	[150 - 200]	150	200	73385	9.75%	4.08
250	[200 - 250]	200	250	65810	8.74%	4.57
300	[250 - 300]	250	300	59479	7.90%	4.96
350	[300 - 350]	300	350	44740	5.94%	4.35
400	[350 - 400]	350	400	0	0.00%	0.00
450	[400 - 450]	400	450	33866	4.50%	4.23
500	[450 - 500]	450	500	28505	3.79%	3.96
550	[500 - 550]	500	550	23406	3.11%	3.58
600	[550 - 600]	550	600	20325	2.70%	3.39
650	[600 - 650]	600	650	19657	2.61%	3.55
700	[650 - 700]	650	700	21935	2.91%	4.27
750	[700 - 750]	700	750	24145	3.21%	5.03
800	[750 - 800]	750	800	20882	2.77%	4.64
850	[800 - 850]	800	850	18438	2.45%	4.35
900	[850 - 900]	850	900	21359	2.84%	5.34
950	[900 - 950]	900	950	19590	2.60%	5.17
1000	[950 - 1000]	950	1000	22390	2.97%	6.22
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	25116	3.34%	7.33
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	29664	3.94%	9.06
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	20083	2.67%	6.42
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	11858	1.58%	3.95
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	8602	1.14%	2.99
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	0	0.00%	0.00
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	3689	0.49%	1.38
1400	[1350 - 1400]	1350	1400	1485	0.20%	0.58
1450	[1400 - 1450]	1400	1450	729	0.10%	0.29
1500	[1450 - 1500]	1450	1500	429	0.06%	0.18
1550	[1500 - 1550]	1500	1550	242	0.03%	0.10
1600	[1550 - 1600]	1550	1600	20	0.00%	0.01
N° DATOS				752705	HSP	3.50



Distribución de frecuencia mes ABRIL - JULIACA						
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2
50	[0 - 50]	0	50	131484	16.41%	1.83
100	[50 - 100]	50	100	54856	6.85%	1.52
150	[100 - 150]	100	150	37763	4.71%	1.57
200	[150 - 200]	150	200	34915	4.36%	1.94
250	[200 - 250]	200	250	27204	3.39%	1.89
300	[250 - 300]	250	300	19662	2.45%	1.64
350	[300 - 350]	300	350	14467	1.81%	1.41
400	[350 - 400]	350	400	0	0.00%	0.00
450	[400 - 450]	400	450	14341	1.79%	1.79
500	[450 - 500]	450	500	17740	2.21%	2.46
550	[500 - 550]	500	550	19013	2.37%	2.90
600	[550 - 600]	550	600	19406	2.42%	3.23
650	[600 - 650]	600	650	19787	2.47%	3.57
700	[650 - 700]	650	700	22552	2.81%	4.39
750	[700 - 750]	700	750	26376	3.29%	5.50
800	[750 - 800]	750	800	31670	3.95%	7.04
850	[800 - 850]	800	850	32701	4.08%	7.72
900	[850 - 900]	850	900	39501	4.93%	9.88
950	[900 - 950]	900	950	44561	5.56%	11.76
1000	[950 - 1000]	950	1000	56863	7.10%	15.80
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	70260	8.77%	20.49
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	43760	5.46%	13.37
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	14601	1.82%	4.66
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	5288	0.66%	1.76
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	1668	0.21%	0.58
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	0	0.00%	0.00
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	712	0.09%	0.27
1400	[1350 - 1400]	1350	1400	155	0.02%	0.06
1450	[1400 - 1450]	1400	1450	27	0.00%	0.01
1500	[1450 - 1500]	1450	1500	4	0.00%	0.00
N° DATOS				801337	HSP	4.30

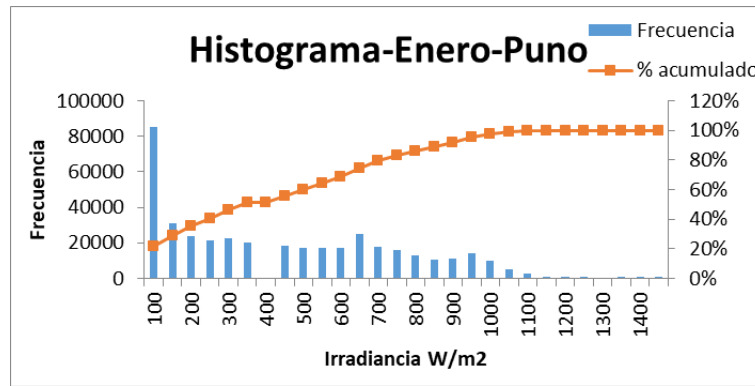
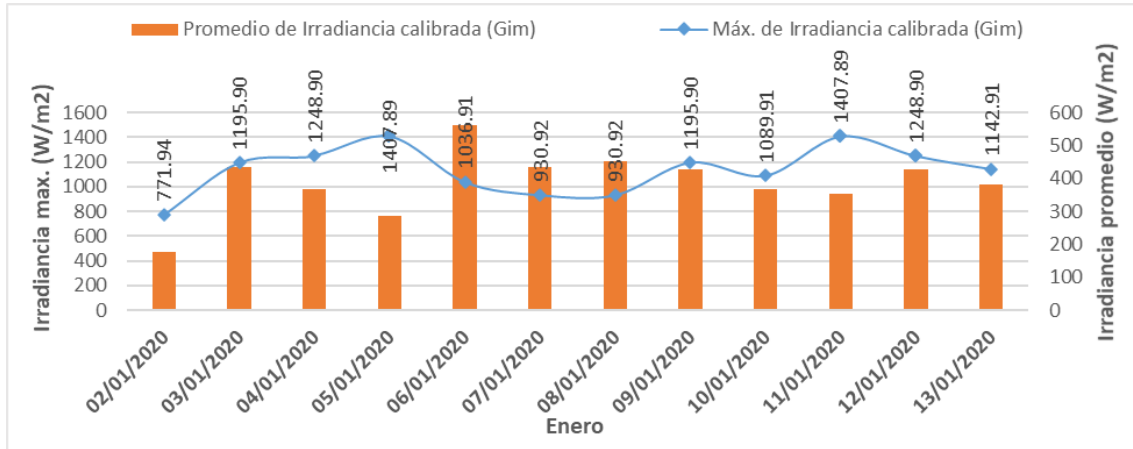


Distribución de frecuencia mes JUNIO - JULIACA						
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2
50	[0 - 50]	0	50	27549	4.03%	0.38
100	[50 - 100]	50	100	17368	2.54%	0.48
150	[100 - 150]	100	150	16669	2.44%	0.69
200	[150 - 200]	150	200	24785	3.62%	1.38
250	[200 - 250]	200	250	26398	3.86%	1.83
300	[250 - 300]	250	300	28456	4.16%	2.37
350	[300 - 350]	300	350	24890	3.64%	2.42
400	[350 - 400]	350	400	26728	3.91%	2.97
450	[400 - 450]	400	450	28936	4.23%	3.62
500	[450 - 500]	450	500	26584	3.89%	3.69
550	[500 - 550]	500	550	28034	4.10%	4.28
600	[550 - 600]	550	600	29694	4.34%	4.95
650	[600 - 650]	600	650	33973	4.97%	6.13
700	[650 - 700]	650	700	37399	5.47%	7.27
750	[700 - 750]	700	750	37191	5.44%	7.75
800	[750 - 800]	750	800	42708	6.24%	9.49
850	[800 - 850]	800	850	55656	8.14%	13.14
900	[850 - 900]	850	900	85873	12.55%	21.47
950	[900 - 950]	900	950	65821	9.62%	17.37
1000	[950 - 1000]	950	1000	15966	2.33%	4.44
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	2663	0.39%	0.78
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	215	0.03%	0.07
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	136	0.02%	0.04
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	134	0.02%	0.04
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	62	0.01%	0.02
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	67	0.01%	0.02
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	48	0.01%	0.02
1400	[1350 - 1400]	1350	1400	12	0.00%	0.00
N° DATOS				684015	HSP	4.69

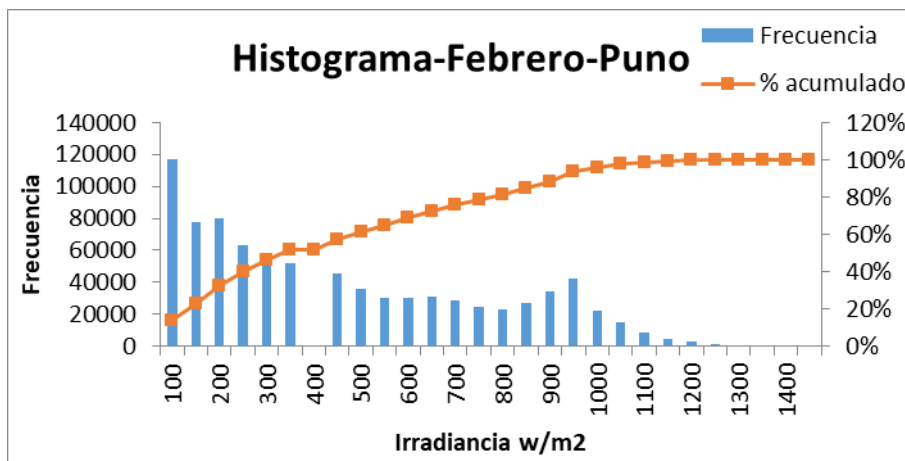
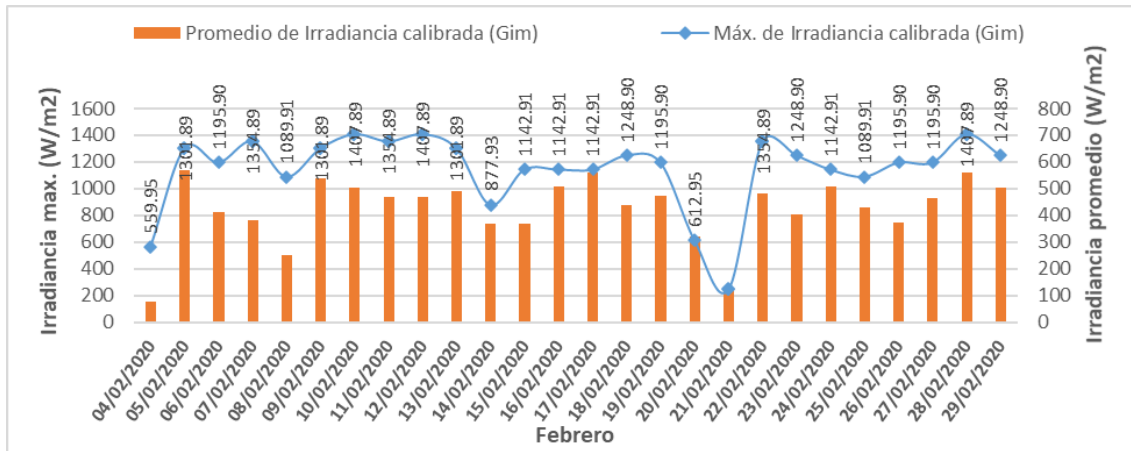


Distribución de frecuencia mes JULIO-JULIACA						
W/m²	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	Frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m²
50	[0 - 50]	0	50	15057	1.90%	0.21
100	[50 - 100]	50	100	12882	1.62%	0.36
150	[100 - 150]	100	150	17085	2.15%	0.71
200	[150 - 200]	150	200	27472	3.46%	1.53
250	[200 - 250]	200	250	29200	3.68%	2.03
300	[250 - 300]	250	300	29061	3.66%	2.42
350	[300 - 350]	300	350	30285	3.81%	2.94
400	[350 - 400]	350	400	31569	3.97%	3.51
450	[400 - 450]	400	450	32281	4.06%	4.04
500	[450 - 500]	450	500	32865	4.14%	4.56
550	[500 - 550]	500	550	35265	4.44%	5.39
600	[550 - 600]	550	600	35635	4.49%	5.94
650	[600 - 650]	600	650	36494	4.59%	6.59
700	[650 - 700]	650	700	37520	4.72%	7.30
750	[700 - 750]	700	750	41420	5.21%	8.63
800	[750 - 800]	750	800	47624	5.99%	10.58
850	[800 - 850]	800	850	58974	7.42%	13.92
900	[850 - 900]	850	900	73638	9.27%	18.41
950	[900 - 950]	900	950	112114	14.11%	29.59
1000	[950 - 1000]	950	1000	50628	6.37%	14.06
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	5340	0.67%	1.56
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	1224	0.15%	0.37
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	575	0.07%	0.18
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	189	0.02%	0.06
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	49	0.01%	0.02
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	33	0.00%	0.01
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	25	0.00%	0.01
N° DATOS				794504	HSP	5.18

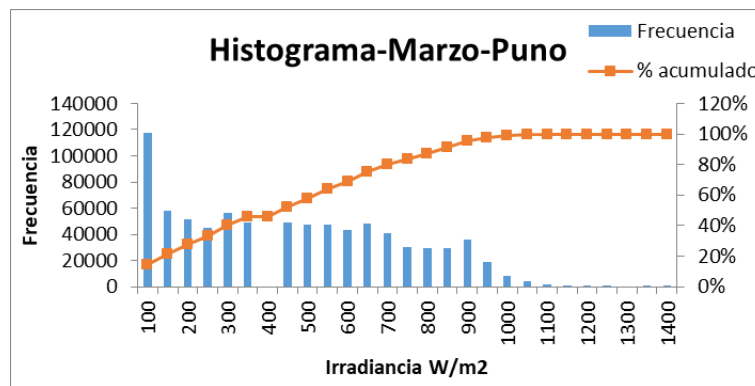
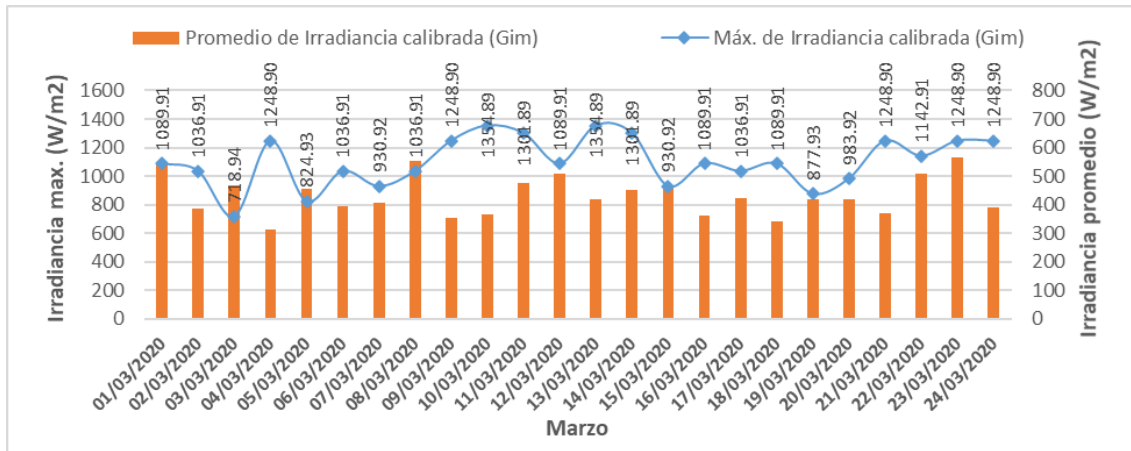
Anexo 4. Irradiancia máxima, promedio y distribución de frecuencia; registrados por la plataforma durante el periodo de medición en la ciudad de Puno.



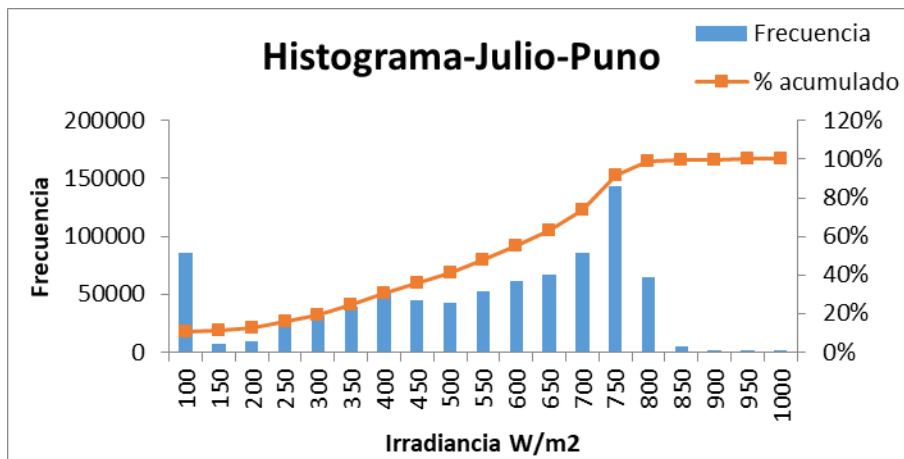
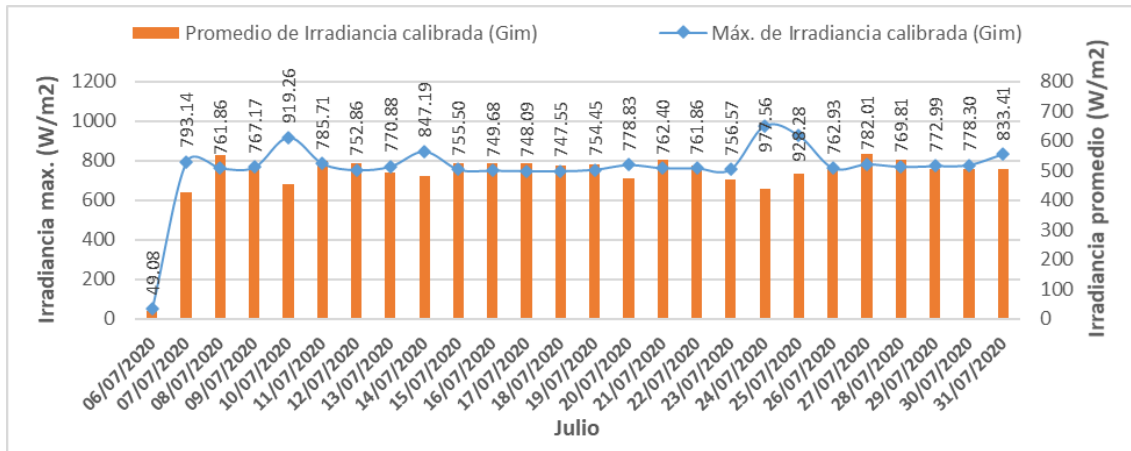
Distribución de frecuencia mes Enero-Puno							
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	Frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2	
50	[0 - 50]	0	50	50392	12.61%	0.70	
100	[50 - 100]	50	100	34918	8.73%	0.97	
150	[100 - 150]	100	150	31063	7.77%	1.29	
200	[150 - 200]	150	200	23655	5.92%	1.31	
250	[200 - 250]	200	250	21505	5.38%	1.49	
300	[250 - 300]	250	300	22786	5.70%	1.90	
350	[300 - 350]	300	350	19885	4.97%	1.93	
400	[350 - 400]	350	400	0	0.00%	0.00	
450	[400 - 450]	400	450	18078	4.52%	2.26	
500	[450 - 500]	450	500	17024	4.26%	2.36	
550	[500 - 550]	500	550	17376	4.35%	2.65	
600	[550 - 600]	550	600	16859	4.22%	2.81	
650	[600 - 650]	600	650	25214	6.31%	4.55	
700	[650 - 700]	650	700	17497	4.38%	3.40	
750	[700 - 750]	700	750	15640	3.91%	3.26	
800	[750 - 800]	750	800	12743	3.19%	2.83	
850	[800 - 850]	800	850	10394	2.60%	2.45	
900	[850 - 900]	850	900	11233	2.81%	2.81	
950	[900 - 950]	900	950	14204	3.55%	3.75	
1000	[950 - 1000]	950	1000	9828	2.46%	2.73	
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	4901	1.23%	1.43	
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	2496	0.62%	0.76	
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	1080	0.27%	0.35	
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	512	0.13%	0.17	
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	311	0.08%	0.11	
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	0	0.00%	0.00	
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	71	0.02%	0.03	
1400	[1350 - 1400]	1350	1400	57	0.01%	0.02	
1450	[1400 - 1450]	1400	1450	40	0.01%	0.02	
N° DATOS				399762	HSP	4.03	



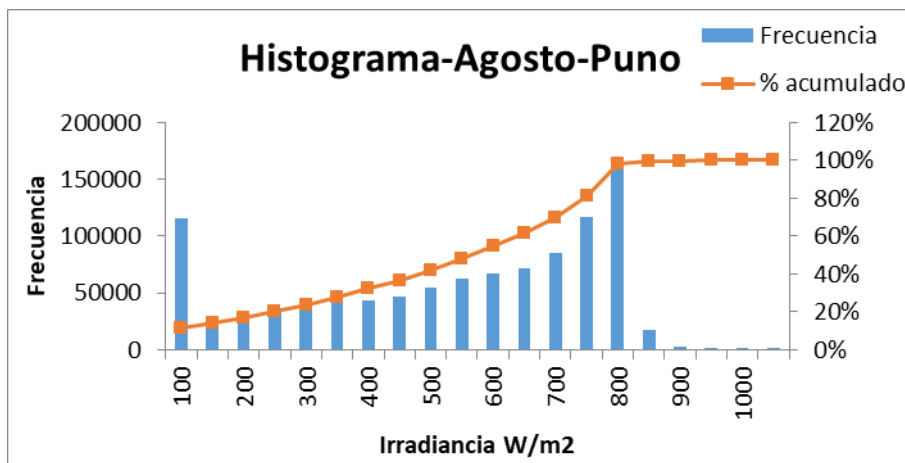
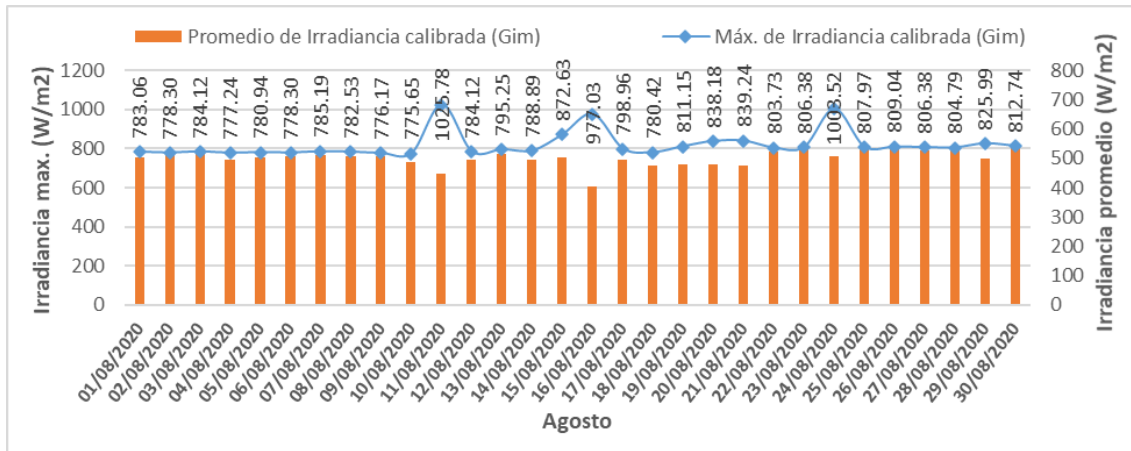
Distribución de frecuencia mes Febrero-Puno						
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	Frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2
50	[0 - 50]	0	50	51878	6.10%	0.72
100	[50 - 100]	50	100	65312	7.67%	1.81
150	[100 - 150]	100	150	77859	9.15%	3.24
200	[150 - 200]	150	200	80425	9.45%	4.47
250	[200 - 250]	200	250	63268	7.43%	4.39
300	[250 - 300]	250	300	52212	6.14%	4.35
350	[300 - 350]	300	350	52203	6.13%	5.08
400	[350 - 400]	350	400	0	0.00%	0.00
450	[400 - 450]	400	450	45283	5.32%	5.66
500	[450 - 500]	450	500	35476	4.17%	4.93
550	[500 - 550]	500	550	30514	3.59%	4.66
600	[550 - 600]	550	600	30267	3.56%	5.04
650	[600 - 650]	600	650	31234	3.67%	5.64
700	[650 - 700]	650	700	28915	3.40%	5.62
750	[700 - 750]	700	750	24439	2.87%	5.09
800	[750 - 800]	750	800	22761	2.67%	5.06
850	[800 - 850]	800	850	27254	3.20%	6.43
900	[850 - 900]	850	900	33976	3.99%	8.49
950	[900 - 950]	900	950	41944	4.93%	11.07
1000	[950 - 1000]	950	1000	22412	2.63%	6.23
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	15228	1.79%	4.44
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	8288	0.97%	2.53
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	4921	0.58%	1.57
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	2758	0.32%	0.92
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	1475	0.17%	0.51
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	0	0.00%	0.00
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	511	0.06%	0.19
1400	[1350 - 1400]	1350	1400	186	0.02%	0.07
1450	[1400 - 1450]	1400	1450	49	0.01%	0.02
N° DATOS				851048	HSP	4.33



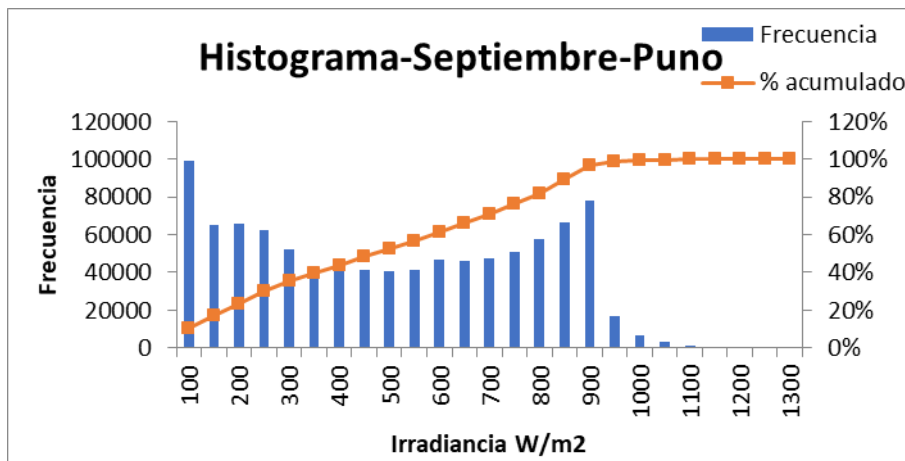
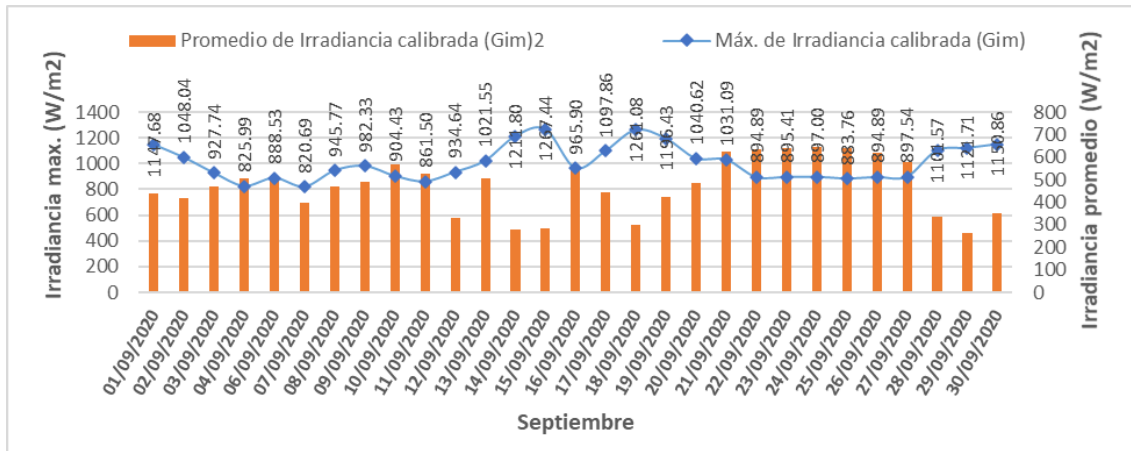
Distribución de frecuencia mes Marzo-Puno						
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	Frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2
50	[0 - 50]	0	50	60772	7.44%	0.84
100	[50 - 100]	50	100	56818	6.96%	1.58
150	[100 - 150]	100	150	58185	7.12%	2.42
200	[150 - 200]	150	200	51668	6.33%	2.87
250	[200 - 250]	200	250	45253	5.54%	3.14
300	[250 - 300]	250	300	56152	6.87%	4.68
350	[300 - 350]	300	350	48740	5.97%	4.74
400	[350 - 400]	350	400	0	0.00%	0.00
450	[400 - 450]	400	450	49305	6.04%	6.16
500	[450 - 500]	450	500	47567	5.82%	6.61
550	[500 - 550]	500	550	47078	5.76%	7.19
600	[550 - 600]	550	600	43652	5.34%	7.28
650	[600 - 650]	600	650	47938	5.87%	8.66
700	[650 - 700]	650	700	40780	4.99%	7.93
750	[700 - 750]	700	750	30162	3.69%	6.28
800	[750 - 800]	750	800	29562	3.62%	6.57
850	[800 - 850]	800	850	29712	3.64%	7.02
900	[850 - 900]	850	900	36412	4.46%	9.10
950	[900 - 950]	900	950	19133	2.34%	5.05
1000	[950 - 1000]	950	1000	8691	1.06%	2.41
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	3895	0.48%	1.14
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	2222	0.27%	0.68
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	1350	0.17%	0.43
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	859	0.11%	0.29
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	678	0.08%	0.24
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	0	0.00%	0.00
1350	[1300 - 1350]	1300	1350	172	0.02%	0.06
1400	[1350 - 1400]	1350	1400	28	0.00%	0.01
N° DATOS				816784	HSP	4.31



Distribución de frecuencia mes Julio-Puno						
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	Frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2
50	[0 - 50]	0	50	78328	9.57%	1.09
100	[50 - 100]	50	100	7074	0.86%	0.20
150	[100 - 150]	100	150	7110	0.87%	0.30
200	[150 - 200]	150	200	9113	1.11%	0.51
250	[200 - 250]	200	250	26294	3.21%	1.83
300	[250 - 300]	250	300	31552	3.85%	2.63
350	[300 - 350]	300	350	38879	4.75%	3.78
400	[350 - 400]	350	400	52113	6.37%	5.79
450	[400 - 450]	400	450	44297	5.41%	5.54
500	[450 - 500]	450	500	42122	5.15%	5.85
550	[500 - 550]	500	550	52712	6.44%	8.05
600	[550 - 600]	550	600	61562	7.52%	10.26
650	[600 - 650]	600	650	67086	8.20%	12.11
700	[650 - 700]	650	700	85723	10.47%	16.67
750	[700 - 750]	700	750	143858	17.57%	29.97
800	[750 - 800]	750	800	64193	7.84%	14.27
850	[800 - 850]	800	850	4986	0.61%	1.18
900	[850 - 900]	850	900	1130	0.14%	0.28
950	[900 - 950]	900	950	324	0.04%	0.09
1000	[950 - 1000]	950	1000	90	0.01%	0.03
N° DATOS				818546	HSP	5.02

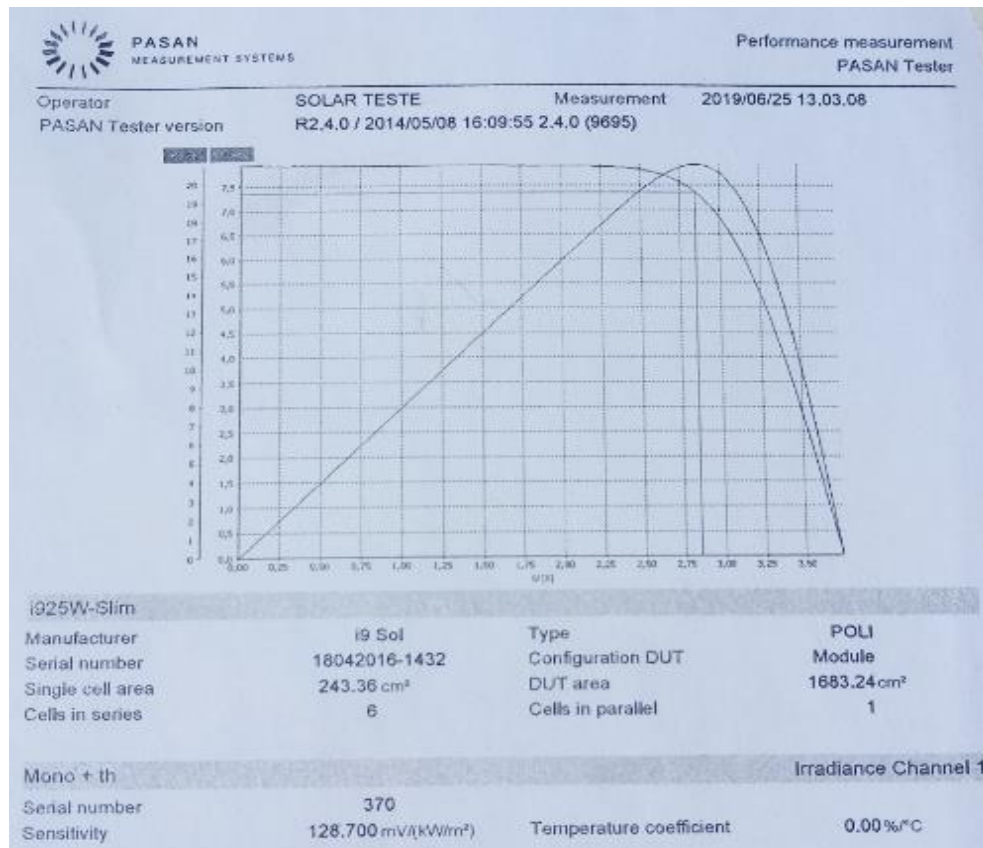


Distribución de frecuencia mes Agosto-Puno						
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	Frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2
50	[0 - 50]	0	50	76990	7.53%	1.07
100	[50 - 100]	50	100	38741	3.79%	1.08
150	[100 - 150]	100	150	27652	2.70%	1.15
200	[150 - 200]	150	200	26053	2.55%	1.45
250	[200 - 250]	200	250	36980	3.61%	2.57
300	[250 - 300]	250	300	38552	3.77%	3.21
350	[300 - 350]	300	350	40749	3.98%	3.96
400	[350 - 400]	350	400	43482	4.25%	4.83
450	[400 - 450]	400	450	46290	4.52%	5.79
500	[450 - 500]	450	500	54315	5.31%	7.54
550	[500 - 550]	500	550	62653	6.12%	9.57
600	[550 - 600]	550	600	67557	6.60%	11.26
650	[600 - 650]	600	650	71218	6.96%	12.86
700	[650 - 700]	650	700	85145	8.32%	16.56
750	[700 - 750]	700	750	116940	11.43%	24.36
800	[750 - 800]	750	800	168645	16.48%	37.48
850	[800 - 850]	800	850	16886	1.65%	3.99
900	[850 - 900]	850	900	2473	0.24%	0.62
950	[900 - 950]	900	950	1384	0.14%	0.37
1000	[950 - 1000]	950	1000	328	0.03%	0.09
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	22	0.00%	0.01
N° DATOS				1023055	HSP	5.17



Distribución de frecuencia mes Septiembre-Puno							
W/m2	intervalo	Lim Inf	Lim Sup	Frecuencia	% de frecuencia	kW-h/m2	
50	[0 - 50]	0	50	56636	5.80%	0.79	
100	[50 - 100]	50	100	42687	4.37%	1.19	
150	[100 - 150]	100	150	65393	6.70%	2.72	
200	[150 - 200]	150	200	65635	6.72%	3.65	
250	[200 - 250]	200	250	62700	6.42%	4.35	
300	[250 - 300]	250	300	51919	5.32%	4.33	
350	[300 - 350]	300	350	41740	4.27%	4.06	
400	[350 - 400]	350	400	42793	4.38%	4.75	
450	[400 - 450]	400	450	41604	4.26%	5.20	
500	[450 - 500]	450	500	40853	4.18%	5.67	
550	[500 - 550]	500	550	41605	4.26%	6.36	
600	[550 - 600]	550	600	46668	4.78%	7.78	
650	[600 - 650]	600	650	46067	4.72%	8.32	
700	[650 - 700]	650	700	47295	4.84%	9.20	
750	[700 - 750]	700	750	50685	5.19%	10.56	
800	[750 - 800]	750	800	57802	5.92%	12.84	
850	[800 - 850]	800	850	66708	6.83%	15.75	
900	[850 - 900]	850	900	78269	8.01%	19.57	
950	[900 - 950]	900	950	16891	1.73%	4.46	
1000	[950 - 1000]	950	1000	6903	0.71%	1.92	
1050	[1000 - 1050]	1000	1050	3268	0.33%	0.95	
1100	[1050 - 1100]	1050	1100	1412	0.14%	0.43	
1150	[1100 - 1150]	1100	1150	709	0.07%	0.23	
1200	[1150 - 1200]	1150	1200	286	0.03%	0.10	
1250	[1200 - 1250]	1200	1250	66	0.01%	0.02	
1300	[1250 - 1300]	1250	1300	10	0.00%	0.00	
N° DATOS				976604	HSP	4.51	

Anexo 5. Pruebas de laboratorio STC del Módulo Fotovoltaico calibrado (patrón)



Nota: ficha técnica de laboratorio de pruebas de calibración del módulo fotovoltaico modelo i925W-Slim poli cristalino (po-Csi).

Anexo 6. Especificaciones técnicas de medición del FLUKE 179

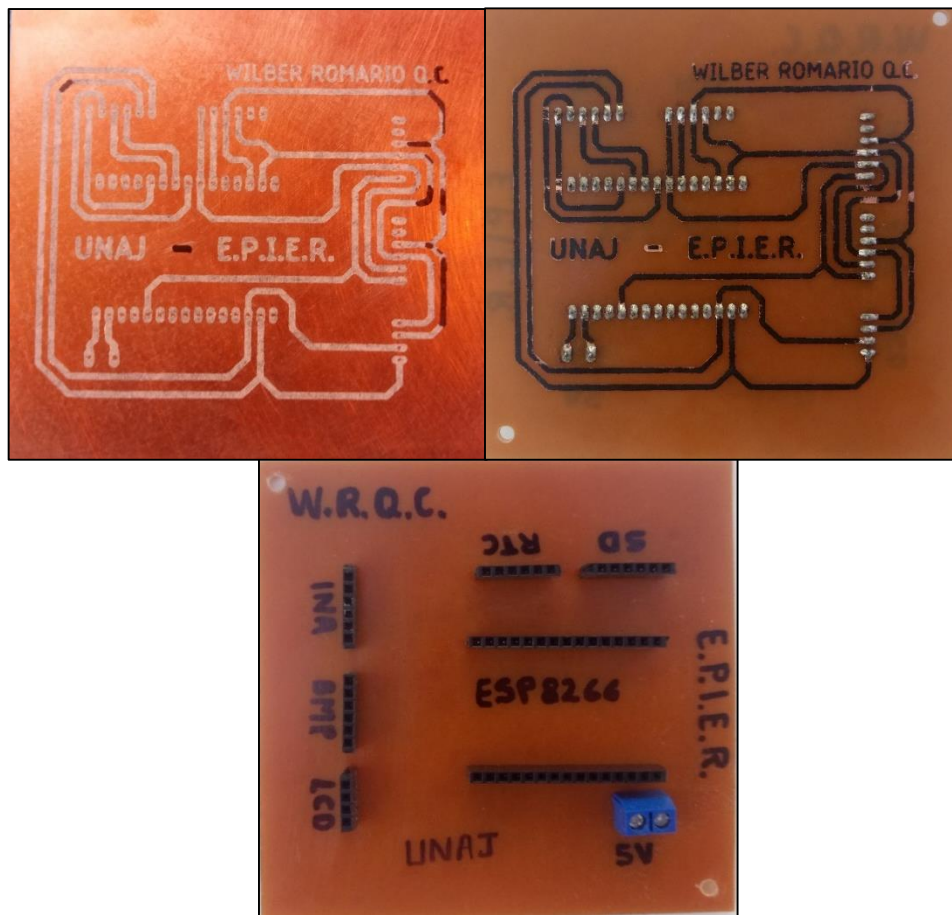
Especificaciones					
(visite la página Web de Fluke para obtener especificaciones detalladas)					
Funciones	Máximo	Resolución Máx.	175	177	179
Tensión de CC	1000 V	0,1 mV	±(0,15%+2)	±(0,09%+2)	±(0,09%+2)
Tensión de CA	1000 V	0,1 mV	±(1,0%+3)	±(1,0%+3)	±(1,0%+3)
Corriente continua	10 A	0,01 mA	±(1,0%+3)	±(1,0%+3)	±(1,0%+3)
Corriente alterna	10 A	0,01 mA	±(1,5%+3)	±(1,5%+3)	±(1,5%+3)
Resistencia	50 MΩ	0,1 Ω	±(0,9%+1)	±(0,9%+1)	±(0,9%+1)
Capacitancia	10000 μF	1 nF	±(1,2%+2)	±(1,2%+2)	±(1,2%+2)
Frecuencia	100 kHz	0,01 Hz	±(0,1%+1)	±(0,1%+1)	±(0,1%+1)
Temperatura	-40°C/+400°C	0,1°C			±(1,0%+10)

La precisión especificada es la mejor para cada función

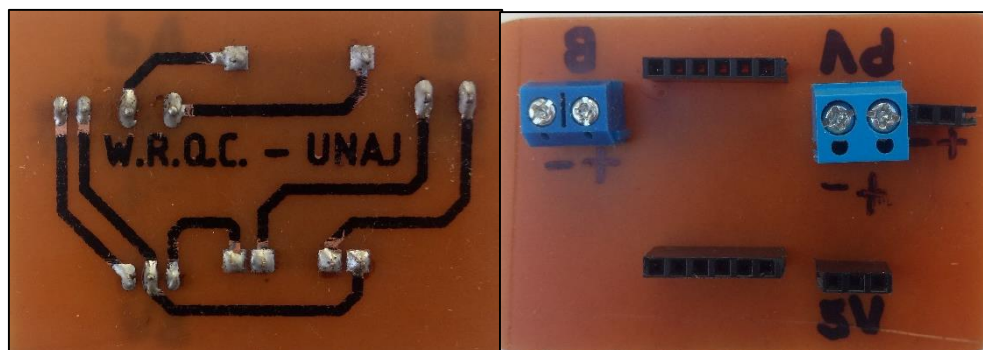
Vida útil de la batería: pilas alcalinas, normalmente 200 horas
Tamaño (LxAxF): 190 mm x 89 mm x 45 mm

Peso: 0,42 kg
Garantía para toda la vida

Anexo 7. Diseño del circuito PCB de la plataforma sensorial de medición y autonomía energética



Nota: Construcción del circuito electrónico de medición, monitoreo y almacenamiento de datos de la plataforma de medición.



Nota: Construcción del circuito electrónico de alimentación y autonomía energética de la plataforma de medición.

Anexo 8. Código de programación en arduino para la comunicación de medición y monitoreo de datos mediante la IDE de arduino

```
#include <Wire.h>           // incluye librería interfaz I2C
#include <SPI.h>            // incluye librería interfaz SPI
#include <SD.h>             // incluye librería para el módulo SD
#include <RTCLib.h>        // incluye librería para el módulo RTC
#include <Adafruit_INA219.h> // incluye librería para el sensor INA219
#include <Adafruit_BMP280.h> // incluye librería para sensor BMP280

float Isc = 0;
float Gim = 0;

float Iscref = 0.240;
float Giref = 1000.0;

float TEMPERATURA;
float PRESIÓN;

const int chipSelect = 15;
const int P0 = 0x40;

Adafruit_INA219 placa0(P0); // crea objeto con nombre placa0
Adafruit_BMP280 bmp;       // crea objeto con nombre bmp
RTC_DS3231 rtc;           // crea objeto del tipo RTC_DS3231

File archivo;            // objeto archivo del tipo File

void setup()
{
  Serial.begin(9600);    // inicializa monitor serie a 9600 bps

  Serial.println("Inicializando tarjeta SD...");
  if (!SD.begin(chipSelect))
  {
    Serial.println("fallo en inicialización SD !");
    return;
  }

  Serial.println("inicialización modulo RTC...");
  if (!rtc.begin())
  {
    Serial.println("Fallo en inicialización RTC !");
    return;
  }
  Serial.println("Función de sincronización RTC");

  //rtc.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));

  Serial.println("inicialización modulo bmp280...");
  if (!bmp.begin())
  {
    Serial.println("Fallo en inicialización BMP280 !");
    return;
  }
}
```

```

    }
    Serial.println("FECHA|HORA|Isc_mA|Gim_W/m2|TEMPERATURA|PRESION-hPa");
}

void loop()
{
    archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);

    if (archivo)
    {
        placa0.begin();

        Isc = placa0.getCurrent_mA()           //variable corriente
        Gim = Isc* Giref/Iscref;               //variable irradiancia
        TEMPERATURA = bmp.readTemperature();  //variable temperature
        PRESION = bmp.readPressure()/100;     //variable presion

        DateTime fecha = rtc.now();

        Serial.print(fecha.day());
        Serial.print("/");
        Serial.print(fecha.month());
        Serial.print("/");
        Serial.print(fecha.year());
        Serial.print(",");
        Serial.print(fecha.hour());
        Serial.print(":");
        Serial.print(fecha.minute());
        Serial.print(":");
        Serial.print(fecha.second());
        Serial.print(",");

        archivo.print(Isc);
        archivo.print(",");
        archivo.print(Gim);
        archivo.print(",");
        archivo.print(TEMPERATURA);
        archivo.print(",");
        archivo.println(PRESION);

        archivo.close();

    }
    else
    {
        Serial.println("Error al abrir el archivo");
    }
    delay(1000);
}

```

Anexo 9. Servidor ThingSpeak de monitoreo de datos en tiempo real de la plataforma de medición, implementado en Juliaca

MEDICIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR UNAJ / EPIER - JULIACA

Channel ID: 928045
Author: romarioqc
Access: Public

Medición de Eventos Extremos de irradiancia solar
en JULIACA

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import / Export

Add Visualizations

Add Widgets

Export recent data

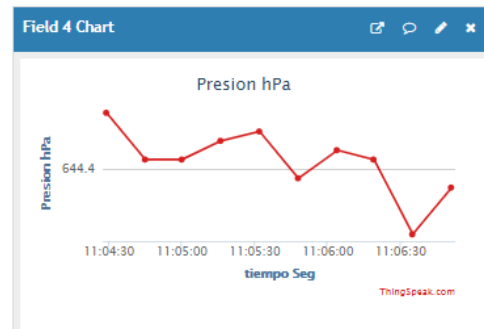
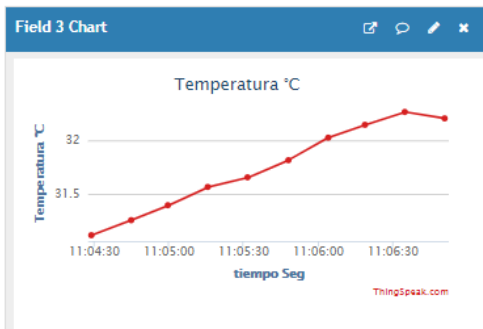
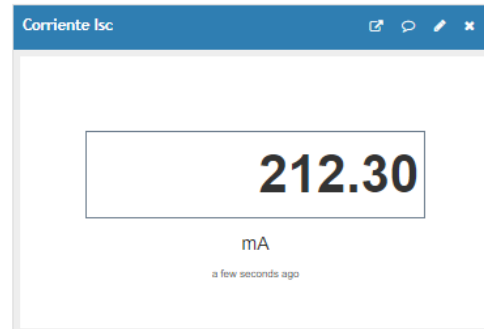
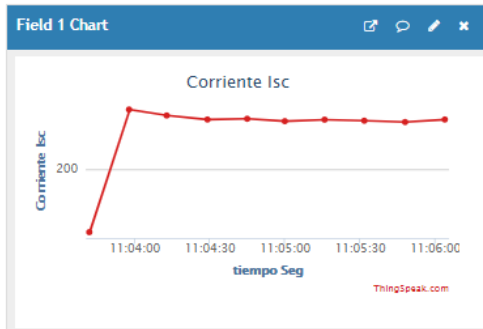
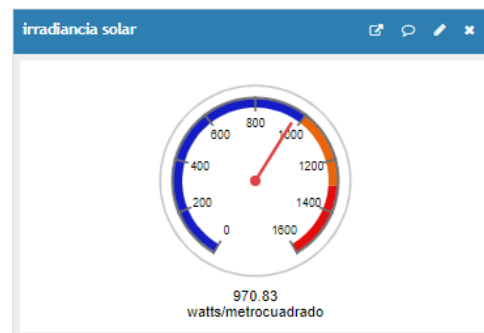
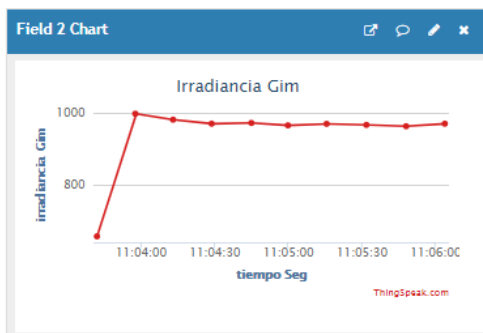
MATLAB Analysis

MATLAB Visualization

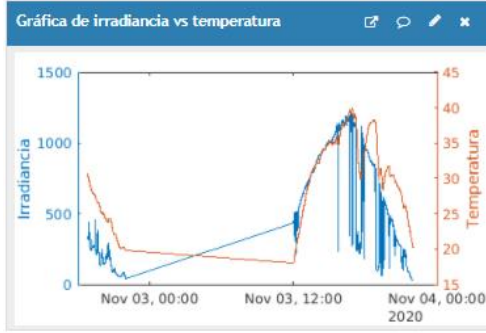
Channel 3 of 4 < >

Channel Stats

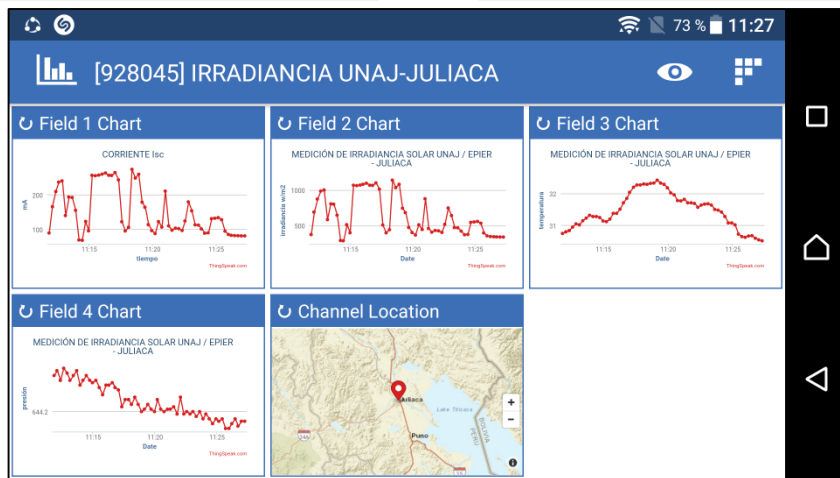
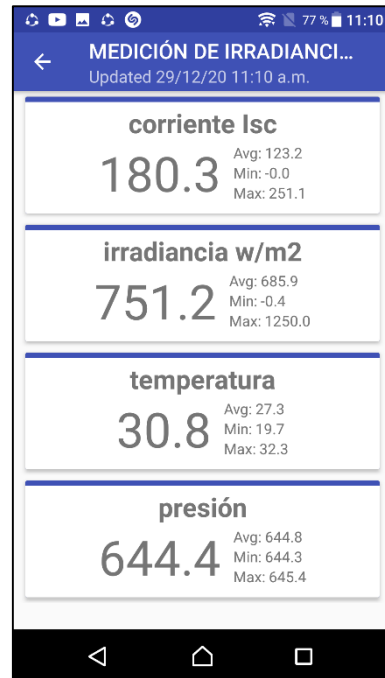
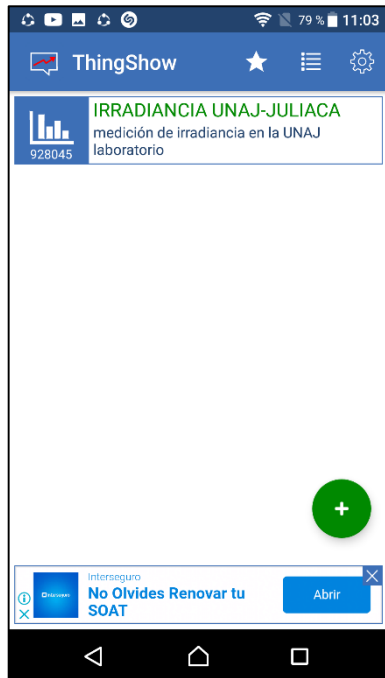
Created: [about a year ago](#)
Last entry: [less than a minute ago](#)
Entries: 648854



Nota: Comunicación con el servidor ThingSpeak, de la plataforma sensorial a través del microcontrolador y programación mediante la IDE de arduino; logrando exitosamente la visualización y monitoreo en tiempo real de los datos en la página web.



Anexo 10. Aplicativo de visualización de datos en ThingShow para Android



Nota: Aplicativo de visualización de datos registrados por la plataforma de medición a través de ThingShow para Android.

Anexo 11. Calibración y validación de datos de la plataforma sensorial



Nota: El Anexo 11, muestra el proceso de calibración y validación de la plataforma de medición en un día sin presencia de nubes, para su mayor confiabilidad en el registro de datos.

UNW