



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**“DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO AUTOSUSTENTABLE
PARA LA MEDICIÓN INDIRECTA Y REGISTRO DE DATOS DE
IRRADIANCIA SOLAR BASADO EN SENSORES DE SILICIO.”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

AUTOR:

KEVIN LENIN ALARCÓN MAZA

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**“DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO AUTOSUSTENTABLE
PARA LA MEDICIÓN INDIRECTA Y REGISTRO DE DATOS DE
IRRADIANCIA SOLAR BASADO EN SENSORES DE SILICIO.”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

AUTOR: KEVIN LENIN ALARCÓN MAZA

DIRECTOR: Ing. JORGE LUIS HERNÁNDEZ AMBATO, Ph.D

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Kevin Lenin Alarcón Maza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Kevin Lenin Alarcón Maza, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 17 de octubre de 2022.

Kevin Lenin Alarcón Maza
060562312-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, “**DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO AUTOSUSTENTABLE PARA LA MEDICIÓN INDIRECTA Y REGISTRO DE DATOS DE IRRADIANCIA SOLAR BASADO EN SENSORES DE SILICIO.**”, realizado por el señor: **KEVIN LENIN ALARCÓN MAZA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

FIRMA

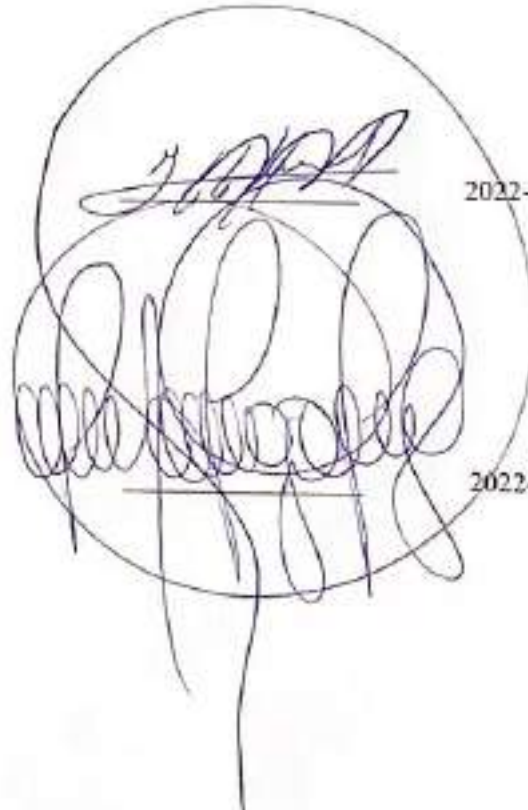
FECHA

Ing. Nancy del Rocío Velasco Erazo
PRESIDENTA DEL TRIBUNAL



2022-10-17

Dr. Jorge Luis Hernández Ambato
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2022-10-17

Ing. Jorge Luis Paucar Samaniego
ASESOR DEL TRIBUNAL

2022-10-17

DEDICATORIA

Para el futuro de la investigación, el desarrollo tecnológico y un mejor porvenir en el país para las generaciones crecientes, con este pequeño grano de arena espero contribuir al avance y adelanto de la ciencia electrónica en materia de comunicación inteligente, desarrollo autosostenible y exploración en temas de energías renovables en la ciudad y en la patria ecuatoriana.

Kevin

AGRADECIMIENTO

Doy las gracias a Dios por permitirme día a día perseverar en la búsqueda de la felicidad y satisfacción, con salud, vida y energía.

Agradezco especialmente a mi madre Azucena del Carmen Maza Vargas que, con su constancia, amor y ejemplo me ha enseñado que nada es realmente difícil, que con empeño y dedicación se logran grandes cosas, a mi hermano Gilson por su ejemplo y ánimo día a día, a mi padre Ricardo por ser las bases de mi familia.

Mención de gratitud y respeto a Jorge Hernández por guiarme en este peldaño final, ayudarme y transmitirme la misma pasión con la que educa, trabaja e investiga. Por último, a mis amigos y compañeros con los cuales trazamos una meta y hoy la estamos cumpliendo.

Gratitud eterna ante ustedes.

Kevin

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1.	Antecedentes.....	2
1.2.	Planteamiento del problema.....	5
1.3.	Justificación.....	5
1.4.	Objetivos.....	6

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.	Antecedentes de investigación.....	7
2.2.	Referencias Teóricas.....	8
2.2.1.	<i>Irradiación Solar</i>	8
2.2.2.	<i>Desplazamiento del Sol y la Tierra</i>	9
2.2.3.	<i>Radiación solar directa, difusa y global</i>	9
2.2.4.	<i>Propiedades atmosféricas que afectan la irradiación solar</i>	10
2.2.4.1.	<i>Gases presentes en la atmósfera</i>	10
2.2.4.2.	<i>Formación de nubes</i>	11
2.2.4.3.	<i>Distribución espectral de la radiación solar</i>	11
2.2.5.	<i>Instrumentos y métodos de medida</i>	11
2.2.6.	<i>Medición Indirecta de irradiancia</i>	12
2.2.6.1.	<i>Sensores calorimétricos</i>	14
2.2.6.2.	<i>Sensores termo mecánicos</i>	14
2.2.6.3.	<i>Sensores termoelectrónicos</i>	14
2.2.6.4.	<i>Sensores fotoeléctricos</i>	14
2.2.7.	<i>Medición directa de irradiación</i>	15

2.2.7.1.	<i>Heliógrafos</i>	15
2.2.7.2.	<i>Pirheliómetro</i>	15
2.2.7.3.	<i>Piranómetro</i>	16
2.2.7.4.	<i>Piranómetro con banda de sombra</i>	16
2.2.7.5.	<i>Mediciones satelitales de irradiación</i>	17
2.2.8.	<i>Energía Solar</i>	17
2.2.9.	<i>Demanda de energía</i>	18
2.2.9.1.	<i>Nivel mundial</i>	19
2.2.9.2.	<i>Nivel regional</i>	20
2.2.9.3.	<i>Nivel local</i>	20
2.2.10.	<i>Estado del clima en 2022</i>	21
2.2.11.	<i>Fuente de energía solar fotovoltaica</i>	21
2.2.12.	<i>Conversión fotovoltaica</i>	22
2.2.12.1.	<i>Efecto fotovoltaico</i>	23
2.2.13.	<i>Tecnologías de celdas solares</i>	24
2.2.13.1.	<i>Celdas Solares Cristalinas de Silicio</i>	25
2.2.14.	<i>Operación de la celda solar y parámetros de rendimiento</i>	27
2.2.14.1.	<i>Características de Corriente-Voltaje</i>	28
2.2.15.	<i>Sistemas fotovoltaicos de conversión de paneles solares</i>	33
2.2.15.1.	<i>Sistemas conectados a la red (on-grid)</i>	33
2.2.15.2.	<i>Sistemas fotovoltaicos autónomos</i>	34
2.2.15.3.	<i>Sistemas conectados a la red (on-grid)</i>	35
2.2.16.	<i>Componentes de un sistema FV autónomo</i>	36
2.2.16.1.	<i>Controladores de carga</i>	37
2.2.16.2.	<i>Bancos de baterías</i>	37
2.2.17.	<i>Sistemas de adquisición y recolección de datos (Dataloggers)</i>	38
2.2.17.1.	<i>Sensores y transductores</i>	39
2.2.17.2.	<i>Sistemas de comunicación</i>	40
2.2.18.	<i>Internet de las Cosas</i>	40
2.2.18.1.	<i>Colas de mensajería y comunicación mediante publicación/subscripción</i>	43
2.2.19.	<i>Desarrollo Web</i>	44
2.2.19.1.	<i>LAMP</i>	44

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	46
3.1.	Método investigativo experimental	46

3.1.1.	<i>Medidor de energía solar y relación de datos</i>	47
3.2.	Requerimientos hardware del instrumento desarrollado	49
3.3.	Descripción modular del dispositivo	50
3.3.1.	<i>Bloque de adquisición de datos</i>	50
3.3.1.1.	<i>Sensores y transductores</i>	51
3.3.2.	<i>Bloque de procesamiento y control de información</i>	54
3.3.2.1.	<i>Tarjeta de desarrollo microcontrolador</i>	54
3.3.3.	<i>Bloque de comunicación inalámbrica</i>	56
3.3.4.	<i>Bloque de Almacenamiento y suministro de energía</i>	57
3.3.4.1.	<i>Dimensionamiento del sistema FV autónomo</i>	58
3.3.4.2.	<i>Banco de baterías</i>	59
3.3.4.3.	<i>Sistema de gestión de carga</i>	59
3.3.4.4.	<i>Acoplamiento de voltaje</i>	61
3.4.	Esquemas de conexión del instrumento sensor	62
3.4.1.	<i>Diagrama de conexión del bloque de adquisición de datos</i>	62
3.4.2.	<i>Diagrama de conexión del bloque de procesamiento de datos</i>	63
3.4.3.	<i>Diagrama de conexión del bloque de comunicación inalámbrica de datos</i>	64
3.4.4.	<i>Diagrama de conexión del bloque de almacenamiento y suministro de energía</i> ...	65
3.4.5.	<i>Diagrama de conexiones del instrumento desarrollado</i>	65
3.5.	Requerimientos software del instrumento desarrollado	66
3.5.1.	<i>Descripción del software del sistema</i>	66
3.5.2.	<i>Software para la configuración del instrumento</i>	67
3.5.2.1.	<i>Software para la programación del MCU STM32</i>	67
3.5.2.2.	<i>Software para la programación del MCU ESP8266</i>	68
3.5.2.3.	<i>Software para el desarrollo de la aplicación web</i>	68
3.6.	Lógica de programación del instrumento recolector de datos	70
3.6.1.	<i>Lógica de programación del MUC STM32</i>	70
3.6.2.	<i>Lógica de programación del MUC ESP8266</i>	71
3.6.3.	<i>Lógica de programación del script de Python</i>	73
3.6.4.	<i>Lógica de programación de la aplicación web</i>	74
3.7.	Diseño e implementación del prototipo hardware	76
3.7.1.	<i>Fabricación de las tarjetas de circuito impreso</i>	77

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	79
4.1.	Modelo estadístico de Irradiancia, Voc e Isc	79

4.1.1.	<i>Mediciones de Voltaje y Corriente</i>	80
4.1.2.	<i>Pruebas de repetitividad en la recepción de datos del INA 226</i>	82
4.1.3.	<i>Correlación entre datos y ajuste de curva lineal</i>	83
4.2.	Pruebas de consumo de corriente	88
4.3.	Pruebas de autonomía energética	90
4.3.1.	<i>Pruebas de por día de carga / descarga</i>	90
4.3.2.	<i>Pruebas de por horas de carga y noche de descarga</i>	92
4.4.	Pruebas de transmisión, recepción y presentación de datos	93
4.5.	Pruebas de repetitividad del instrumento	97
4.6.	Pruebas de comparación y fidelidad de datos	97
4.6.1.	<i>Pruebas con el medidor de potencia solar SM-206-SOLAR</i>	98
4.6.2.	<i>Pruebas de radiación solar promedio</i>	100
4.6.3.	<i>Pruebas de radiación solar diaria</i>	103
4.7.	Análisis económico del instrumento desarrollado	105
CONCLUSIONES		107
RECOMENDACIONES		108
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Instrumentos de radiación meteorológica.....	13
Tabla 2-2:	Ventajas y desventajas de los sistemas de generación a partir de energía solar.	34
Tabla 3-2:	Efectos físicos más importantes con su transductor asociado.....	41
Tabla 4-2:	Protocolos de Comunicación Serial.....	42
Tabla 5-2:	Análisis al modelo de comunicación pub/sub	44
Tabla 1-3:	Especificaciones técnicas del sensor INA226.	52
Tabla 2-3:	Características técnicas del sensor de temperatura LM35.....	53
Tabla 3-3:	Principales características técnicas del STM32F103C8T6.....	56
Tabla 4-3:	Especificaciones técnicas de ESP8266 wemos D1 mini	57
Tabla 5-3:	Corriente de consumo de los componentes del instrumento desarrollado.....	59
Tabla 6-3:	Especificaciones técnicas de las baterías Li-ion 18650.....	60
Tabla 7-3:	Especificaciones técnicas del módulo balanceador de baterías Li-ion.	60
Tabla 8-3:	Características técnicas del reductor de voltaje MP158EN.....	61
Tabla 9-3:	Descripción de los elementos electrónicos del bloque de adquisición de datos.	63
Tabla 10-3:	Descripción de los periféricos empleados del MCU STM32.....	64
Tabla 11-3:	Descripción del esquema circuital del bloque de comunicación	64
Tabla 1-4:	Datos enviados por el medidor de potencia y corriente INA 226.....	83
Tabla 2-4:	Coefficientes de correlación de Pearson en los diferentes niveles de temperatura..	84
Tabla 3-4:	Corrientes de consumo durante el ciclo de trabajo activo	89
Tabla 4-4:	Índices de carga/descarga a lo largo de los días de prueba.....	91
Tabla 5-4:	Voltaje en las baterías, analizados en horas noche y horas día	92
Tabla 6-4:	Repetitividad de datos en el instrumento desarrollado.....	98
Tabla 7-4:	Datos de la comparación realizada	100
Tabla 8-4:	Irradiancia solar promedio durante 9 días de prueba.....	101
Tabla 9-4:	Errores promedio por hora de registro de datos del instrumento desarrollado.....	104
Tabla 10-4:	Análisis económico del instrumento a detalle.	106

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2:	Plano de la eclíptica: órbita terrestre y estaciones.	9
Ilustración 2-2:	Los hitos más importantes en el desarrollo de la tecnología fotovoltaica. .	18
Ilustración 3-2:	Efecto fotovoltaico en celdas solares.	24
Ilustración 4-2:	Tecnologías de celdas solares.	25
Ilustración 5-2:	Mejores investigaciones en eficiencia de celdas solares hasta el 2020.	26
Ilustración 6-2:	Circuito equivalente de una celda solar.	30
Ilustración 7-2:	Características I-P-V de la celda solar y MPP.	31
Ilustración 8-2:	Resultados de variaciones de temperatura sobre las características de la celda solar.	33
Ilustración 9-2:	Esquema de un sistema FV desconectado de la red.	36
Ilustración 10-2:	Modelo de comunicación publicación/suscripción.	43
Ilustración 1-3:	Pruebas de laboratorio con el medidor de potencia solar SM206-SOLAR.	48
Ilustración 2-3:	Esquema circuital implementado para la lectura de I_{sc} y V_{oc}	48
Ilustración 3-3:	Curvas IV a diferentes temperaturas, Irradiancia: 1000 Wm^2	49
Ilustración 4-3:	Arquitectura general del Sistema.	50
Ilustración 5-3:	Medidor de corriente y potencia bidireccional, INA226.	51
Ilustración 6-3:	LM35, sensor de temperatura. Empaque plástico TO-92.	53
Ilustración 7-3:	Panel solar monocristalino de 5W / 12V.	53
Ilustración 8-3:	Diagrama de interfaces necesarias del dispositivo microcontrolador.	54
Ilustración 9-3:	Tarjeta microcontroladora STM32F103C8T6 "blue pill".	55
Ilustración 10-3:	Convertor USB - Serial, FTDI FT232R.	55
Ilustración 11-3:	Programador ST-Link V2 (SWD).	56
Ilustración 12-3:	Wemos D1 Mini ESP8266 WIFI.	57
Ilustración 13-3:	Esquema del sistema FV autónomo empleado.	58
Ilustración 14-3:	Baterías Li-ion 18650.	59
Ilustración 15-3:	BMS 3S 10 A Balanceador de carga de baterías Li-ion.	60
Ilustración 16-3:	Regulador MP1584EN Step-down.	61
Ilustración 17-3:	Esquema circuital de los bloques de adquisición, procesamiento y comunicación de datos.	62
Ilustración 18-3:	Esquema circuital del bloque de almacenamiento y suministro de energía.	65
Ilustración 19-3:	Diagrama de conexiones del instrumento completo.	66
Ilustración 20-3:	Arquitectura general software del instrumento.	68
Ilustración 21-3:	Esquema de comunicación IoT a través de protocolo MQTT.	69

Ilustración 22-3:	Diagrama de flujo STM32f103C8T6.....	71
Ilustración 23-3:	Diagrama de flujo del ESP8266 Wemos D1.	72
Ilustración 24-3:	Lógica de programación del script de Python en el servidor.....	74
Ilustración 25-3:	Flujo de consulta para generar el reporte CVS.....	75
Ilustración 26-3:	Flujo de consulta y generación de los gráficos.....	76
Ilustración 27-3:	Montado del sistema en una placa de pruebas.....	76
Ilustración 28-3:	Diseño de las placas de circuito impreso.....	77
Ilustración 29-3:	Circuito de adquisición, procesamiento y comunicación de datos (Izq.). Circuito de alimentación y BMS (Der.).....	78
Ilustración 1-4:	Instrumento recolector de datos de irradiancia solar desarrollado.	79
Ilustración 2-4:	Ubicación del instrumento desarrollado.	80
Ilustración 3-4:	A la izquierda comparación entre las mediciones de voltaje. A la derecha el experimento realizado.....	80
Ilustración 4-4:	Error en la medición de un conjunto de valores de voltaje.....	81
Ilustración 5-4:	Izquierda, mediciones de corriente. Derecha, experimento realizado con el monitor de corriente y potencia INA 226.	81
Ilustración 6-4:	Índices de error en el conjunto de datos de medición de corriente.	82
Ilustración 7-4:	Relación entre voltaje e irradiancia (izq.) y corriente e irradiancia (der.). .	84
Ilustración 8-4:	Ajuste exponencial (izq.) y ajuste lineal (der.) a los datos experimentales.	85
Ilustración 9-4:	Diagrama de dispersión { <i>I</i> _{sc} , G} del experimento realizado.....	86
Ilustración 10-4:	MAPE del modelo.	86
Ilustración 11-4:	RSME del modelo obtenido.....	87
Ilustración 12-4:	rRMSE del modelo desarrollado variando la temperatura.	88
Ilustración 13-4:	Ciclo de consumo de corriente en modo de funcionamiento activo.	89
Ilustración 14-4:	Carga/Descarga de las baterías a través del periodo de prueba.	90
Ilustración 15-4:	Inicio de la página web que presenta los datos de radiación solar por día.	93
Ilustración 16-4:	Cliente MQTT del broker en la aplicación de prueba MQTT Explorer. ...	94
Ilustración 17-4:	Terminal de <i>Visual Studio Code</i>	95
Ilustración 18-4:	Recepción de datos en la base de datos, visto desde el servidor.	95
Ilustración 19-4:	Datos graficados en la aplicación desarrollada.....	96
Ilustración 20-4:	Descarga del reporte de datos seleccionando un rango de fechas.	96
Ilustración 21-4:	Interfaz de acceso de la base de datos <i>phpMyAdmin</i>	97
Ilustración 22-4:	Prueba de comparación de datos.....	99
Ilustración 23-4:	Cuantificación gráfica del análisis estadístico de errores.	99
Ilustración 24-4:	Radiación solar promedio en los días de prueba.	101
Ilustración 25-4:	Errores cuantificables de los datos obtenidos y los de la REM, GEAA. ..	102
Ilustración 26-4:	Errores con respecto al portal web radiaciónsolar.es.....	102

Ilustración 27-4:	Radiación solar a lo largo del 30 de julio, 2022.	103
Ilustración 28-4:	Errores promedio por hora de prueba del instrumento desarrollado.	104
Ilustración 29-4:	Resumen gráfico del análisis económico del instrumento.	105

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-2:	Corriente a través del diodo p-n.....	29
Ecuación 2-2:	Corriente en términos de la corriente de saturación en inversa.	29
Ecuación 3-2:	Corriente de SC, donde W_{eff} es el grosor efectivo de la celda.	30
Ecuación 4-2:	Corriente de la celda FV en condiciones ideales.	30
Ecuación 5-2:	Corriente de la celda FV en condiciones reales SDM.	30
Ecuación 6-2:	Voltaje de circuito abierto en la celda solar.....	31
Ecuación 7-2:	Eficiencia máxima de la celda solar.	32
Ecuación 8-2:	Factor de llenado de la celda solar, en sus características I-V.....	32
Ecuación 1-4:	Modelo de Irradiancia en dependencia de I_{sc} obtenido.	85

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

FF	Fill Factor
ISDM	Modelo ideal de un solo diodo
I-V	Corriente Vs. Voltaje
MPP	Máximo punto de potencia
MPPT	Seguidor del máximo punto de potencia
P-V	Potencia Vs. Voltaje
FV	Fotovoltaico
SDM	Modelo de un solo diodo
SSDM	Modelo de un solo diodo simplificado
STC	Condiciones de test standard
NOCT	Temperatura de operación nominal de la celda solar
BMS	Sistema de gestión de baterías
SOC	Estado de carga
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
GEAA	Grupo de Energías Alternativas y Ambientales
REM	Res de estaciones metereológicas
SOT	Estado de temperatura
PCE	Eficiencia en la Conversión Energética
T	Temperatura ambiente
G	Radiación solar
SCC	Corriente de corto circuito
DNI	Irradiancia Directa Normal
DHI	Irradiancia Difusa Horizontal
GHI	Irradiancia Global Horizontal
DDM	Modelo de doble diodo
OC	Circuito abierto
MQTT	Protocolo de comunicación IoT (<i>Message Queing Telemetry Transport</i>)

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** HOJA DE DATOS DEL MÓDULO SOLAR NPA5S-12H
- ANEXO B:** CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MEDIDOR DE ENERGÍA SOLAR DE PRECISIÓN DIGITAL SM206.
- ANEXO C:** DIAGRAMA DE FLUJO A DETALLE DE LA LÓGICA DE PROGRAMACIÓN DEL STM32F103C8T6.
- ANEXO D:** DIAGRAMA DE FLUJO A DETALLE DE LA LÓGICA DE PROGRAMACIÓN DEL ESP8266 WEMOS D1.
- ANEXO E:** LÓGICA DE PROGRAMACIÓN DEL SCRIPT DE PYTHON EN EL SERVIDOR LINUX
- ANEXO F:** ESQUEMA CIRCUITAL COMPLETO DE LOS BLOQUES DE ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y COMUNICACIÓN DE DATOS
- ANEXO G:** ESQUEMA CIRCUITAL DEL BLOQUE DE ALMACENAMIENTO Y SUMINISTRO DE ENERGÍA
- ANEXO H:** DATOS (ISC, G) Y PROCESOS EMPLEADOS EN LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL
- ANEXO I:** DATOS (VOC, G) Y PROCESO EMPLEADO PARA HALLAR EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON.
- ANEXO J:** MODELOS DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO VS. IRRADIANCIA A DIFERENTES NIVELES DE TEMPERATURA
- ANEXO K:** MODELOS DE VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO VS. IRRADIANCIA A DIFERENTES NIVELES DE TEMPERATURA.
- ANEXO L:** EVIDENCIAS DE LA PRUEBA DE CONSUMO DE CORRIENTE
- ANEXO M:** GRÁFICAS DE IRRADIACIÓN SOLAR Y VOLTAJE DE BATERÍAS A LO LARGO DE LOS DÍAS DE PRUEBA.
- ANEXO N:** RADIACIÓN SOLAR PARA CADA DÍA DE PRUEBA CON RELACIÓN A LOS DATOS DE LA REM, GEAA.
- ANEXO O:** CERTIFICADO DE LOS DATOS PROVENIENTES DE LA RED DE ESTACIONES METEREOLÓGICAS, GEAA.
- ANEXO P:** DATOS EMPLEADOS EN EL ANÁLISIS COMPARATIVO PROVENIENTES DE RADIACIÓN SOLAR.ES
- ANEXO Q:** DATOS EMPLEADOS DE LA RADIACIÓN DIARIA PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ERROR POR HORA.
- ANEXO R:** IRRADIANCIA SOLAR VS. TEMPERATURA DEL MÓDULO SOLAR POR DÍA DURANTE EL PERÍODO DE PRUEBA.

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular se lo direccionó con el objetivo de desarrollar un instrumento autónomo para la medición indirecta de la irradiancia solar a partir de sensores de silicio. A través de pruebas de laboratorio, empleando un medidor de potencia solar de precisión digital modelo SM206-SOLAR, con un rango de error del $\pm 10\%$ por lectura y $\pm 0.38 \text{ W/m}^2 / ^\circ\text{C}$, y entrenador fotovoltaico avanzado Lucas Nulle, se desarrolló un modelo estadístico correlacional entre la corriente de cortocircuito del módulo solar NPA5S-12H y la irradiancia artificial medida. Se determinó una correlación lineal significativa con un error porcentual absoluto medio (MAPE) en promedio del 6.97 %, un error cuadrático medio (RMSE) promedio de $\pm 26 \text{ W/m}^2 / ^\circ\text{C}$ y un error cuadrático medio relativo (rRMSE) promedio del 10.76%. Mediante las métricas de error obtenidas indican que el modelo lineal desarrollado es aceptable para levantar información de irradiancia solar en tiempo real. Para esto, se elaboró un dispositivo electrónico con funciones de comunicación inalámbrica basada en un enlace WiFi y protocolo de comunicación IoT MQTT, además de alimentación autosustentable con autonomía energética de 7 días, un índice de carga de 1.05% y un índice de descarga de 0.57%. Finalmente se configuró un servidor MQTT, SQL y una aplicación Web en un servidor Linux bajo el dominio <http://solardata.epoch.edu.ec> para realizar la recolección y presentación de datos en tiempo real. Se concluye que el dispositivo desarrollado, así como el modelo lineal elaborado para realizar la medición indirecta de irradiancia solar y el aplicativo Web permitirán recolectar datos más fiables y de primera mano para futuras investigaciones. Se recomienda realizar una mejor caracterización I-V del sensor de irradiancia solar bajo condiciones controladas y explorar otras técnicas de modelado de celdas fotovoltaicas para correlacionar los datos obtenidos a fin de obtener menores índices de error.

Palabras clave: <RADIACIÓN SOLAR>, <CELDA FOTOVOLTAICAS>, <AUTONOMÍA ENERGÉTICA>, <COMUNICACIÓN INTELIGENTE>, <PROTOCOLO MQTT>, <MEDICIÓN INDIRECTA>, <ENERGÍA RENOVABLE>, <MODELO CORRELACIONAL>.



[Handwritten signature]
2052-DBRA-UPT-2022

SUMMARY

The present Curricular integration research project aimed to develop an autonomous instrument for indirectly measuring solar irradiance from silicon sensors. Through laboratory tests, using a precision digital solar power meter model SM206-SOLAR, with an error range of $\pm 10\%$ per reading and $\pm 0.38\%$ $W/m^2/^{\circ}C$, and advanced photovoltaic trainer Lucas Nulle, a statistical correlation model was developed between the short-circuit current of the NPA5S-12H solar module and the measured artificial irradiance. A significant linear correlation was determined with a mean absolute percentage error (MAPE) of 6.97%, an average root-mean-square error (RMSE) of ± 26 $W/m^2/^{\circ}C$ and a percentage relative root mean squared error (rRMSE) of 10.76%. The error metrics indicate that the linear model developed is acceptable for real-time collecting information on solar irradiance. For this, an electronic device with wireless communication functions based on a Wi-Fi link and IoT MQTT communication protocol was developed, in addition to self-sustaining power with energy autonomy of 7 days, a charge rate of 1.05%, and a discharge rate of 0.57. %. Finally, an MQTT, SQL server, and a Web application were configured on a Linux server under the domain <http://solardata.epoch.edu.ec> to collect and present data in real-time. It is concluded that the device developed and the linear model developed to carry out the indirect measurement of solar irradiance and the Web application will allow the collection of more reliable and first-hand data for future research. It is recommended to perform a better I-V characterization of the solar irradiance sensor under controlled conditions and to explore other photovoltaic cell modeling techniques to correlate the data obtained to get lower error rates.³

Keywords: <SOLAR RADIATION>, <PHOTOVOLTAIC CELLS>, <ENERGY AUTONOMY>, <INTELLIGENT COMMUNICATION>, <MQTT PROTOCOL>, <INDIRECT MEASUREMENT>, <RENEWABLE ENERGY>, <CORRELATIONAL MODEL>.



Juan Iván Lara Olivo

0602546103

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y desabastecimiento de recursos fósiles ha empujado al ser humano, y más en específico al sector científico e investigativo, a desarrollar nuevas maneras de producir energía eléctrica amigable con el medio ambiente y eficiente para el ser humano, una de tantas maneras de generar este bien para la humanidad es a través de la energía solar incidente en nuestro planeta Tierra. Gracias a tecnologías fotovoltaicas es posible alimentar distintas cargas eléctricas en beneficio de distintos sectores tanto productivos como consumidores. A raíz de la propuesta de energía solar como reemplazo de combustibles fósiles es indispensable un estudio a priori del recurso solar disponible para su explotación en diferentes zonas y áreas geográficas, haciendo de rigor el uso de dispositivos sensores de irradiación solar para la recolección y manejo de datos. Otra de las propuestas interesantes para el aprovechamiento de este recurso natural es el análisis predictivo para la gestión energética en parques solares, gracias a una gran base de datos sobre incidencia solar y por medio de diferentes técnicas de minería de datos se puede predecir el rendimiento del sistema de conversión solar y garantizar un funcionamiento estable de la red eléctrica.

Acerca de la concientización del rol que cumple la energía en campos como el doméstico, transporte, industria, y los servicios; Petrecca (2014, pp. 297-301) comenta que el primer paso para cumplir con este objetivo es la educación sobre temas de gestión energética, abordando temáticas desde energía y balance de masa, hasta transformación energética. Además, plantea que el papel de la educación universitaria, ya sea enfocada a una educación especializada o más amplia, es a través de tópicos relacionados a la transformación energética como electrónica de potencia, ciencia informática, automatización industrial, entre otras; es ofrecer una vista exhaustiva de varios conceptos y preparar al estudiante hacia el futuro del trabajo. A posterior es importante mantener el entrenamiento y motivación personal, obteniendo toda clase de información relacionada con energía para colaborar en el trabajo y planificación a diario, de todas maneras, el trabajar debe mantener en mente para quien trabaja, como contribuye con su trabajo, y cuáles son los principales resultados del proyecto.

Para los próximos años se espera un cambio más notable y radical hacia el uso de energía renovable para poder sostener la crisis tanto ambiental como de recursos fósiles, por ello es necesario incorporar en la matriz energética sistemas que permitan aprovechar recurso natural y al mismo tiempo mejorar la eficiencia de estos sistemas energéticos, sacando el mejor provecho y frenando las consecuencias que se han venido acarreado varias décadas atrás.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

El siguiente diagnóstico del problema del presente Trabajo de Integración Curricular tiene como finalidad presentar las problemáticas principales que motivan al sector investigativo y de desarrollo tecnológico a emprender en el campo de las energías renovables y estudio de los comportamientos físicos para aprovechamiento de los mismos. El proceso concierne revisión bibliográfica y planteamiento de objetivos a desarrollar.

1.1. Antecedentes

Según análisis de tendencias en las aplicaciones fotovoltaicas alrededor del mundo se ha observado un notable crecimiento de más del 30% con respecto al año pasado en la capacidad fotovoltaica global instalada (GW). El valor total de negocio en el sector fotovoltaico en el 2020, fue de \$ 160 billones de dólares. El mercado fotovoltaico halla su top 5, con países a la cabeza como China (48.0 GW), Unión Europea (19.8 GW), Estados Unidos (19.7 GW), Vietnam (11.1 GW) y Japón con una producción de 8.7 GW. Desde otro punto de vista, el impacto climático que esto ha significado se ve alentador, con 860 millones de toneladas de CO₂ que se ahorran cada año. (Gaëtan y Izumi 2021).

El caso América, referente a todo el continente incluido Estados Unidos y Latinoamérica, representa en conjunto una generación de 26 GW de potencia instalada y una capacidad total acumulada de 120 GW en lo que fue el 2020. El caso Centro y Suramérica es un sector que no representa mucha influencia en el aporte de potencia fotovoltaica a nivel mundial. Los países que han empezado a promover una cultura de energía renovable solar son en orden de influencia Chile, Honduras y últimamente México y Brasil. Los únicos países que se encuentran generando niveles de MW son Argentina con 760 MW, seguido por Perú en los últimos años, Honduras y Colombia. Ecuador, junto a República Dominicana y el Salvador forman un conjunto de países que han puesto en marcha planes de apoyo a la electricidad fotovoltaica, y cada vez más centrales son conectadas a la red. Es necesario encontrar maneras en las cuales promover este tipo de explotación de energía renovable, así como también mejorar las condiciones y aprovechar al máximo de esta extracción, ya que el principal problema para este de fuentes de generación eléctrica es el alto costo de inversión que representa, por ende es de vital importancia promover la investigación, implementación y en especial, la inclusión y unión del sector empresarial con el de investigación, solo así el país aprovechará de forma eficiente todos los recursos que tiene al mano para ser sustentablemente explotados.

El Operador Nacional de Electricidad en nuestro país establece que en el 2020 el mismo alcanzó una producción neta total de 26.979.96 *GWh* distribuida de la siguiente manera: 24 168.66 *GWh* generación hidroeléctrica; 2.159.64 *GWh* generación termoeléctrica; 400.86 *GWh* generación no convencional y 250.79 *GWh* importación desde Colombia, no se presentó importación desde Perú (cenace, 2020, p. 3). En comparación al 2019, año en la que la producción neta fue 27 532.24 *GWh* distribuida de la siguiente manera: 24 458.10 *GWh* generación hidroeléctrica; 2 665.69 *GWh* generación termoeléctrica; 402.62 *GWh* generación no convencional y 5.83 *GWh* importación desde Colombia, sin presentarse importación desde Perú.

Un problema sobre la generación eléctrica en el país visible para Jara (2018, pp. 61-65), fue la variabilidad interanual de la energía hidroeléctrica en el Ecuador, sobre el cuál se planteó una evaluación capaz de identificar el potencial de la energía fotovoltaica complementaria que podría hacer frente a este inconveniente con la energía hídrica generada. Mediante la combinación de un análisis multicriterio participativo basado en GIS (Sistema de Información Geográfica) y un análisis del sistema energético (SDDP), se estableció un importante potencial de instalación fotovoltaica sin explorar de 35.7 *GWp* (61.5*GWh/año*), lo que es equivalente a 4.3 veces la capacidad actual del sistema eléctrico, y casi la mitad de esta potencia se encuentra en la parte sur del país. El desarrollo de un pequeño porcentaje (10.9 %) de este potencial es suficiente para compensar la generación de energía hidroeléctrica y reducir al mismo tiempo la necesidad de ampliar la energía termoeléctrica para poder cubrir la futura demanda de electricidad en 2030. Al mismo tiempo que esto significa una reducción sustancial de los costes operativos del sistema eléctrico (2.5 mil millones de dólares), como también reducción en la emisión de gases de efecto invernadero (20.545 *GgCO₂eq*).

El uso de energía fotovoltaica resulta ser una solución tanto económica como ecológica frente a fuentes de generación hidroeléctricas, que representa en sus grandes centrales de generación con enormes reservorios que en época de sequía resultan en una pérdida grande para el sector de producción e interconexión de electricidad. La producción y gestión de energía fotovoltaica debe ser considerada por personal responsable en la toma de decisiones para mantener una producción de energía firme con elevada cuota de energía renovable a largo plazo.

Mediante actualización del Atlas Solar del Ecuador (Ordoñez y Vaca, 2020) donde se observa que debido a la ubicación geográfica del país (sobre la línea ecuatorial), el recurso solar es casi constante a lo largo del año. La Irradiancia Global Horizontal (GHI) anual sobre el Ecuador varía desde 2.9 *kWh/m² día* a 6.3 *kWh/m² día*. En general, regiones ubicadas a elevadas altitudes como la ciudad de Riobamba, ubicada en la llanura de Tapi, llanura a las faldas del volcán inactivo Chimborazo, considerando mundialmente como el punto más cercano al sol medido desde el centro de la tierra. La ciudad que se encuentra a 2756 m.s.n.m, es lugar donde los niveles de radiación son mayores, en relación a ciudades ubicadas en la región costera o amazónica.

Los niveles de radiación solar en Ecuador son lo suficientemente altos como para ampliar implementaciones de tecnologías solares térmicas como fotovoltaicas. Especial atención se le sabe dar a las provincias de Pichincha, Imbabura, Loja y Galápagos, donde se presentan valores altos de potencial solar. Además, dentro del Portafolio de proyectos solares FV CELEC EP para dos años a partir del 2020, se prevé la construcción de 11 proyectos FV alrededor del Ecuador, uno en la provincia de Chimborazo, aportando con 1230 MW con conexión al SNT inmediato, parcial y no inmediata (Jara, 2021, pp. 27-32).

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) a través de su estación agrometeorológica en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo pone mensualmente a disposición de estudiantes, ciudadanía y público en general boletines mensuales y anuarios acerca de mediciones de variables meteorológicas de interés. Hasta el boletín del mes de marzo (Tiupul y Arevalo, 2022: p. 7), no se observan en las tablas presentadas valores de irradiancia solar, por lo cual es necesario contar con una herramienta de medición de esta variable de interés en la generación energética fotovoltaica.

El INAMHI, a través del servicio de emisión de información estadística meteorológica e hidrológica para el sector público y académico, brinda un conjunto de datos informativos de análisis probabilístico y estadístico de la información histórica disponible de las variables hidrológicas y meteorológicas con el fin de conocer su comportamiento en el futuro, sujetos a costos de certificación y validación, aun así, a través del portal esta información no es de conocimiento y acceso general.

El uso de datos históricos para la predicción de generación fotovoltaica es un campo amplio de estudio de la mano de la minería de datos, representa una muy buena herramienta para mejorar la eficiencia energética de cualquier planta de generación fotovoltaica. En una investigación desarrollada mediante cooperación entre una empresa privada proveedora de energía eléctrica y le EPN, (Fabara et al., 2019: pp. 1-3) se presenta un modelo efectivo de generación de energía mediante técnicas de minería de datos para la central fotovoltaica ubicada en Pimampiro (Imbabura), con un total de 14400 paneles solares y potencia nominal de 3.6 MW. Lo importante mencionar es que estos estudios requieren de datos de por lo menos un año de seguimiento de las variables, como temperatura ambiente, temperatura del panel, humedad relativa, velocidad de viento, dirección del viento, irradiancia solar y mediciones de potencia activa, reactiva y aparente. Por lo que la Central de la comunidad de Paragachi aportó esta información de dos años para el estudio de predicción. Una vez obtenido los datos, se debe escoger el algoritmo de predicción e implementarlo mediante herramientas informáticas. El modelo de predicción de (Fabara et al., 2019), alcanzó una precisión promedio del 98.7 %.

Con lo cual se deduce que una de las principales limitaciones para el desarrollo de un modelo de predicción para la gestión energética eficiente, es el tiempo de estudio, debe ser amplio y, primordialmente se debe tener datos de accesibilidad y disponibilidad.

1.2. Planteamiento del problema

¿Es posible desarrollar un instrumento basado en sensores de silicio para realizar la medición indirecta y registro de datos de irradiancia solar en la ciudad de Riobamba?

1.3. Justificación

Con el fin de maximizar el uso y aumentar la eficiencia de tanto paneles solares como celdas fotovoltaicas se propone el desarrollo de un instrumento que recolección de datos de irradiancia solar cuyo principal propósito es el de servir de herramienta para la producción de una fuente de información primaria para el uso en diversos campos de la investigación y desarrollo de sistemas de generación eléctrica renovable en la ciudad y en el país, promoviendo la investigación y desarrollo en campos de la predicción fotovoltaica y gestión energética.

El desarrollo de este trabajo de titulación, el cual se centra en una investigación aplicada, se basa en el estudio y correlación de datos a partir de pruebas de laboratorio con la finalidad de establecer un modelo estadístico, el cual representa con cierto margen de error la respuesta natural de radiación solar frente a la influencia de factores externos. El sistema de recolección de datos basado en celdas FV monocristalinas de alta calidad, registra valores de corriente, voltaje y temperatura, los cuales serán necesarios y suficientes para el propósito mencionado. Las diversas señales eléctricas serán direccionadas hacia un módulo de procesamiento de datos micro controlado, en conjunto con un sistema de comunicación WIFI para la monitorización a distancia de los datos entregados, mediante una aplicación de escritorio. El aspecto de autonomía se lo desenvuelve en el marco de explotar las características de producción energética del panel, para la alimentación de del sistema de adquisición de datos, comunicación y carga de batería, asegurando el continuo monitoreo y procesamiento de datos. Además del método científico, se propone un método de evaluación basado en análisis comparativo con datos registrados mediante otros sensores de irradiancia solar, por medio entidades de investigación o instituciones certificadoras. El análisis de resultados se detallará en base al error medio cuadrático (RMSE) y al error porcentual absoluto medio (MAPE), que son coeficientes de mayor incidencia para valorar la precisión de instrumentos de medición.

1.4. Objetivos

El presente trabajo ha propuesto diversos objetivos detallados a continuación, estos objetivos han sido elaborados con el afán de obtener los mejores resultados en el desarrollo de este proyecto.

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un instrumento autosustentable para la medición indirecta y registro de datos de irradiancia solar basado en sensores de silicio.

1.4.2. Objetivo Específico

- Revisión de literatura sobre el estado del arte de instrumentos desarrollados para la medición indirecta de irradiancia solar en la ciudad de Riobamba.
- Diseñar un instrumento para la medición indirecta de irradiancia solar a partir de la obtención de un modelo estadístico a través de una correlación de datos mediante pruebas de laboratorio.
- Implementar el instrumento de medición indirecto de irradiancia solar a partir del diseño propuesto considerando aspectos como autosostenibilidad energética y comunicación con la nube para el registro de los datos.
- Desarrollar una herramienta informática para la recolección y visualización de datos históricos de irradiancia solar de utilidad para investigaciones relacionadas a la generación eléctrica renovable.
- Evaluar la precisión de los datos de irradiancia solar recolectados por el instrumento desarrollado, así como su autonomía de funcionamiento a partir de su autosostenibilidad energética.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este segundo capítulo se va a desarrollar como primer punto una breve descripción de los trabajos de investigación realizados desde una visión mundial hasta local, destacando los detalles más relevantes de cada uno. Seguidamente se describe los fundamentos teóricos que dan paso a desarrollar el Trabajo de Integración Curricular, se revisan temas como energía solar, crisis climática, demanda energética mundial, energías limpias, energía solar, efecto FV, tecnologías, modelamiento, sistemas de producción eléctrica solar y dispositivos recolectores de datos y sus componentes.

2.1. Antecedentes de investigación

Investigaciones llevadas a cabo por miembros del IEEE en Estados Unidos acerca del desarrollo de un novedoso sensor de irradiación solar de bajo costo basado en redes neuronales, resultó de gran importancia para las grandes centrales fotovoltaicas en el seguimiento preciso de la irradiancia solar; ya que, una de sus principales ventajas fue que puede ubicarse o incluso puede incorporarse al panel fotovoltaico productor de energía. Como resultado, el panel fotovoltaico sensor, “verá” directamente la misma irradiación y la misma temperatura que el panel productor de energía “ve”, lo cual permite un seguimiento preciso de la irradiancia incidente por metro cuadrado sobre el área en estudio, mejorando así el rendimiento del seguidor de punto de máximo potencia, mejorando la eficiencia del sistema y aprovechando toda la energía posible proveniente de la naturaleza (Mancilla-David et al. 2014, p. 6-8).

El Dpto. de Ingeniería y Economía Industrial e Informática, de la Universidad de L’Aquila, en Italia; diseñó un sistema de bajo costo y confiable medidor de irradiancia solar. Este dispositivo fue comparado en pruebas de campo con un piranómetro de termopila, instrumento de alta eficiencia en la medición de la radiación solar, mostrando una buena precisión y una alta sensibilidad, validando así el algoritmo propuesto y el hardware del sistema. Se aprovecharon el enfoque del modo de corriente y las técnicas de bajo voltaje y bajo consumo, y un rendimiento aún mejor (Orsetti et al. 2016, p. 3-4).

Un estudio de grado en la ciudad de Riobamba, sobre la implementación de un sistema de adquisición de datos de temperatura, radiación y humedad para un panel solar arroja datos de frecuencia para la irradiación en la ciudad, se obtuvo que las mayores frecuencias son alrededor de 130 y 650 W/m^2 . Mediante histograma se reconoció que la mayor radiación se presenta entre las 11 am y 3 pm dando valores entre 850 y 1150 W/m^2 . En este estudio se empleó un sensor David 6450 para radiación solar (Flores y Rodríguez, 2015).

Por medio de un trabajo de titulación en la ciudad de Quito, se propuso estimar la irradiancia solar basada en modelos matemáticos. El cual concluye que los modelos matemáticos que trabajan bajo condiciones STC, no representan las condiciones de campo real, por lo cual se opta por estimadores de parámetros como el de Matlab/Simulink. Se presentan dos modelos efectivos para la estimación de irradiancia que en condiciones bajo carga se aproximan muy bien a los valores medidos con un piranómetro, obteniendo un margen de error del 5 %. (Cushicóndor, 2019). Otro estudio similar emplea un sistema RSR incorporado por un piranómetro basado en un fotodiodo, para mediante calibración obtener valores de irradiancia; la validación de este sistema mostró un error medio de 3.48 % (Pillajo, 2021: p. 91).

A través de una tesis presentada en la misma ciudad se llega a establecer que la irradiancia promedio en la ciudad de Quito y sus alrededores es de 489 W/m^2 y, presenta mejores valores de eficiencia que difiere en un dos por ciento de la eficiencia que el fabricante establece (Villacís y Neto, 2015: pp. 89-90)

2.2. Referencias Teóricas

La recopilación de información es parte vital de cualquier investigación, por lo cual se exponen las diferentes temáticas de interés en el presente trabajo.

2.2.1. Irradiación Solar

La irradiación solar se expresa como un flujo de radiación o densidad de potencia en términos de potencia sobre área (W/m^2). Antes de hablar de fondo sobre este término se debe hacer hincapié en la mayor fuente de producción de irradiación, el sol; perteneciente a la vía láctea, nuestro sol se encuentra aproximadamente 27×10^3 años luz del centro de la galaxia. El vector tierra-sol recorre áreas iguales en tiempos iguales, denominado movimiento kepleriano. Siendo el sol centro de nuestro sistema, tanto la distancia entre este y la tierra, como su velocidad varían periódicamente, el período de revolución es de 365.2564 días y se lo conoce como año sideral (Sayigh y Backus, 1977: pp. 16-19).

La posición del sol en el cielo varía en dependencia tanto del día y temporada, esto debido a que la tierra con respecto al sol y al plano ecuatorial presenta una inclinación de alrededor de 23.5° denominada plano de la eclíptica, y también ocasionado por los movimientos traslacionales de la tierra. El recorrido que marca la tierra alrededor del sol fija órbitas elípticas y la velocidad orbital es variable, de manera que, si incrementa la distancia entre planeta y Sol, la velocidad orbital será menor. La velocidad alcanza su punto máximo en el punto cuando el Sol está más cerca de la tierra, denominado perihelio y es mínima cuando se encuentra más alejada, denominada afelio, esto se puede observar gráficamente en la Ilustración 1-2.

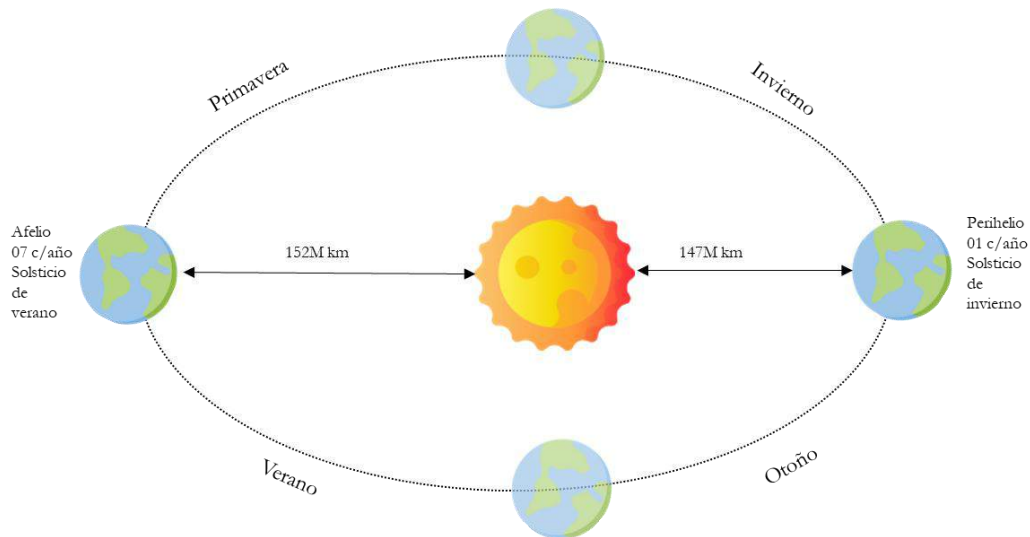


Ilustración 1-2: Plano de la eclíptica: órbita terrestre y estaciones.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

2.2.2. *Desplazamiento del Sol y la Tierra*

La distancia de separación entre el Sol y la Tierra mostrada en la Ilustración 1-2 varía en un $\pm 1.69\%$ durante el año debido a la ligera excentricidad de la órbita terrestre. La inclinación entre el eje Tierra/Sol con el plano ecuatorial es consecuentemente $23^{\circ}27'$ en el solsticio de verano y de $-23^{\circ}27'$ en el solsticio de invierno, y cero en los equinoccios. Esta inclinación es responsable de las estaciones en la Tierra, y explica también por qué las diferencias estacionales son más marcadas en las latitudes más elevadas. En la línea ecuatorial no se presenta mayor variación, consecuentemente la incidencia de rayos solares es cercanamente constante en comparación con regiones ubicadas en diferentes latitudes, o por ejemplo en las regiones cercanas al hemisferio norte o sur, donde la hora de luz diaria varía en relación a las estaciones del año.

2.2.3. *Radiación solar directa, difusa y global*

Cerca del 25 % de la radiación fuera de la atmósfera es dispersada y absorbida al atravesar esta misma al llegar a la superficie terrestre, es decir en un día cerca de la tarde y despejado parcialmente de nubes llegarían 1000 W/m^2 sin ser significativamente atenuada. La radiación solar presenta tres componentes fundamentales cuando llega a la superficie de la Tierra:

Irradiancia normal directa (DNI): radiación solar recibida en línea recta desde el Sol, sin ninguna interferencia o difusión por parte de la atmósfera. Estos rayos son paralelos entre sí, esta radiación proyecta sombras y puede ser concentrada en espejos.

Radiación horizontal difusa (DHI): consiste de los rayos solares que fueron dispersados en la atmósfera, por aire, nubes o aerosol. Este fenómeno dispersa los haces paralelos en una diversidad de hace viajando en toda dirección, algunos de esos son devueltos hacia el espacio y otros alcanzan la superficie terrestre en diferentes direcciones, o son re dispersados por la atmósfera hacia el observador. Como se nota este fenómeno depende de las condiciones del clima.

Albedo: es parte de la radiación reflejada por el suelo, depende del material donde es reflejada, la nieve refleja una cantidad elevada de radiación, mientras que el asfalto no lo hace en absoluto: este factor debe ser considerado al estudiar el comportamiento de superficies inclinadas. Puede variar desde aproximadamente 0,1 para superficies oscuras, hasta 0,2 en pastizales y más de 0,8 para nieve recién caída.

Radiación horizontal global: luz solar de todo el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal, resultante de la suma de la radiación directa normal y difusa horizontal.

En superficies horizontales la irradiación total puede ser expresada como la componente horizontal de la radiación directa, convertida mediante su ángulo de zenith en el tiempo de interés, más la radiación horizontal difusa.

2.2.4. Propiedades atmosféricas que afectan la irradiación solar

Desde el gran evento que dio vida a nuestro planeta Tierra y a todo el sistema solar, el Big Bang, 4.6 billones de años pasaron para concebir vida como la vemos hoy en día, en ese entonces la atmósfera estaba constituida en su mayoría de hidrógeno y casi o nula presencia de oxígeno, por lo tanto, no se podía desarrollar alguna forma de vida, o por lo menos no como la consideramos hoy en día. Con el enfriamiento de la Tierra complejas reacciones entre la corteza y la atmósfera ocurrieron, dando paso a condiciones donde primeras formas de vida pudieron consolidarse, como microbios unicelulares que requerían pequeñas cantidades de oxígeno para sobrevivir. La acumulación de oxígeno en la atmósfera dio lugar a formas de vida más complejas y multi celulares, como las vemos hoy en día. Hoy en día la atmósfera es una composición de varios gases dentro de los primeros 25 km de la superficie de la Tierra, se puede presenciar en su mayoría nitrógeno y oxígeno, que conjuntamente forman el 99% tanto en masa como en volumen. Las proporciones de dióxido de carbono y de ozono son variables, también como el vapor de agua; estas tres últimas juegan un papel fundamental en los procesos atmosféricos debidos a sus características radiactivas y termodinámicas (Saha, 2008, pp. 9-12).

2.2.4.1. Gases presentes en la atmósfera

Otros componentes encontrados en la composición del aire puro y seco son Argon (Ar), Neon (Ne), Helio (He), Kriptón (Kr), Hidrógeno (H), Xenon (Xe), y Radón (Rn), en menores

proporciones. La presencia de la sustancia H₂O en la atmósfera es de gran importancia debido a su gran variación en estados, ya sean líquido, gaseoso o sólido. Otros componentes en pequeñas y variables cantidades son polvo, humo o gases tóxicos y vapor como dióxido de sulfuro, metano, óxidos y nitrógenos, etc. Estos compuestos son propensos a sufrir variaciones cuando se encuentran a una altura de más de 25 km, debido a la influencia de la radiación ultravioleta del sol. Los gases que más se ven afectados en este ambiente son el oxígeno y el nitrógeno.

2.2.4.2. Formación de nubes

La mayoría de los datos de recurso solar en Estados Unidos son estimaciones a partir de modelos basados en observaciones terrestres y satelitales de nubes, y no mediciones hechas mediante instrumentos radiómetros (Wilcox y Myers, 2008: p.31). Información acerca del tipo, altura, movimiento relativo y área de formación/disipación de las nubes son datos importantes para la predicción solar. Cielos despejados incrementan la incidencia de radiación de tipo DNI, pero también produce complicadas interacciones entre la radiación solar y la composición variable de la atmósfera “limpia”. Las cantidades y tipos de aerosol atmosférico, como también la cantidad total de vapor de agua precipitable, ozono, y otros componentes influyen la cantidad de distribución espectral de irradiancia solar disponible para un colector solar. Bajo condiciones de cielos despejados, la dispersión directa de irradiancia por aerosoles atmosféricos decrece el DNI e incrementa el DHI (Stoffel, 2013, p. 13).

2.2.4.3. Distribución espectral de la radiación solar

Este factor es de alta importancia para la conversión de energía solar, especialmente en el diseño y pruebas de dispositivos fotovoltaicos. Cerca del 97% de la radiación disponible del espectro solar se encuentra dentro del rango de longitudes de onda de 290 nm a 3000 nm. La atmósfera actúa como un filtro óptico variable produciendo diferentes cambios en la distribución espectral de la irradiancia disponible a partir de las cantidades relativas variables de DNI, DHI y GHI. Otras de los fenómenos que influyen la irradiación y sus diferentes tipos en la superficie terrestre son el albedo (reflectividad terrestre), la temperatura ambiente, el viento, la humedad relativa, entre otros. A la vez, estos parámetros dependen de la ubicación geográfica. La estación, la hora del día, y las condiciones climatológicas en ese momento.

2.2.5. Instrumentos y métodos de medida

Los diversos instrumentos de radiación meteorológica pueden ser divididos en diferentes categorías, en dependencia de la variable a medir, el campo de visión, la respuesta espectral, el

uso principal, etc. En la Tabla 1-2 se puede observar un resumen de la clasificación realizada en (World Meteorological Organization, 2018, p. 250), además se puede caracterizar la calidad de los dispositivos en dependencia de los siguientes factores:

- **Resolución:** la mínima variación de radiación que puede ser detectado por el instrumento.
- **Cambio de sensibilidad con el tiempo:** relación entre la señal eléctrica de salida y la irradiancia aplicada.
- **Cambios en la sensibilidad:** ocasionada por cambios en variables ambientales, como temperatura, humedad, presión y viento.
- **La no linealidad de la respuesta:** cambios de sensibilidad debido a variaciones de irradiancia.
- **Desviación de la respuesta espectral:** efecto de la ventana de apertura.
- **Desviación de la respuesta direccional:** efecto coseno y azimuth.
- Constante de tiempo del instrumento o del sistema de medición.
- Incertidumbres de los equipos auxiliares.

2.2.6. Medición Indirecta de irradiancia

Existen diferentes métodos, y más importantes dispositivos y sensores empleados como parte fundamental de los sistemas de medición de radiación solar. Todo sistema de medición inicia con el análisis de accesibilidad a la variable en cuestión, así como también los principios físicos que determinan la adquisición de la misma. Con respecto a la adquisición de la variable se puede obtener tres resultados, variables accesibles de parámetros reales como la temperatura de un horno, variable inaccesible de parámetros reales, como la permitividad dieléctrica y conductividad del cerebro, y por último variables de parámetros irreales como tiempo negativo, lecturas ECG, temperaturas debajo del 0 absoluto, etc. En la práctica (Placko, 2007, p. 47) separa a las mediciones en dos clases, la primera se trata de un método donde se obtiene directamente el valor de la variable medida en lugar de medir otras relacionadas funcionalmente, denominada medición directa; la segunda clase de medición es de tipo indirecta, en esta el valor medido es obtenido a partir de medir otras variables funcionalmente relacionadas.

El corazón de un radiómetro, definido como un dispositivo que mide la energía radiante ya sea del Sol o de cualquier otra fuente, es el sensor, algunas ocasiones conocido como detector. En (Iqbal, 1983) se describe a detalle los instrumentos sensores de radiación, a continuación, se presenta un resumen de los más importantes.

Tabla 1-2: Instrumentos de radiación meteorológica.

Clasificación del instrumento	Parámetro a medir	Uso principal	Ángulo de visión
Pirheliómetro absoluto	Radiación solar directa	Norma primaria	5×10^{-3} (aprox. 2.5° medio ángulo)
Pirheliómetro	Radiación solar directa	Segunda norma para calibración Red	5×10^{-3} a 2.5×10^{-2}
Pirheliómetro espectral	Radiación solar directa en bandas espectrales amplias.	Red	5×10^{-3} a 2.5×10^{-2}
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas	Norma Red	1×10^{-3} to 1×10^{-2} (aprox. 2.3° ángulo completo)
Piranómetro	Radiación solar global Radiación difusa del cielo (solar) Radiación solar reflejada	Norma de trabajo Red	2π
Piranómetro espectral	Radiación solar global en rangos espectrales de banda ancha	Red	2π
Piranómetro neto	Radiación solar global neta	Norma de trabajo Red	4π
Pergeómetro	Radiación de onda larga ascendente (mirando hacia abajo) Radiación de onda larga descendente (mirando hacia arriba)	Red	2π
Pirradiómetro	Radiación total	Norma de trabajo	2π
Pirradiómetro neto	Radiación total neta	Red	4π

Fuente: (World Meteorological Organization, 2018, p. 250).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

2.2.6.1. *Sensores calorimétricos*

Este tipo de instrumento emplea la conversión de energía radiante en calor, para la medición por diferentes medios. La energía radiante incide sobre un metal de alta conductividad con una pintura negra de alta absorbencia. La primera forma de medición indirecta es basada en el cambio de entalpía, debido a que una variación de calor a un sistema de presión constante y a valores constantes de demás parámetros aparece un aumento de entalpía (Callen y Callen, 1985: p.161). De esta manera, un cambio en la entalpía significa un cambio en el flujo incidente de radiación. Otro principio emplea la diferencia de calentamiento eléctrico en instrumentos de tipo cavidad, la irradiancia resulta proporcional a esta diferencia de la cavidad entre la fase blindada y la fase expuesta.

2.2.6.2. *Sensores termo mecánicos*

El flujo radiante se lo caracteriza midiendo la flexión de una banda bimetálica. Se trata de dos tiras metálicas con diferentes propiedades térmicas. Una de ellas está cubierta con una pintura negra altamente absorbente, esta es expuesta a la radiación solar, mientras que la otra cubre a esta primera. Las temperaturas desiguales y coeficientes de dilatación térmicos diferentes inducen una deformación de las placas en una curva, esta deformación es transmitida hacia un indicador ya sea vía óptica o mecánica.

2.2.6.3. *Sensores termoeléctricos*

Este dispositivo está constituido por dos hilos metálicos distintos con sus extremos conectados, cuando se lo expone a ciertos niveles de irradiancia solar, su temperatura se eleva y se exponen a diferentes niveles, esta variación produce una fuerza electromotriz pequeña, la cual puede ser incrementada conectando un número de termocuplas en serie. Un arreglo en donde varias termocuplas son empleadas es conocido como una termopila.

2.2.6.4. *Sensores fotoeléctricos*

Entre los dispositivos fotoeléctricos, instrumentos fotovoltaicos son los más empleados en el campo de la medida de la radiación solar. Un dispositivo FV se constituye principalmente de un elemento semiconductor, usualmente silicio. En consecuencia, de sus características de conductividad, cuando la irradiancia a un nivel de energía capaz de ionizar átomos incide sobre la unión p-n, se genera una corriente eléctrica a partir del movimiento excesivo de electrones y huecos en la constitución del material semiconductor, debido a sus propiedades fisicoquímicas.

La mayor desventaja en los sensores fotoeléctricos tiene que ver con su respuesta espectral, la cual es fuerte solo en las regiones rojas y cercanas a las infrarrojas del espectro solar. Aun así, sus presentan bajo costo y rápidos tiempos de respuesta para mediciones instantáneas.

2.2.7. Medición directa de irradiación

Existen múltiples dispositivos electrónicos como sensores que permiten obtener una respuesta de radiación solar proveniente directamente de la incidencia de los haces de luz solar sobre dicho dispositivo. A continuación, se enlistan los instrumentos disponibles tanto en la literatura como en el mercado para caracterización directa de la irradiancia solar.

2.2.7.1. Heliógrafos

El instrumento más antiguo para caracterizar la irradiación solar, registra la duración de la luz solar, o más precisamente, el periodo de tiempo en el día que la radiación excede un umbral en específico. La radiación solar era concentrada por un lente para quemar un registro de insolación de cada día en un papel que se movía con lentitud. Este instrumento fue empleado por granjeros y horticultores, debido a la importancia de la duración de luz solar para el crecimiento de algunas plantas y para que gallinas pongan más huevos debido a la prolongación de luz artificial. Este método no es empleado en sistemas fotovoltaicos ya que no proporciona información acerca de la intensidad de la radiación (Labouret y Viloz, 2010: p. 33).

2.2.7.2. Pirheliómetro

Este instrumento de tipo seguidor solar, de tipo telescópico con una abertura estrecha llamada apertura, mide directamente la radiación solar orientándose directamente y siguiendo al sol. El Dr. Charles Greeley Abbot del Instituto Smithsonian a partir de principios de este siglo, fue el pionero en la construcción de pirheliómetros, desarrolló tres instrumentos llamados, pirheliómetros de flujo de agua, de agitación de agua y de disco de plata, todos basados en el principio calorimétrico.

Según clasificación de la WMO (World Meteorological Organization, 2018, p. 252-253) los pirheliómetros de acuerdo a su precisión y precisión del equipo auxiliar. Los criterios que se consideran además de los ya mencionados, son la estabilidad al factor de calibración, errores máximos debido a cambios de temperatura, errores debidos a la respuesta espectral del receptor, ángulo de abertura, efecto del equipo auxiliar, entre otras. En orden de jerarquía han sido clasificados en instrumentos

absolutos y de referencia estándar, mientras que los instrumentos secundarios, en pirheliómetros de primera y segunda clase.

2.2.7.3. *Piranómetro*

Encargados de medir la irradiación solar global por radiómetros con campos de vista hemisféricos. Los elementos sensores de estos instrumentos se basan en principios termoeléctricos, termo mecánicos o fotovoltaicos. Existen distintos fabricantes de piranómetros, los Laboratorios Eppley fabrican de dos tipos, los blanco y negro y los de precisión espectral. Los piranómetros blanco y negro basan su funcionamiento en el detector de tipo termopila diferencial de construcción radial con cableado, este radiómetro incorpora un circuito de compensación de temperatura para minimizar el efecto de fluctuaciones en la temperatura ambiental. Por otro lado, el piranómetro de precisión espectral está compuesto de una termopila circular multijunta, su cubierta externa puede sustituirse con filtros de vidrio Schott, que transmiten la radiación dentro de los anchos de banda especificados. Los piranómetros fabricados por Kipp & Zonen, popularmente conocidos como solarímetros, tienen detectores de termopila Moll. Piranómetros de principio termo mecánico son conocidos como accionógrafo o piranógrafo *Robitzsch*, estos son famosos por su simplicidad, portabilidad y robustez.

Los piranómetros basados en celdas FV de silicio, presentan características de respuestas instantáneas, pero su precisión no es alta, aun así, estos pueden proveer señales de salida integrada sin el requerimiento de una fuente de poder externa, y cuestan una fracción del precio de un instrumento basado en termopila. Las imprecisiones en la medición se deben a las características espectrales selectivas de las celdas solares, ya que trabajan con una sensibilidad dentro del rango de 0.4 y 1.1 μm , y la respuesta completa de la celda solar se produce solo en una banda espectral estrecha. Otro problema es la desviación de la celda respecto a la respuesta ideal de la ley de coseno, siendo así, esto se soluciona mediante el uso de un difusor plástico, revestimiento anti reflectante o en el texturizado de la superficie.

2.2.7.4. *Piranómetro con banda de sombra*

La irradiancia difusa puede ser fácilmente calculada a partir de datos obtenidos por piranómetros (GHI) y pirheliómetros (DNI), aun así, debido a que con normalidad el segundo instrumento presenta un costo elevado de adquisición, usualmente se equipan piranómetros con un dispositivo de sombra para excluir la DNI del sol. Este tipo de piranómetros con normalidad son denominados difusógrafos, en el caso de incorporar un disco de sombreado, el instrumento resultante termina siendo caro, por ende, es más habitual instalar una banda de sombra, esta banda es instalada en paralelo al plano ecuatorial y está inclinada a lo vertical en un ángulo igual a la

latitud. Es necesario un ajuste del centro de la banda periódicamente debido a los cambios en la inclinación solar.

Debido a que una porción del sensor del piranómetro es apantallada con la banda de sombra se deben realizar ciertas correcciones sujetas a modelos tanto experimentales como teóricos.

2.2.7.5. *Mediciones satelitales de irradiación*

Las mediciones realizadas en la Tierra son complementadas con el extenso uso de la medición remota mediante imágenes satelitales. Los satélites son capaces de medir radiosidad de una superficie horizontal en bandas específicas. Dentro de la banda de onda corta (o visible), la medida obedece a la luz reflectante de la superficie terrestre y los materiales en la atmósfera. Una estimación de la irradiancia terrestre es obtenida mediante la diferencia entre irradiación extraterrestre ingresante y la irradiación reflejante. Para bandas de onda larga (o infrarrojas) la medida obedece a la radiación emitida por la Tierra y la atmósfera, colectivamente (Brownson, 2014, p. 215-218).

2.2.8. *Energía Solar*

La principal fuente de energía en nuestro planeta Tierra es la radiación solar. La radiación solar asciende sobre los 1.7×10^{17} W; de los cuales el 34 % es reflectada de vuelta por la atmósfera terrestre, el 42 % se convierte en calor directamente, el 23% se almacena en vapor de agua, las ondas de agua del viento consumen alrededor del 1 %, y las plantas consumen 0.023 % (Zekry, Shaker y Salem, 2018: p. 4). Hasta ahora, no se reconoce un camino directo entre la irradiación solar y el consumo humano, esto se debe a que primordialmente no existe alguna máquina de conversión eficiente, la radiación solar tiene una densidad baja, y la potencia solar no es constante, varía diariamente y de estación a estación, y también de lugar a lugar dentro del planeta.

La evolución de la energía solar y conversión fotovoltaica ha sido resumida por Gorjian y Ebadi (2020, p. 18) de datos obtenidos en *History of Solar Cell Development* (Fraas, 2014) en la Ilustración 2-2 se presenta la evolución de la tecnología en celdas solares.

Básicamente si lo vemos desde una perspectiva básica, toda clase de energía parte de la solar en sus orígenes. De entre algunas cabe mencionar el petróleo, el carbón, el gas natural y la madera partieron de procesos fotosintéticos, seguidos de un varias y complejas reacciones químicas, que dieron lugar a la transformación de la energía proveniente de la estrella planetaria centro de nuestro sistema solar, donde la vegetación en descomposición fue sometida a elevadas temperaturas y presiones a lo largo de un extenso periodo de tiempo. Inclusive se puede mencionar que la energía eólica y mareomotriz es producto de la incidencia solar en nuestro planeta Tierra, debido a los cambios de temperatura en diversas zonas geográficas del mundo.

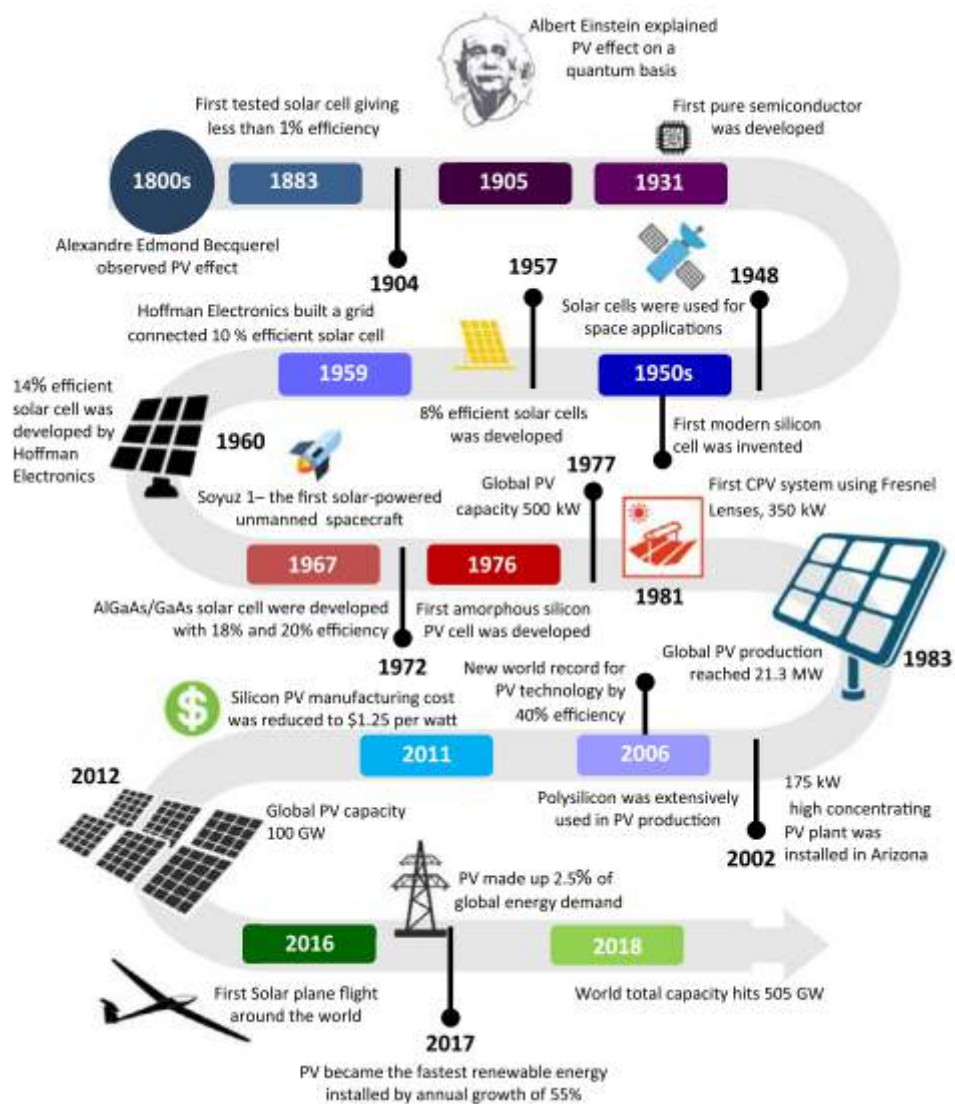


Ilustración 2-2: Los hitos más importantes en el desarrollo de la tecnología fotovoltaica.

Fuente: (Gorjian y Ebadi, 2020, p. 18).

2.2.9. Demanda de energía

La mayor fuente de energía explotada desde su descubrimiento ha sido la de residuos fósiles, ya que resultaba menos costosa y más conveniente que las fuentes de energía alternativas en desarrollo en el siglo pasado, en este entonces no se tomó en consideración la repercusión sobre la contaminación ambiental. A partir del boom de explotación fósil durante el periodo comprendido entre 1950 y 1960 en el medio este y África del Norte, la demanda de petróleo incrementó relacionadas al incremento de las reservas del mismo. A la par, para países consumidores era más económico importar petróleo en comparación a producir de manera autóctona energía a partir de combustibles sólidos.

En 2005 las reservas de petróleo eran iguales a 1200 billones de barriles y las reservas mundiales de gas natural eran de 180 trillones de metros cúbicos, en el 2004. Para esta época se apuntaba que la demanda podría ser satisfecha durante unos 41 y 67 años (Kalogirou, 2009, p. 2). Seis años más tarde la situación no presentaba mayores variaciones, para finales del 2011 las reservas de petróleo crudo incrementaron a 1700 billones de barriles y la perspectiva se seguía manteniendo en una visión para alrededor de 68 años, este valor depende de la fuente y de si se incluyen los recursos no convencionales (International Energy Agency, 2013, p. 36). Para el 2017 el combustible fósil proveía el 85% de las fuentes primarias de energía mundial, 34% petróleo, 28% carbón y 23% de gas natural. Desafortunadamente hoy en día afrontamos una emisión de 21.3 billones de toneladas de dióxido de carbono al año, este gas potencialmente dañino para el medio ambiente se acumula en la atmósfera causando un efecto invernadero, un calentamiento global y un cambio climático con consecuencias realmente amenazantes (Murphy, 2021, p. 110-118).

La demanda de energía per cápita a nivel mundial es proporcional al crecimiento de las poblaciones, y continua su tendencia de crecimiento, entre 2012 – 2013 el consumo mundial de energía creció en un significativo 2.3 %. El crecimiento de la población se nota en cierto grado ralentizado por el desarrollo industrializado del mundo, aun así el aumento de riqueza que relaciona esta “transición demográfica” se relaciona directamente con un mayor consumo de energía per cápita (Sorrell, 2015, pp. 74-75).

2.2.9.1. Nivel mundial

La recesión económica ocasionada por la crisis sanitaria que el mundo vivió a raíz de la pandemia de COVID-19, dejó a un mundo en las peores condiciones económicamente hablando, caso contrario con las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. En la mayoría de los países del G20, 2020 fue un momento de declive en términos del producto interno bruto (PBI), este fue negativo en casi todos los países, excepto China, pero fue el peor crecimiento desde 1976 (+2.3% de crecimiento por año del PBI). 2021 fue un año de crecimiento económico, solo en el caso de Estados Unidos, presentó un crecimiento del 7% excediendo el crecimiento que presentaba en 2019. En materia de energía, en países del G20 durante el 2020 el consumo de energía disminuyó considerablemente, excepto China que ha sido el mayor consumidor de energía décadas atrás. Para el repunte en 2021, Asia lidera el rebote con +0.3 %. China representa el 31 % de emisiones de CO₂ de los países del G20 en el 2019, con un crecimiento del 1.6 % en 2020 a pesar de la crisis de covid-19 (Enerdata, 2021).

En China la demanda de energía creció un 4% interanual en el 2020, liderando la recuperación global. En el primer cuatrimestre del 2021, la demanda con ajuste climático creció un 22.5% interanual, en oposición a la caída del 6% en el primer trimestre de 2020 tras las medidas de cuarentena. En India, la demanda de electricidad creció un 10% en el primer trimestre del 2021,

en comparación al mismo periodo del 2019. En la mayoría de Europa se pudo observar como a comienzos del 2021, debido a las nuevas restricciones para contener el aumento de contagios en el continente, la demanda de electricidad con corrección climática se redujo gradualmente (IEA 2021).

2.2.9.2. *Nivel regional*

A nivel mundial la demanda de electricidad se redujo alrededor de 1 %, presionado no solo por la pandemia de COVID-19 sino también por la influencia climatológica que redujeron el consumo. Un repunte en el consumo impulsado por la temperatura influye en el aumento de la demanda de refrigeración en el hemisferio norte. Las tendencias son muy específicas por región, en el caso de América Central y del Sur, la temperatura ha sido frágilmente más fría, comparada con 2019. Para Brasil se estimó un decaimiento de la demanda eléctrica por el enfriamiento del 10% en 2020 y del 1% en el primer semestre del 2021 (IEA ,2021, p. 11).

La demanda de energía eléctrica en Centroamérica, representa el 26% del consumo energético regional de América Latina y el Caribe (ALC), concentrada en los sectores de transporte, industria y residencia. En esta parte de la región los hidrocarburos son primordial actores de la matriz de consumo, abarcando más de la mitad de esta matriz con un 59% el petróleo y sus derivados, en otras posiciones se encuentra la generación eléctrica, biomasa, carbón mineral y gas natural. Por otro lado, la región andina, comprendida por países como Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela; aportan con un consumo igual al 16% de toda la región (OLADE, 2021, p. 5).

Es importante mencionar la falta de legislación política alrededor de la generación eléctrica renovable que persigue a países de América Latina, siendo no el caso de Paraguay y Argentina. Mientras que Paraguay refuerza políticas direccionadas a la diversificación de una mezcla energética, trabajando en desarrollo de regulaciones que aseguren el correcto funcionamiento del mercado energético; Argentina promueve políticas que aumentan la capacidad de producción de energía renovable. Bolivia prevé construir 20000 sistemas solares domésticos, con el fin de mitigar problemas de electrificación rural. Perú y Chile promulgan políticas de electrificación rural reconociendo el alto impacto de la energía renovable (Smith y Taylor 2008, p. 114-118).

2.2.9.3. *Nivel local*

En el Ecuador, durante el 2018 el país demandó un consumo total de energía de 24 062 GWh, mientras que la demanda de consumo de potencia máxima resultó ser de 3 933 MW, se esperó que, mediante seguimiento de la previsión de la demanda anual, para el 2020 se tenga un crecimiento promedio del 15.4%, esto sin considerar los catastróficos eventos globales. Adicionalmente, se reportó mediante resultados de la expansión de la generación eléctrica 2018

– 2027 que la potencia efectiva incorporada al Sistema Nacional Interconectado (SNI), mediante el tipo de central hidráulica fue de 5035.14 MW, representando el 62.45 % del total generado, centrales de tipo térmica incorporaron el 22.81 %, biomasa con el 1.69 %, solar con el 0.29 %, entre otras, que suman un 87.53% del total incorporado por el sistema nacional (MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES, 2019).

Mientras que, durante el primer semestre del 2021, la demanda eléctrica aumentó en un 8.13 %, en comparación al período anterior, reportando un consumo de 15 086 GWh, alzando solo en este primer semestre más de la mitad del total anual reportado en el 2018 (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

2.2.10. Estado del clima en 2022

El escenario en nuestros tiempos actuales es bastante preocupante, de tras de una trayectoria de excesos en la explotación de recursos naturales no renovables y uso de combustibles fósiles que empeoran la situación con respecto al efecto invernadero, debemos encontrar alguna esperanza para la raza humana en estos tiempos, la clave está en tomar acciones y acogernos a políticas internacionales de emergencia climática. No puede existir en estas épocas actuales alguna duda acerca de la situación actual del calentamiento global, o si se aborda de manera acierto o incierta, esto consecuentemente podría conducir a vivir en una época donde la temperatura de la atmósfera tal vez ya no pueda concebir vidas humanas debido a las condiciones.

El activismo en parte fundamental de promover y reclamar acciones a favor del mejoramiento de las condiciones actuales de vida y costumbres que nos están llevando a la extinción. Foster (2022, p. 3) al hablar sobre esperanza dentro de esta situación de crisis climáticas cita a Greta Thunberg en uno de sus discursos, cuando al tratar con este término ella exige primero pánico y luego acciones, en denuncia hacia la “esperanza” que se profesa en el Foro Económico Mundial. Aun así, todo activista por el medio ambiente parte de una esperanza realmente sólida día a día, aprovechando la energía que esta esperanza nos brinda, con el objetivo de llegar a un mundo totalmente habitable de formas sostenible.

2.2.11. Fuente de energía solar fotovoltaica

El primer uso de una celda FV para producción eléctrica, data de entre 1950 y fue empleado en la generación eléctrica de energía como fuente de potencia para un satélite orbitando la Tierra. Mejoras en el desarrollo de la tecnología ayudó a mitigar los altos costos que representaba la producción de esta tecnología, 20 años más tarde. Para después de la crisis energética de 1970, sistemas de potencia FV fueron ampliamente incorporados con aplicaciones emergentes de conexión a la red en todo el mundo, y así la fuente solar fue vista como una fuente energética

viable. En los inicios del siglo 21, los mercados más importantes para la energía solar fueron las comunicaciones industriales, usos recreacionales, sistemas de casas solares, bombeo de agua, entre otros.

La potencia solar es aprovechada directamente del Sol, mediante tres métodos. El primero tiene que ver con sistemas térmicos en edificios, capturando la energía del sol en dos maneras, una activa y una pasiva. Para la calefacción solar pasiva, es importante la colocación de ventanas donde se capture el calor y transmita la luz del día, capturando el mayor potencial solar. En la calefacción activa es vital contar con colectores de energía solar, en los cuales se transmite la energía térmica a través de un medio líquido. Este tipo es generalmente empleado en el uso de calentadores de agua y para calentamiento/enfriamiento espacial (Tester et al. 2005, p. 557-559).

El segundo método es a través de la conversión fotovoltaica mediante semiconductores de estado sólido, produciendo energía eléctrica directamente para uso en diferentes aplicaciones. FV no requiere de partes móviles o algún tipo de fluido, son constituidos principalmente de Silicio o de una fina película hecha de otros materiales semiconductores. Estos sistemas pueden funcionar, autónomos, montados en los techos o incluso desarrollado como tejas y parte de la construcción de casas. El tercer método es una tecnología llamada sistema de energía solar centralizado (CSP), el cual concentra la incidencia solar para generar vapor utilizable en turbogeneradores. Existen de tres tipos, colectores parabólicos, torres colectoras y discos parabólicos o sistemas de motor de disco. Todas estas tecnologías, son empleadas para calentar o enfriar aire o agua y para generar electricidad (Smith y Taylor, 2008, p. 12-14).

Además de las mencionadas, las cuales ya se emplean al rededor del mundo y están listas para la penetración en el mercado, se encuentran otras tecnologías en desarrollo basadas en energía solar. LSP o sistemas de energía solar lunar, se trata de obtener energía solar en la luna y transmitirla mediante micro ondas al planeta Tierra. Lo mismo ocurre con sistemas montados en satélites orbitando el planeta, las microondas transmitidas podrán ser convertidas en energía una vez aterrizadas en la superficie terrestre (Criswell, 2002, p. 24-26).

2.2.12. Conversión fotovoltaica

Las celdas solares fotovoltaicas son dispositivos que absorben radiación solar (fotones) e internamente convierten esta energía incidente en electricidad de corriente directa (CD), sin generar ruido sonoro externo o contaminación química durante el proceso, tampoco requieren de partes móviles o de procesos químicos internos; todo este proceso resulta en una manera sencilla, hermosa y elegante de efectuar la conversión energética. Aun así, debido a su alto costo de recolección, conversión y almacenamiento que limita su explotación, las celdas FV al día de hoy presentan una eficiencia energética entre 15 – 20 % , obligadas a ser unidas entre sí para formar grandes colectores de energía eléctrica, enormes cantidades de potencia eléctrica puede ser

generado, como es el caso del mayor parque FV del mundo, el de Olmedilla de Alarcón, produciendo 60 MW de electricidad (Curley 2012, p. 4-8).

Este proceso tiene un elemento fundamental, el cual persigue mediante sus características físicas y atómicas, la conducción de electrones mediante radiación incidente de energía, estos elementos son conocidos como dispositivos semiconductores, entre el más empleado encontramos en el Si. La conversión FV consta de dos etapas, una cuando la radiación es captada por la celda solar y en consecuencia de esta absorción de luz se produce un par hueco-electrón. En la segunda etapa, consiste en direccionar los electrones al terminal negativo y los huecos al terminal positivo, debido a las características del dispositivo, generando así un flujo de corriente y por consecuencia energía eléctrica.

2.2.12.1. Efecto fotovoltaico

En términos generales el efecto fotovoltaico ocurre cuando la luz es convertida en electricidad. Fue experimentado por primera vez por Henri Becquerel en 1839, cuando sumergió una lámina de platino recubierta de una capa fina de cloruro de plata en una solución electrolítica, para después exponerse a la luz solar estando conectada a un contraelectrodo (Gorjian y Ebadi, 2020, p. 16). El efecto fotovoltaico ocurre cuando dos materiales disímiles en contacto cercano producen un voltaje eléctrico cuando son alcanzados por la luz u cualquier otra energía radiante. Por lo tanto, cuando la luz incide sobre el cristal ya sea este silicio o germanio, en los cuales con normalidad los electrones no están libres para desplazarse de átomo en átomo dentro del cristal, esta proporciona la energía necesaria para liberar algunos electrones de su condición de enlace. Los electrones libres cruzan la unión entre dos cristales disímiles más fácilmente en una dirección que en otra, dándole a una parte de la unión una carga negativa, consecuentemente un voltaje negativo con respecto al otro, al igual que en una batería posee un electrodo negativo con respecto al otro que es positivo. En ausencia de materiales que formen una unión p-n entre sí, no existe la condición para que los electrones libres excitados se desplacen en una dirección determinada; por ende, acaban volviendo al estado de “reposo”. El caso contrario ocurre cuando se ponen en contacto dos materiales diferentes, se genera un campo eléctrico a lo largo del contacto, que propicia el intercambio de electrones-huecos, forzando a la vez a los electrones libres excitados hacia una carga eléctrica externa donde su exceso de energía puede ser disipado. En resumen, el efecto fotovoltaico produce una corriente directa que fluye en un solo sentido (Curley 2012, p. 5-7). La física dentro de este proceso se resume, si la iluminación recibida en el semiconductor es igual o mayor a la diferencia en la energía entre la banda de valencia y la banda de conducción, conocida como la brecha energética (E_g), la luz absorbida es capaz de promover un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción y en el proceso dejando un hueco en la banda de valencia. Empleando materiales adecuados, estos portadores de carga (electrones y huecos) pueden ser

separados y extraídos a un circuito externo. En una típica celda FV, un semiconductor de tipo n (buen material para transporte de electrones) se pone en contacto de un material de tipo p (bueno para el transporte de huecos). La formación de una unión p-n crea un camino energético favorable para que los electrones y huecos generados en ambos semiconductores fluya en direcciones contrarias (Fraga et al. 2021, p. 4-5).

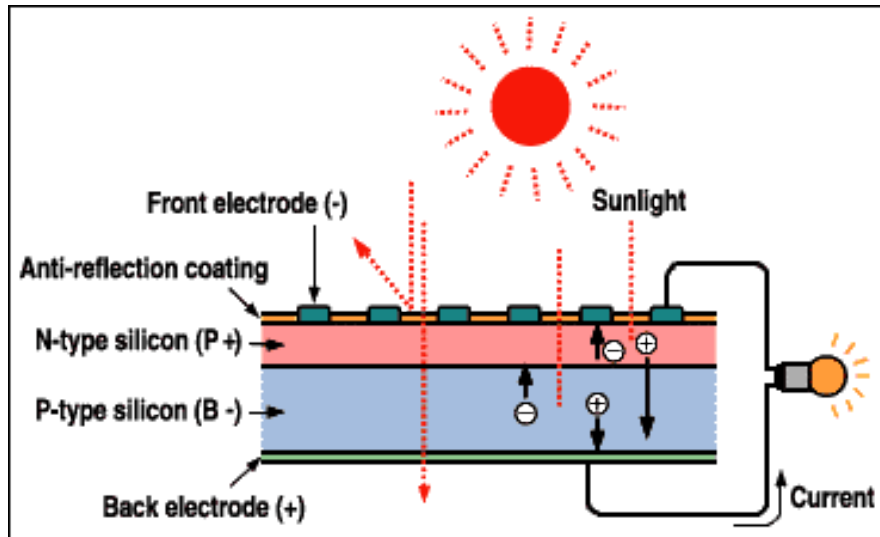


Ilustración 3-2: Efecto fotovoltaico en celdas solares.

Fuente: (Chemistry, 2019).

La eficiencia límite de una celda solar que emplea un único material semiconductor o una única p-n, es del 33%, este valor es conocido como el límite de *Shockley-Queisser*, y la brecha energética ideal para semiconductores empleados para efecto FV, rondan entre los 1.1 y 1.4 eV. Las celdas de silicio con normalidad están cerca de una eficiencia del 33%, pero debido a que emplean películas gruesas (500 – 200 μm), su fabricación es compleja y costosa. Existen otras alternativas como la celda solar de perovskita, alcanzando eficiencias sobre el 25% o celdas solares orgánicas o de puntos cuánticos sobre el 15%; lo importante de estas celdas FV es que reducen costos debido a su abundancia en materia y bajo costo de fabricación, además de poseer características de película fina (500 – 200 nm), resultando en algunos casos con celdas casi transparentes y flexibles (Fraga et al. 2021, p. 6).

2.2.13. Tecnologías de celdas solares

La investigación en el área de celdas fotovoltaicas ha abierto la posibilidad de construir celdas solares con mejores características como flexibilidad, forma personalizable y transparencia. Debido a que las celdas comerciales son de un vidrio pesado y un marco de metal, las nuevas tecnologías permiten que los paneles y arreglos fotovoltaicos sean más ligeros, reduzcan costos

de desarrollo y de transporte. Varias son las características que sean explorado como rango solar, costo, protección, durabilidad y eficiencia; para así reducir los esfuerzos de investigación en cuatro tipos de generaciones de celdas FV. Distintas celdas solares pueden empleados según el uso que se les vaya a dar, en resumen, estas cuatro generaciones son celdas cristalinas, de capa fina, pigmentadas y de perovskita. Las tecnologías con más importantes en el campo de la producción de celdas FV, se describen con más detalle en “Tecnologías de células solares” (Richhariya et al., 2020: pp. 28-47). En la Ilustración 4-2 se resumen las principales tecnologías que se describen a continuación en el capítulo.

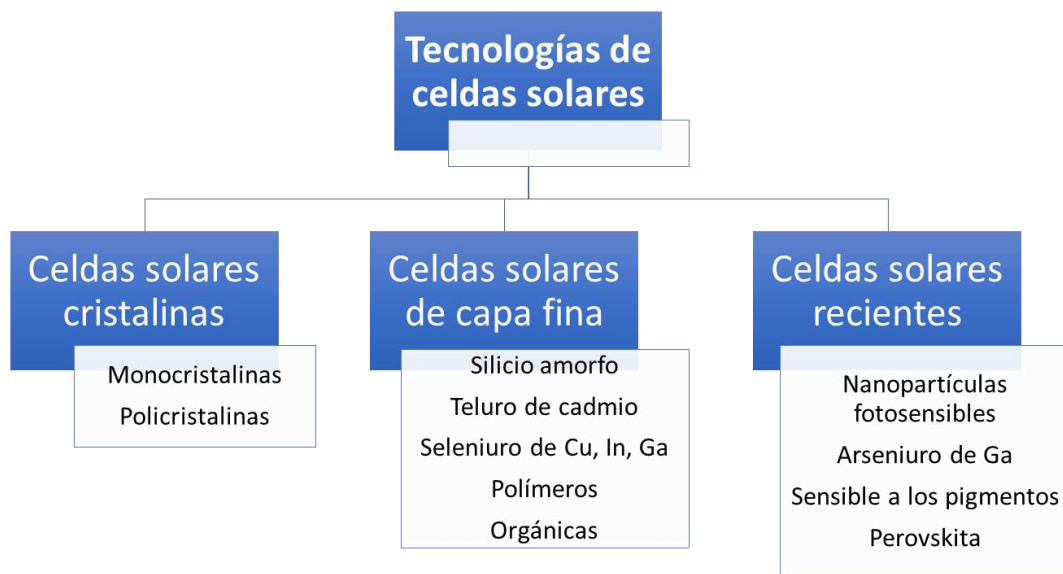


Ilustración 4-2: Tecnologías de celdas solares.

Fuente: (Richhariya, Kumar, y Samsher, 2020: p. 30).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En Estados Unidos, los Laboratorios Nacionales de Energía Renovable (2020), presentan un gráfico (Ilustración 5-2) que relaciona la eficiencia de conversión más alta de distintas tecnologías de células FV de investigación, trazadas desde 1976 hasta el presente.

2.2.13.1. Celdas Solares Cristalinas de Silicio

Las celdas solares de unión simple conformadas de láminas de Si, junto con el Si monocristalino y policristalino encabezan el desarrollo de las tecnologías de conversión FV, como la primera generación de este tipo de tecnologías. Principalmente este tipo de celdas solares, en especial las monocristalinas de Si presentan características de alta eficiencia y de simple accesibilidad, en contraposición a sus elevados costos de materias; un primer sustituto de estas son las policristalinas cuales son más económicas, tanto para el productor como para el consumidor.

Best Research-Cell Efficiencies

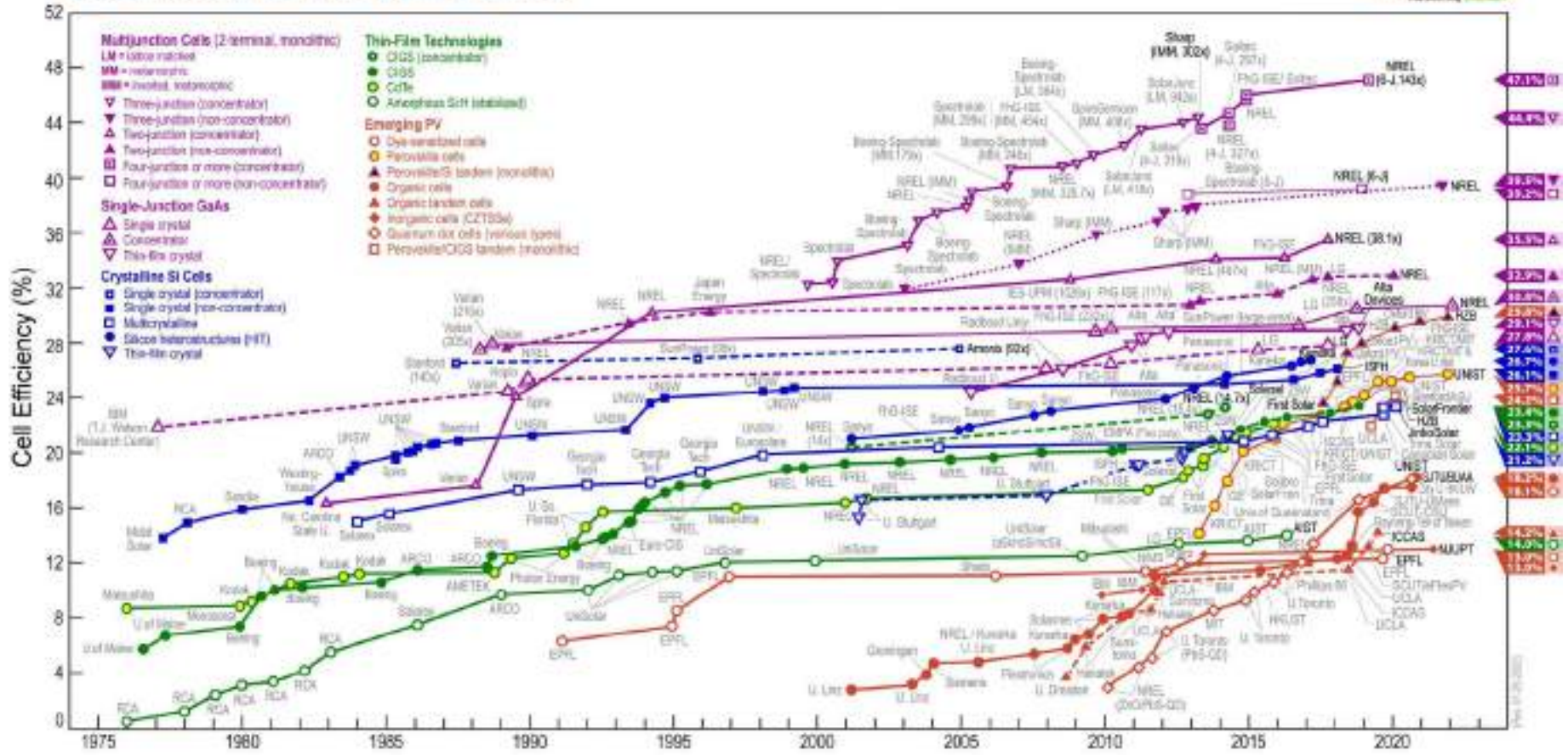


Ilustración 5-2: Mejores investigaciones en eficiencia de celdas solares hasta el 2020.

Fuente: (Laboratory NRE, 2020).

- **Celdas monocristalinas de Silicio (Mo-Si)**

Las características principales de las celdas FV de tipo Mono-Si, son su durabilidad, confiabilidad y longevidad. Debido a que fue la primera tecnología de celdas desarrollada, al día de hoy se conocen toda su tecnología, instalación y rendimiento. Muchas de las celdas producidas y puestas en funcionamiento en 1970 continúan generando electricidad al día de hoy. El primer método de fabricación fue el de *Czochralski* (Cz), consiste en la fabricación de un lingote de Si dentro de una cuba fundida, para luego cortarse en varios lingotes que forman el sustrato de la célula solar. Su principal desventaja es el costo que representa este proceso y presenta deficiencias a medida que la temperatura desciende hasta aprox. 25° C.

El método más común para la fabricación de lingotes monocristalinos según Mercado y Delli Veneri (2020, pp. 36-37) es el proceso de *Czochralski*, el cual consiste en tirar lentamente hacia arriba, mientras se gira simultáneamente, una semilla orientada de silicio fundido contenida en un crisol de cuarzo puro. Por otro lado, el método FZ-Si es una alternativa de gran pureza y más cara, en la cual se hace pasar una zona fundida a lo largo de una varilla policristalina de gran pureza, calentada por una corriente de superficie inducida por un campo magnético, produciendo un monocristal purificado.

- **Celdas policristalinas de Silicio (Poly-Si)**

Representan el principal sustituto de las celdas mono-Si, debido a su menor costo, pero rinden con una menor eficiencia, debido principalmente a sus estructuras no uniformes. Tienen una serie de lingotes extraídos de un crisol en lugar de un único lingote grande. El silicio policristalino es una forma de poli-Si de alta pureza, empleada por la industria FV como materia prima. El proceso de purificación química que se emplea es el conocido como Siemens que fabrica poli-Si a partir de Silicio de grado metalúrgico. Este proceso involucra el destilamiento de compuestos volátiles de silicio a altas temperaturas para su descomposición en silicio. Es usual encontrar terminología como poli-Si o multi-Si, este último se refiere a cristales de un largo mayor a 1 nm, pero en general son sinónimos.

Celdas solares FV multi-Si son las más comunes en el mercado de rápido crecimiento y consumen la mayor cantidad de poli-Si producido en el mundo.

2.2.14. Operación de la celda solar y parámetros de rendimiento

Cuando la celda solar se encuentra en operación, varias son las características eléctricas que deben ser analizadas para en combinación de estos factores poder hablar de eficiencia en la conversión energética (PCE), las principales características tienen que ver con voltaje, corriente eléctrica e

iluminación, dentro de estos factores se puede analizar características que inciden en el rendimiento de la celda en términos de la curva de densidad de corriente y voltaje, considerando el fotovoltaje, la fotocorriente, y el factor de llenado (FF).

2.2.14.1. Características de Corriente-Voltaje

La unión p-n básica empleada para producir un efecto fotovoltaico en un elemento semiconductor, es vital para la conversión fotovoltaica. Cuando la luz solar incide sobre la celda solar, provoca una gran corriente de deriva ocasionada por los electrones y huecos minoritarios por lo tanto se genera una fotocorriente (corriente generada por la luz) I_L . El voltaje fotogenerado reduce la barrera de energía potencial en la unión, y ocasiona una corriente difusa en el sentido contrario de la corriente fotogenerada. Debido a que la magnitud de la corriente I_L es mayor que la corriente de difusión con polarización directa, la corriente neta fluye del lado n hacia el lado p del semiconductor. Por lo tanto, cuando la luz incide en la celda, el flujo de corriente es contrario en dirección al voltaje generado, entonces hay un desplazamiento hacia abajo en la curva I-V (Fraga et al., 2021: pp. 148-149).

Para comprender a la celda solar bajo condiciones de iluminación, en primer lugar, se debe recurrir al estudio de la misma bajo condiciones de oscuridad, que resulta ser un diodo p-n, cuyas características limitan las características bajo iluminación. En términos generales, una celda solar iluminada, se representa como la suma de una celda solar en cortocircuito bajo luz con un diodo p-n polarizado en la oscuridad.

- **Características I-V ideales en condición oscura del diodo p-n**

Al estudiar teoría de semiconductores se sabe que para polarizar directamente un diodo se debe conectar una fuente de voltaje V_a a través del diodo con el polo positivo de la fuente conectada al ánodo, situado en el lado p de la unión, y el polo negativo en el cátodo, situado en la unión n. Una vez polarizado el diodo de forma directa, la región de carga espacial se contrae y el potencial de separación disminuye. En consecuencia, los huecos se inyectarán desde el lado p hacia el lado n y los electrones se inyectarán desde el lado n hacia el p. La tasa de inyección de huecos a través de la región de campo da como consecuencia una corriente I_{pi} , mientras que la de electrones da una corriente I_{ni} , por lo tanto, la suma de ambas corrientes es la corriente total en el diodo. Debido a que las cargas inyectadas decaen exponencialmente con la distancia medida desde los bordes de la región de campo, la inyección de huecos y electrones dependen de la concentración de portadores minoritarios en el lado n sin polarización y de la concentración minoritaria de electrones en el lado p; además el voltaje provocado se relaciona con la los huecos y electrones

inyectados por la ley de uniones, la corriente generada al polarizar directamente el diodo es como indica la Ecuación 1-2.

$$I = qA \left(\frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} \right) (e^{V_a/V_T} - 1)$$

Ecuación 1-2: Corriente a través del diodo p-n.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 18).

Esta puede ser expresada en términos de la corriente de saturación en inversa, la cual es la corriente que fluye en el diodo ideal con una polarización inversa superior a $3V_T$, como

$$I = I_s (e^{V_a/V_T} - 1)$$

Ecuación 2-2: Corriente a través del diodo en términos de la corriente de saturación en inversa.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 18).

En la celda solar, se fuerza una polarización directa lo que ocasiona una pérdida de energía, ocasionada por la corriente que fluye a través. Esta corriente de pérdida puede ser minimizada manejando los valores de concentraciones de dopado o las longitudes de difusión de los materiales semiconductores.

- **Efecto fotovoltaico en una celda solar p-n**

Una vez que la luz es irradiada sobre una celda solar, se produce una fuerza electromotriz, esto es debido a la incidencia de fotones penetrando a diferentes profundidades donde serán absorbidos y generados pares de electrones-huecos. Los pares e-h dentro de la región de campo serán separadas por esta misma, dando lugar al movimiento de portadores de carga y consecuentemente una corriente eléctrica. Una vez los pares e-h difusos en la región neutral llegan a la región de campo, siguen el mismo camino de los generados en esta región. Estos incrementan las cargas acumuladas en los bordes de la región de campo incrementando el voltaje de la celda y conduciendo más corriente en la carga circuital externa, convirtiéndose en una fuente eléctrica de corriente continua.

Las características de una celda solar iluminada, como se mencionó, es una superposición de las características de la celda solar en condiciones oscuras y la celda iluminada en cortocircuito. Con el fin de determinar la corriente de cortocircuito causada por la incidencia de radiación solar, se debe suponer una tasa de foto generación en un punto arbitrario x dentro de los bordes de la región de campo g_{ph} y un tiempo de vida de los portadores minoritarios τ_n , tras varias definiciones desarrolladas por Zekry et al. (2018, p. 21-24) se llega a la expresión

$$I_{sc} = I_{ph} = qAg_{ph}(L_n + L_p + W_{scr}) = qAg_{ph}W_{eff}$$

Ecuación 3-2: Corriente de SC, donde W_{eff} es el grosor efectivo de la celda.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 22).

La corriente de cortocircuito es la máxima corriente generada en un instante de tiempo por la celda solar cuando sus terminales tanto en el lado p, como en el n se cortocircuitan entre sí, dando como resultado un voltaje de 0 V, cuando esta condición se cumple se tiene como resultado la Ecuación 3-2. Para obtener la tasa de generación FV global sobre todo el espectro, se considera ciertas condiciones y se integra desde $E_{ph} = E_g$ hasta ∞ .

Por lo tanto, superponiendo ambas condiciones se obtiene el caso de una celda solar polarizada e iluminada y se puede obtener la corriente total, en cualquier voltaje de la celda solar como:

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s(e^{V_j/nV_T} - 1)$$

Ecuación 4-2: Corriente de la celda FV en condiciones ideales.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 22).

A estas alturas se deben incorporar las pérdidas debido a las condiciones no ideales. Existe una pérdida asociada a la corriente de fuga a través de un camino resistivo que está en paralelo con el dispositivo semiconductor. Esta pérdida se modela con una resistencia en paralelo R_{sh} , su efecto es mucho menos visible comparado con la resistencia en serie. Dando lugar a la expresión:

$$I = I_{ph} - I_s(e^{(V+IR_s)/nV_T} - 1) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Ecuación 5-2: Corriente de la celda FV en condiciones reales SDM.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 26).

Esta última ecuación puede ser presentada mediante un circuito de la Ilustración 6-2, el cual es recomendado para el cálculo de las características de una celda solar bajo cualquier condición operacional.

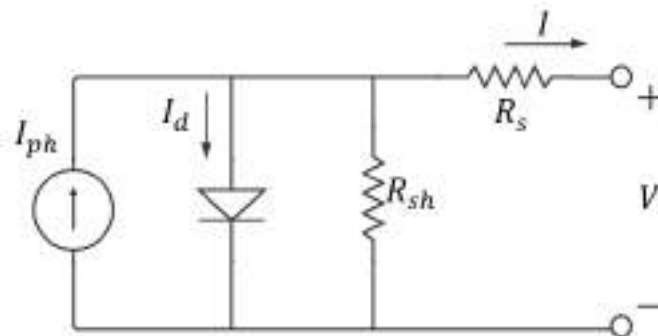


Ilustración 6-2: Circuito equivalente de una celda solar.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

La ecuación que representa el circuito equivalente de la Ilustración 6-2, representa gráficamente la respuesta de corriente – voltaje y potencia en la Ilustración 7-2. En esta se puede observar las características de I-V-P, en donde $I_{ph} = I_{sc}$ como se describió con anterioridad, y V_{oc} es el voltaje de circuito abierto de la celda. Puede ser obtenido haciendo la corriente 0 y haciendo que $R_s = 0$ mientras que $R_{sh} = \infty$.

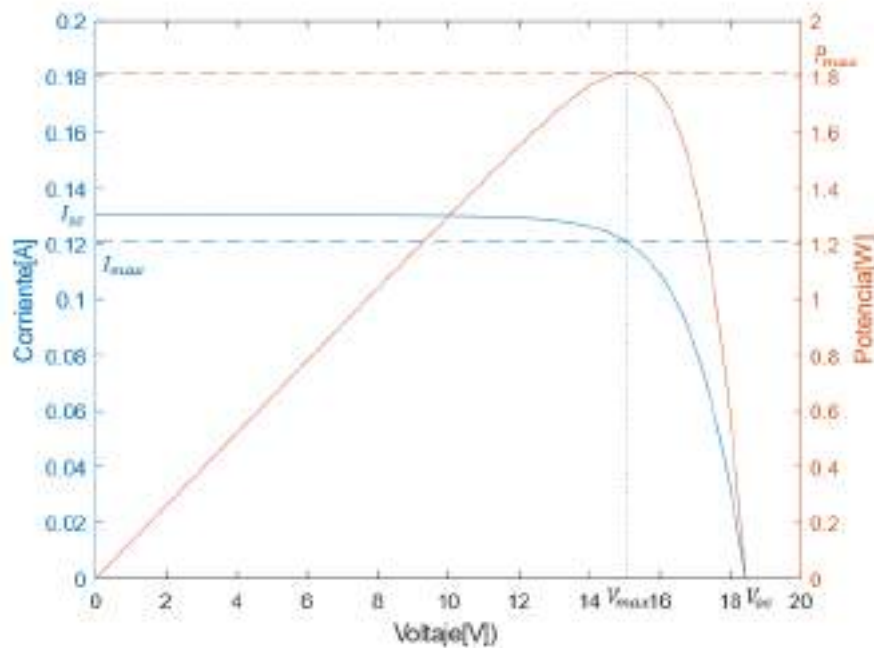


Ilustración 7-2: Características I-P-V de la celda solar y MPP.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El voltaje de circuito abierto de una fuente eléctrica es su fuerza electromotriz conductora. Debe ser lo más alta posible.

$$V_{oc} = nV_T \ln \frac{I_{ph}}{I_s}$$

Ecuación 6-2: Voltaje de circuito abierto en la celda solar.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 26).

Este voltaje es el máximo voltaje generado a través de los terminales de una celda solar, cuando son mantenidos abiertos, eso es cuando la corriente es 0. En la anterior ecuación se denota que el V_{oc} es totalmente dependiente de la corriente fotogenerada y de la corriente de saturación en reversa. Para mayores valores del voltaje en circuito abierto, I_0 debería ser menor. El valor más bajo de la corriente de saturación es obtenido cuando la tasa de recombinación es igual a la tasa de recombinación térmica (Fraga et al., 2021: p. 150).

- **Eficiencia en la conversión energética de una celda solar**

La eficiencia de una celda solar se la determina en términos de tanto la potencia de salida máxima, como la de entrada. La de salida definida por los valores de corriente y voltaje en el punto máximo de potencia.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max}I_{max}}{P_{in}}$$

Ecuación 7-2: Eficiencia máxima de la celda solar.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 27).

Donde la potencia de entrada se define como la potencia solar incidente en la celda o panel solar, para $AM1 = 1000 W/m^2$. Otro factor importante en la descripción de rendimiento de la celda solar, es el factor de llenado (FF) obtenido de la curva I-V como:

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

Ecuación 8-2: Factor de llenado de la celda solar, en sus características I-V.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 27).

Este valor mide la cuadratura de la curva I-V, tanto como este factor incremente la eficiencia de la celda solar también incrementa. Este valor es del 100 % para el caso ideal. Matemáticamente es la relación entre la potencia máxima que se puede extraer de la celda y la potencia ideal.

Como la celda solar está sujeta a cambios y variaciones de la temperatura del medio ambiente, las variaciones de esta representan variaciones en las características y rendimiento de la celda solar. En la Ilustración 8-2 se puede observar que factores altera una variación en la temperatura ambiental.

La dependencia directa de la temperatura con la corriente de cortocircuito es debido al aumento de la absorción de fotones. El voltaje de circuito abierto disminuye debido al aumento exponencial de la corriente de saturación en inversa, mientras que el aumento de la corriente de cortocircuito es leve, la disminución de V_{oc} es apreciable.

La eficiencia fue limitada en 1960 por Shockley y Queisser después de varias pruebas y desarrollos, se fijó un límite alcanzable de 33.7 % , aunque para casos prácticos la eficiencia es aún menor debido a las imperfecciones en los materiales semiconductores y resistencias parásitas.

Otra de las características FV es la eficiencia cuántica (QE), la cual es la relación entre el número de portadores recogidos por la celda solar con el número de fotones incidentes. Se trata de la función de la longitud de onda o de la energía. La curva QE es idealmente cuadrada, pero prácticamente difiere debido a efectos de recombinaciones (Fraga et al., 2021: p. 151).

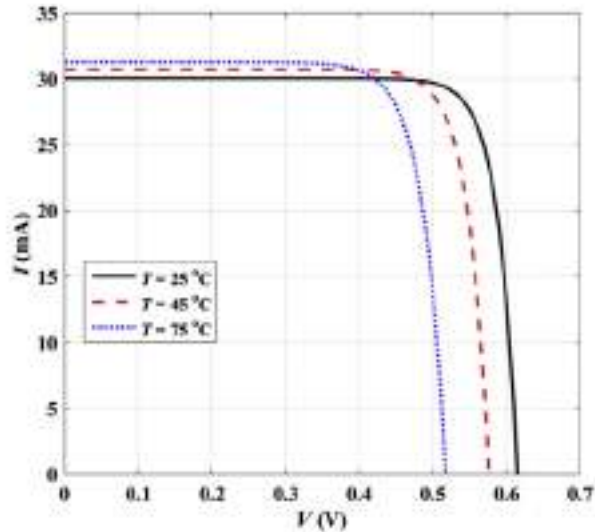


Ilustración 8-2: Resultados de variaciones de temperatura sobre las características de la celda solar.

Fuente: (Zekry et al., 2018: p. 29).

2.2.15. *Sistemas fotovoltaicos de conversión de paneles solares*

Los sistemas FV son usualmente flexibles, pueden encontrarse sistemas dentro de un rango extenso de potencia pico, desde los 0.3 Wp para alimentar una linterna, hasta potencias más elevadas con el fin de alimentar estadios de fútbol, pueblos o inclusive ciudades. Pueden alimentar casi cualquier dispositivo que requiere de una conexión a voltaje tanto continuo como alterno, a través del desarrollo de los sistemas necesarios, ya sea un sistema autónomo o de una aplicación en específico. Las ventajas y desventajas de utilizar tecnologías FV se resumen en la Tabla 2-2.

2.2.15.1. *Sistemas conectados a la red (on-grid)*

En sistemas conectados a la red, con normalidad los elementos indispensables son los inversores, empleados en la transformación de un voltaje DC generado por los módulos/arreglos FV en voltaje alterno utilizado para alimentar cargas de estas características o incluso para alimentar la red eléctrica con el exceso producido. Estos sistemas se pueden clasificar en dos secciones, una donde la energía eléctrica es almacenada y otra en la que no.

En sistemas donde no se emplean baterías, para el almacenamiento de energía, el uso de inversores es elemental y sistemas de montaje de módulos con cables, medidores de red y demás componentes. Estos sistemas se conectan directamente a la red mediante el bus LT (400/415 V, monofásico o trifásico).

Por otro lado, los sistemas que emplean baterías para almacenar la energía CD producida, se compone principalmente de un módulo PV, un inversor híbrido, baterías y el módulo de montaje

con todos sus componentes. El uso de inversores híbridos se debe a la cualidad de poder conectar voltaje AC directamente a la red eléctrica mientras que con el exceso de energía cargar bancos de baterías.

Tabla 2-2: Ventajas y desventajas de los sistemas de generación a partir de energía solar.

Ventajas de la energía solar eléctrica	Desventajas de la energía solar eléctrica
No consumen combustibles, convierten libremente la luz solar disponible en electricidad.	Suelen tener costos iniciales elevados en comparación a otras soluciones.
Producción de electricidad sin emisión de gases o contaminación.	Sistemas off-grid requieren de baterías, sujetas a mantenimiento y reemplazo.
Aplicaciones de alrededor 3 – 5kW/h son efectivas costosamente.	Grandes sistemas FV autónomos deben ser apoyados de generados a pase de combustible fósil o generadores eólicos debido a picos de potencia o días nublados.
Son seguros cuando instalados correctamente. El riesgo de shock eléctrico o de incendio es menor.	No son económicos para aplicaciones como cocina, calentamiento de agua o planchar ropa.

Fuente: (Hankins 2010, p. 23).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

2.2.15.2. *Sistemas fotovoltaicos autónomos*

Los sistemas FV desconectados de la red o autónomos, son empleados principales en áreas donde no es fácil el acceso a la red eléctrica, o el suministro es escaso como en lugares remotos o islas. El sistema lo constituye el generador eléctrico, módulo solar, y el sistema de almacenamiento de energía, baterías, con el fin de asegurar el suministro continuo de electricidad en las noches o en días nublados. Los usos más comunes son en sistemas de energía FV para suministrar electricidad a bombas de agua, potencia en hogares residencia, sistemas de protección catódico y telecomunicaciones.

El sistema autónomo provee de suministro eléctrico directamente al consumidor o lo almacena mediante baterías recargables. Estos sistemas tienen la facilidad de ser ensamblados temporalmente o permanentemente en relación al tiempo de utilidad, y en reemplazo de los combustibles fósiles en muchas aplicaciones. Una de las mayores ventajas de este tipo de sistema es su rango de alimentación desde los microvatios hasta megavatios, como en relojes, calculadoras, ventiladores, bombas de agua, telecomunicaciones, satélites, vehículos espaciales y centrales eléctricas en escala de los megavatios (Qazi, 2017).

Estos sistemas pueden ser clasificados dentro de dos ramas:

- **Sistemas FV directos**

Un sistema FV de acoplamiento directo consiste de dos componentes principales un elemento productor de electricidad, módulo FV y una carga de corriente continua, adicionalmente componentes como interruptores de desconexión flotante y protecciones para sobre corrientes. Una de las principales desventajas es su uso limitado solo en horas de claridad solar. La parte crítica en el diseño de un sistema de buen rendimiento acoplado directamente a la carga, es hacer coincidir la impedancia de la carga eléctrica con la potencia máxima del conjunto FV. En algunos casos se incluyen circuitos seguidores del punto de máxima potencia o controladores de carga.

- **Sistemas FV con almacenamiento de batería**

Estos sistemas son empleados para aplicaciones donde se requiere el uso del sistema continuo, durante la noche o asegurar su disponibilidad durante días nublados. El uso de bancos de baterías es esencial debido a que la demanda de la carga no siempre coincide con la capacidad del panel FV. Las tareas que cumplen en los sistemas FV autónomos son las de almacenar electricidad en excesos de potencia generada y suministrarla cuando sea necesario, proveer corrientes de choque a motores eléctricos cuando necesario, proveer corriente y voltaje estables eliminando transitorios.

Cuando se añaden baterías al sistema es necesario incorporar un medio para evitar la sobrecarga de las baterías. La manera más simple de cumplir esta tarea es usar módulos FV de autorregulación. Estos módulos se diseñan para suministrar un voltaje demasiado bajo para sobrecargar la batería. Es de igual manera crítico el emparejamiento entre el tamaño de los componentes y las cargas. Cuando no se dispone de este tipo de tecnología en módulos FV se recurre a los controladores de carga o reguladores, habilitando funciones de protección de sobrecargas y corte de cargas DC cuando el estado de las baterías sea demasiado bajo; estos dispositivos extienden la vida de las baterías. Un sistema autónomo completo se puede observar en la Ilustración 9-2.

2.2.15.3. *Sistemas conectados a la red (on-grid)*

En sistemas conectados a la red, con normalidad los elementos indispensables son los inversores, empleados en la transformación de un voltaje DC generado por los módulos/arreglos FV en voltaje alterno utilizado para alimentar cargas de estas características o incluso para alimentar la red

eléctrica con el exceso producido. Estos sistemas se pueden clasificar en dos secciones, una donde la energía eléctrica es almacenada y otra en la que no.

En sistemas donde no se emplean baterías, para el almacenamiento de energía, el uso de inversores es elemental y sistemas de montaje de módulos con cables, medidores de red y demás componentes. Estos sistemas se conectan directamente a la red mediante el bus LT (400/415 V, monofásico o trifásico).

Por otro lado, los sistemas que emplean baterías para almacenar la energía CD producida, se compone principalmente de un módulo PV, un inversor híbrido, baterías y el módulo de montaje con todos sus componentes. El uso de inversores híbridos se debe a la cualidad de poder conectar voltaje AC directamente a la red eléctrica mientras que con el exceso de energía cargar bancos de baterías.

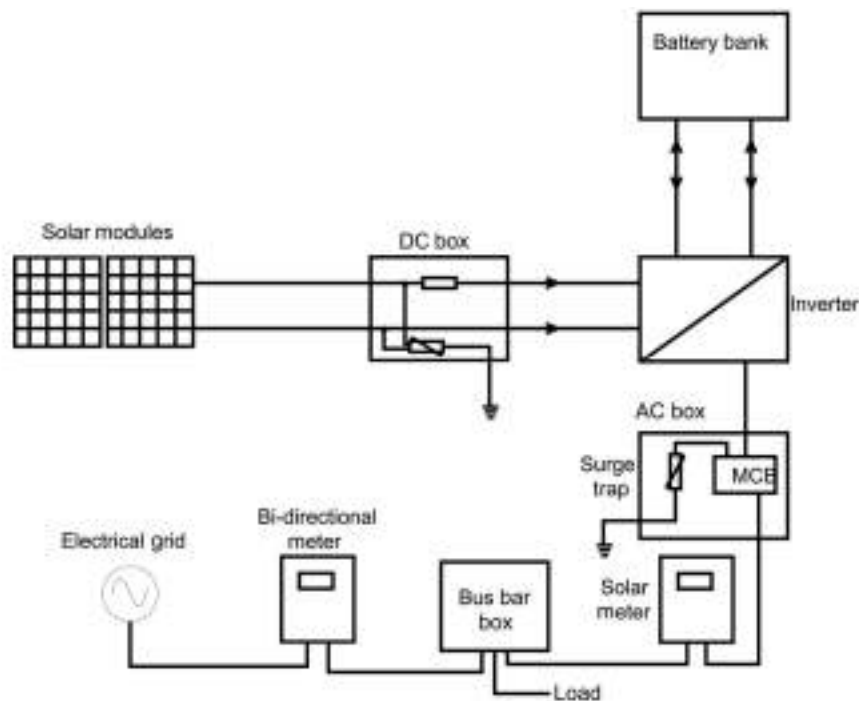


Ilustración 9-2: Esquema de un sistema FV desconectado de la red.

Fuente: (Satpathy y Pamuru 2021b, p. 268).

2.2.16. Componentes de un sistema FV autónomo

Como se denota en la Ilustración 21-2 los componentes principales de un sistema FV desconectado de la red en primer lugar son las celdas fotovoltaicas que se unen para formar paneles, módulos, arreglos FV para conjuntamente formar una caja de conexiones matriz, la cual se ubica cerca del arreglo FV. La corriente DC generada fluye a través de esta caja hacia el controlador, el cual regula el voltaje de suministro para las baterías. Por otro lado, si se requiere de alimentar cargas de tipo AC, el uso de un inversor es indispensable. Este sistema permite

almacenar energía eléctrica en bancos de baterías, para después ser utilizada cuando sea necesario. Los componentes en resumen son sistemas FV modular, controlador de carga solar, batería, inversor fuera de la red o híbrido, módulos de montaje estructural, caja de conexiones, plataforma de distribución de cargas y cables DC y AC.

2.2.16.1. Controladores de carga

Este dispositivo es indispensable en sistemas autónomos, se lo ubica entre el panel solar y el banco de baterías. Sirve principalmente para evitar daños en la batería ante sobrecargas en días donde la producción de energía solar sea excelente y las baterías se carguen sobre su capacidad, esto ocasiona calentamientos internos, pérdida de electrolito, emisión de gases, y corrosión de la red, como también reduce la vida útil de la batería, disminuyendo su rendimiento, y puede suponer un riesgo para la seguridad. Si bien no son necesarios para sistemas pequeños, sí lo son para sistemas con almacenamiento de baterías optimizado e infra dimensionado. La acción que se espera de este dispositivo es limitar o impedir el flujo de corriente proveniente del panel solar hacia las baterías que se encuentran completamente cargadas.

El mismo sistema es empleado en el caso contrario, cuando ocurren sobre descargas de la batería, debido a una demanda excesiva en las cargas o cuando existe menor potencial de radiación solar en el día. Cuando esto ocurre el controlador de carga desconecta la carga de la batería, abriendo el circuito para proteger a la batería y asegurando un mayor tiempo de vida útil, evitando pérdidas de capacidad.

Otra característica de los controladores de carga es la protección extra que le den al panel frente a corrientes de retorno, durante periodos de baja irradiancia o en las noches, cuando el panel no genera suficiente potencial eléctrico y por ende fluye una corriente en inversa.

Existen dos tipos básicos de controladores de carga empelados en pequeños sistemas FV, el tipo serie y el tipo paralelo o en derivación. Estos son controladores de una etapa, los cuales desconectan el arreglo FV cuando la batería llega a un voltaje alto, durante el estado de carga.

El controlado de tipo *shunt* deriva parte del arreglo FV y redirecciona la corriente de carga fuera de la batería, produciendo una disipación de calor por el exceso de corriente. El controlador de tipo serie, incorpora un interruptor en serie entre el módulo FV y la batería, interrumpiendo el paso de la corriente desde el arreglo FV. Este tipo de controlador tiene limitaciones en cuanto a la capacidad de componentes a manejar la corriente durante la operación de conmutación.

2.2.16.2. Bancos de baterías

Baterías y bancos de baterías se emplean como dispositivos de almacenamiento de la energía producida por los paneles y módulos FV. Internamente se compone de una celda o varias celdas

conectadas en serie o en paralelo en dependencia de las características eléctricas y capacidad de la misma. Las celdas se componen principalmente de ánodo, cátodo, electrolito, separador, terminales y carcasa. Reacciones químicas de oxidación y reducción ocurren interiormente para la generación de corriente. Con normalidad en sistemas FV autónomos son empleadas más las baterías de tipo *Lead-acid* y *Li-ion*. Las baterías cumplen con dos funciones dentro de los sistemas FV, uno es de poder brindar suministro de energía a la carga cuando no exista suficiente potencial solar o durante periodos nocturnos; por otro lado, debido a la naturaleza de producción de corriente de las celdas FV y debido a la dependencia de la incidencia solar, las fluctuaciones y picos de corriente son evitadas directamente en las cargas, mediante un voltaje continuo y regulado por las baterías.

La capacidad de las baterías es una medida de la disponibilidad para almacenar energía o de entregar energía eléctrica, usualmente se expresa en unidades de amperios hora (Ah). La capacidad de las baterías depende tanto de las características de fabricación y de las condiciones de uso, como carga, tasa de descarga, profundidad de descarga, voltaje de corte, temperatura e historial cíclico de la batería. Normalmente las baterías tienen especificado el índice de carga/descarga o índice C. Temperaturas frías reducen la capacidad de las baterías, debido a los cambios que ocasiona la temperatura en las reacciones químicas internas.

La tasa de carga/descarga de la batería es expresada como la relación entre la capacidad nominal de la batería y el número de horas que le toma completar una carga o descarga. Una tasa C1, significa que la completa capacidad de la batería podría ser descargada en una hora, con un voltaje final específico (Satpathy y Pamuru, 2021, pp. 276-280).

2.2.17. *Sistemas de adquisición y recolección de datos (Dataloggers)*

Formado por un equipo o instrumento sensor, que se encarga de transformar una señal de naturaleza física en una señal netamente eléctrica que consigo lleva información del fenómeno físico en cuestión. Esta puede ser manipulada para su posterior visualización en un ordenador. Una señal analógica puede ser completamente representada por un fenómeno físico de la naturaleza que cambia continuamente a través del tiempo, así por ejemplo la irradiancia solar. Por ende, una señal analógica es una señal eléctrica que varía de intensidad o amplitud en el tiempo de muestra de forma continua.

Mientras que una señal digital, es un tipo de señal en que cada signo que codifica el contenido de la misma puede ser analizado en términos de algunas magnitudes que representan valores discretos, en lugar de valores dentro de un cierto tiempo, también son variables eléctricas que se alternan en el tiempo con dos niveles diferenciables transmitiéndose información según un código establecido (Flores y Rodríguez, 2015).

El proceso de utilizar un ordenador para recopilar datos a través de sensores, analizarlos y guardarlos se denomina registro de datos y el instrumento utilizado para ello se llama registrador de datos o data logger. El registrador de datos es un sistema basado en un microprocesador que registra la información sobre los relés conectados al registrador de datos. El registrador de datos supervisa y registra todas las actividades y eventos en el sistema de señalización de una estación ferroviaria. El registrador de datos actúa como una "caja negra", que puede escanear, almacenar y procesar los datos para generar diversos informes fáciles de usar. Con la ayuda del registrador de datos y los comentarios del personal, se puede verificar la posición real del sistema y ver los parámetros ajustados. Es un equipo basado en un microprocesador y registra los eventos que se producen en la función de señalización de un patio a través del contacto energizado de los relés (Indian Railways, 2015).

2.2.17.1. Sensores y transductores

La clasificación de dispositivos sensores es amplia y toma varias consideraciones, de acuerdo a la propiedad física que emplean pueden ser de tipo piezoeléctrico, fotovoltaico, entre otras; o de acuerdo a la función que ejecutan pueden separarse en medidas de longitud, temperatura, etc. El termino sensor, empleado popularmente en USA, se deriva de *sentire* que significa "percibir", por otro lado, la palabra transductor, comúnmente empleado en la Unión Europea, es de *transducere* que significa "llevar a través". El caso de una celda solar, es conocido como un dispositivo sensor, ya que responde a un estímulo produciendo corriente en respuesta de la radiación, pero también es un transductor debido a que transduce del dominio radiante al eléctrico, caso diferente con un termistor, que requiere de un circuito puente para convertir el cambio de resistencia en voltaje.

Los transductores autogenerados (termocuplas, piezoeléctricos, fotovoltaicos) con normalidad producen una energía de salida baja, teniendo una baja eficiencia en la conversión efectiva, por ello son usualmente seguidos se dispositivos amplificadores para incrementar esos niveles de energía a valores adecuados.

Un sistema de medida se compone de diferentes partes, como transductores, amplificadores, detectores, actuadores, y adicionalmente alguna excitación y retroalimentación; característicos de cada sistema de medida. Una celda solar en medición de niveles de iluminación puede ser representado solo con un bloque transductor y no uno de excitación (Usher y Keating, 1996, pp. 1-11). En la Tabla 3-2 se presenta los efectos físicos de mayor importancia y sus transductores asociados.

2.2.17.2. *Sistemas de comunicación*

La información puede fluir entre varios canales, estos son entidades caracterizados por las propiedades básicas de comunicación como la capacidad máxima de transferencia de información y parámetros de ruido. Las entidades físicas que posibilitan la comunicación son denominados medios de comunicación, estos pueden ser medios inalámbricos (medio radio frecuencia, infrarroja), medios ópticos (fibra) y cableados. La comunicación entre dispositivo electrónicos, es decir, entre microcomputadoras o sistemas embebidos se da entre mismos protocolos de comunicación. Los protocolos básicos comúnmente empleados son el SPI, I2C y el UART, estos son más lentos en comparación con protocolos de tipo USB, Ethernet, Bluetooth y Wi-Fi, pero permiten la transferencia de datos entre microcontroladores y entre dispositivos sensores de manera eficiente, simple y con menos recursos de tipo hardware.

La comunicación entre el procesador y la interfaz periférica se lleva a cabo mediante los buses del computador. Si la transferencia de todos los bits o byte o una palabra es simultánea se trata de una comunicación paralela, por otro lado, la comunicación en serial si la transferencia se realiza bit a bit. Esta última no presenta problemas de sincronización, toma menos cableado para establecer conexión, es más viable económicamente en grandes distancias., permite la conexión a través de redes (líneas telefónicas).

Cuando la comunicación es en solo sentido se llamada comunicación *simplex*, pero cuando se lleva a cabo en dos direcciones pero no a la vez es denominada comunicación *half-duplex* (Arroz et al., 2019: pp. 612-623).

En la Tabla 4-2 se resumen los protocolos de comunicación serial con sus características.

El rápido incremento de los dispositivos IoT acelera la investigación en nuevas soluciones para emprender en servicios en la nube escalables. Con este nuevo paradigma, se han desarrollado nuevos protocolos de comunicaciones, algunos de los protocolos que resaltan por su buen acoplamiento al sistema, incluyen el MQTT, AMQP, XMPP, DDS, HTTP y CoAP (Dizdarevic et al., 2019: pp. 2-6).

2.2.18. *Internet de las cosas*

La evolución del internet nos ha traído a nuestra época y por unos 10 años más un conjunto de sorpresas, con ellas la evolución al Internet de las Cosas (IoT) el cual es una ventana hacia la automatización de procesos que antes al humano le requerían actividades repetitivas o de cierto esfuerzo, con esta tecnología en los próximos años carros, oficinas, casas, como también los electrodomésticos que estas contienen, incluyendo medidores de electricidad, gas y agua, las luces de la calle, aspersores, termómetros, tensiómetros e inclusive las paredes de edificios y casas estarán conectadas al IoT.

Tabla 3-2. Efectos físicos más importantes con su transductor asociado.

Tipo	Transducción	Efecto físico	Aplicación
Auto generadores	Radiante – Eléctrico Mecánico – Eléctrico Térmico – Eléctrico	FV; radiación – corriente Electrodinámicos; velocidad – voltaje Piezoeléctricos; deformación – carga Termoeléctricos; temperatura – voltaje Piroeléctricos; temperatura – carga	Celdas solares Tacogeneradores Piezotransductores Termocuplas Detectores de radiación
Moduladores	Magnéticos – Eléctricos Eléctrico – (radiante) – eléctrico Eléctrico – (mecánico) – eléctrico Eléctrico – (térmico) – eléctrico Eléctrico – (magnético) – eléctrico Radiante – (mecánico) – radiante	Electromagnetismo; radiación – corriente Fotoconductor; radiación – cambio de resistencia Fotoemisor; radiación – corriente Piezoresistivo; tensión – cambio de resistencia Desplazamiento; cambio de impedancia Termoresistivo; temperatura – cambio de resistencia Magnetoresistivo; campo magnético – cambio de resistencia Efecto Hall; f.e.m con corriente aplicada en el campo magnético Cambio de radiación debido al movimiento	Detectores de radiación Galgas extensiométricas Transductores eléctricos de desplazamiento Termistores, resistencias termométricas Medidores de campo magnético Sondas de efecto Hall para corrientes de campo
Modificadores	Radiante – Radiante Mecánico – Eléctrico Térmico – Térmico Eléctrico – Eléctrico	Cambios de temperatura debido a radiación Cambio de posición debido a la presión Cambio de posición debido a la fuerza de presión ocasionado por el flujo Cambio de temperatura debido al flujo de calor Cambio en la forma eléctrica	Detectores de radiación térmica Transductores de presión de diafragma Transductores de fuerza Transductores de flujo de tipo orificio Detector de flujo térmico Amplificadores, filtros, etc.

Fuente: (Usher y Keating, 1996, p. 22).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 202

Tabla 4-2: Protocolos de comunicación serial

Protocolo Serial	Sync / Async	Tipo	Duplex	Tasa de transferencia de datos (kbps)
UART	Asíncrona	Par a par	Full dúplex	20
I2C	Síncrona	Multi maestro	Half dúplex	3400
SPI	Síncrona	Multi maestro	Full dúplex	>1000
Microwire	Síncrona	Maestro – esclavo	Full dúplex	>625
1-wire	Asíncrona	Maestro – esclavo	Half-dúplex	16

Fuente: (GPCET, 2018, p. 2).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En un futuro no muy lejano, se vivirá un ambiente donde las casas controlarán su temperatura y no permitirán un ambiente caliente si el clima lo está así, se regarán los jardines automáticamente si estos lo necesitan por falta de lluvia, habrá asistencia inmediata en las carreteras, entre otras; y esto actualmente no es complejo debido a la facilidad de incorporación y a la gran cantidad de dispositivos sensores y transductores que nos permiten recolectar datos sobre el medio, además los sistemas micro controlados procesan cada vez mayores cantidades de información y las tecnologías de análisis como el Big Data, Deep Learning, Machine Learning, entre otras, permiten el manejo de grandes cantidades de datos sin procesar y los transforman en información útil, inclusive se trabaja sobre predicción de datos y anticipación de eventos para ser aprovechados en distintos campos (Hersent et. al., 2012: pp. 23-24).

Una de las primeras arquitecturas empleadas en IoT es la REST (*REpresentational State Transfer*) la cual define la escalabilidad, como el número de clientes interactivos y la robustez, como la evolución a largo tiempo del sistema. Este tipo de arquitectura se construye sobre los clientes y servidores, pero requiere que estos sean pequeños y accesibles para los clientes; en muchas ocasiones debido a condiciones de capacidades de procesamiento limitadas y problemas de conectividad (políticas de *firewall*), esto no es posible. Una alternativa para el modelo de comunicación tradicional síncrono de solicitud/respuesta, es incorporar el sistema de mensajería (Cirani et al., 2019: pp.90-97).

2.2.18.1. Colas de mensajería y comunicación mediante publicación/suscripción

El *middleware* orientado a mensajes implementa un modelo de comunicación asíncrono y enlace de manera flexible a los emisores con los receptores de mensajes, lo cual permite una mayor escalabilidad y flexibilidad. El patrón de colas de mensajería, el emisor envía mensajes a una fila en el servidor, donde es almacenado hasta que el receptor lo recibe. Este patrón implementa comunicación asíncrona punto a punto, con total independencia entre el emisor y el receptor. Por otro lado, el patrón de publicación/suscripción existen dos entidades, publicador y el suscriptor, el primero envía los mensajes hacia un “*topic*” en el servidor, mientras que el segundo recibe copias de todos los mensajes que han sido publicados en el “*topic*”. Esto significa que un mensaje puede llegar a varios consumidores al mismo tiempo. En este patrón la separación de publicadores y suscriptores se logra mediante nodos intermediarios denominados “*brokers*”, estos pueden ser implementados como colas de mensajería y se encargan de los principales enigmas de la comunicación, la publicación y la suscripción. El proceso puede ser observado en la Ilustración 10-2.

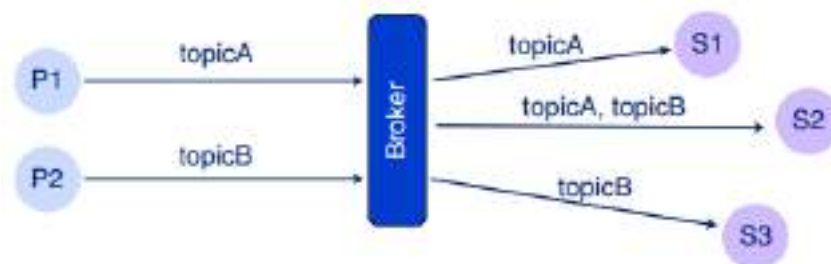


Ilustración 10-2: Modelo de comunicación publicación/suscripción.

Fuente: (Cirani et al., 2019: p. 99).

Las ventajas y desventajas de este modelo de comunicación se detallan en la Tabla 5-2.

- **Protocolo de comunicación *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT)**

MQTT es un protocolo *lightweight* de código abierto, TCP basado en el modelo de publicación/suscripción. Es empleado en escenarios donde se requiere una comunicación en ambos sentidos entre puntos finales que operan en redes poco fiables. La naturaleza ligera del protocolo MQTT lo hace adecuado para entornos limitados en los que se requiere tamaños mínimos tanto en mensajes como en cabeceras. Como se describió anteriormente los *topics* son empleados como filtros en el flujo de mensajería desde todos los publicadores hacia el *broker*.

Tabla 5-2: Análisis al modelo de comunicación pub/sub.

Ventajas	Desventajas
Acoplamiento flexible: los publicadores no requieren saber a qué suscriptor se dirigen	Modelo de difícil evolución a largo plazo
Escalabilidad: mayores volúmenes de datos	No hay soporte de seguridad <i>end-to-end</i> .
Implementación de bajo costo: la mayoría de la carga es manejada por el <i>broker</i>	Necesidad de claves de encriptación entre publicadores y suscriptores
Ya que los <i>brokers</i> solo requieren de una ruta de mensajería, pueden ser replicados fácilmente	Debido a la tasa de publicación y al aumento de suscriptores, se afecta al rendimiento de la comunicación ocasionando ralentizaciones en la entrega de mensajes

Fuente: (Cirani et al., 2019: pp. 99-100).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Las *wildcards* son empleadas para segmentar la ruta proporcionando una mayor granularidad sobre los mensajes a recibir. En el protocolo MQTT, el *broker* aplica filtros de suscripción al flujo de mensajes con la finalidad de determinar eficientemente a que cliente el mensaje debe ser enviado. Por lo tanto, una suscripción puede ser considerada como una operación de recepción condicional en tiempo real a consecuentemente tiene una naturaleza no duradera.

2.2.19. Desarrollo Web

El desarrollo de aplicaciones web incluye el uso de diferentes herramientas de programación y de ensamblaje con la finalidad de poder ofrecer una solución tanto visual como interactiva con el usuario. Un *software stack* de código abierto es un grupo de herramientas independientes que al agruparse ofrecen una solución en el desarrollo de plataformas completas. Las piezas fundamentales para el desarrollo de aplicaciones web se definen mediante su arquitectura de un *software stack* (SO), principalmente se debe considerar el sistema operativo, servidor web y el lenguaje de programación; todos estos tipos de herramientas son desarrolladas independientemente por distintos desarrolladores. Algunos de los ejemplos de SO son BCHS, GLASS, Jamstack, LAMP, LAPP, LEAP, LLMP, MAMP, MEAN, WAMP, XAMPP, entre otros. EL SO integrado por Linux, Apache, MySQL y PHP es uno de lo más empleados debido a su flexibilidad y su alta eficiencia permitiendo a desarrolladores iniciales ofrecer soluciones de desarrollo web.

2.2.19.1. LAMP

Este SO ofrece una robusta combinación de aplicaciones direccionadas bajo el poderoso sistema operativo Linux. Las arquitecturas abiertas de cada uno de sus componentes permiten una integración fácil y sin complicaciones uno con otro, resultando en una potente combinación.

- **L - Sistema operativo Linux**

Es el principal componente del *stack*, ya que bajo este sistema operativo corren las aplicaciones, es especialmente reconocido por su velocidad, requerimientos mínimos de hardware, seguridad y administración remota; otro de los puntos fuertes de Linux es que es completamente gratuito, ofreciendo un sistema operativo con la habilidad de correr con o sin una interfaz gráfica de usuario (GUI) en dependencia de las necesidades.

- **A – Servidor Web Apache**

Desarrollado por la Fundación de Software Apache (ASF), es una solución de servidor web de fuente abierta que se encapsula con varias características como su extrema velocidad, compaginando muy bien con el sistema operativo Linux. Con este servidor web se pueden implementar servidores virtuales, habilitando la capacidad de correr múltiples sitios web en un solo servidor.

- **M – Servidor de base de datos MySQL**

MySQL es un potente y robusto administrador de base de datos que nos permite almacenar y direccionar datos con un lenguaje de *scripting* como PHP. El uso de base de datos es vital al crear base de datos dinámicas, este último término refiriéndonos a la capacidad de utilizar una sola página de código para desplegar diferente información basada en la interacción con el usuario.

- **P – Lenguaje y motor de *scripting* PHP**

PHP o preprocesador de hipertexto, es ampliamente utilizado como un lenguaje de *scripting*, especialmente en el desarrollo web ya que puede ser embebido dentro de HTML. Esto significa que únicamente conociendo acerca del código y aplicando lógica se puede crear sitios web dinámicos que están en la habilidad de interactuar con los usuarios en diferentes niveles, más que el tradicional método HTML de internet “*flat file*”.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el desarrollo metodológico con el cual se implementó el proyecto técnico propuesto en este Trabajo de Integración Curricular. Se describe a priori el método empleado y su descripción ligado al desarrollo de este trabajo, seguido de la definición de los requerimientos del sistema tanto en hardware como en software, descripción modular de la propuesta y diseño del instrumento.

3.1. Método investigativo experimental

Parte fundamental del desarrollo de este Trabajo de Integración Curricular es la antesala de la implementación del proyecto técnico, es decir la investigación que existe detrás del diseño y puesta en funcionamiento del sistema sensor de irradiancia solar a partir de sensores de Silicio. En el marco de la investigación experimental se desarrolló la puesta en práctica de los estudios tanto teóricos, como de laboratorio con el fin de manipular las variables en cuestión y observar el comportamiento de otra variable, hablando directamente Irradiancia con corriente, voltaje y temperatura.

Las características primordiales que se han considerado en esta investigación es la manipulación directa de una variable dependiente, dicho de esta manera se manipula la radiación producida artificialmente dentro de un laboratorio por un equipo lumínico, expuesta ante un módulo fotovoltaico de producción eléctrica, monitoreando el comportamiento de la temperatura en las celdas y panel solar, ya que es de vital importancia incluir la influencia de la variación de temperatura generada por la radiación hacia las celdas solares. El registro cuantitativo mediante diferentes técnicas de adquisición de datos se debe realizar con enfoque hacia cada variable dependiente.

El experimento parte del planteamiento del problema, que en este caso exige recoger información acerca de la radiación solar incidente en la ciudad de Riobamba, notándose la ausencia de un conjunto de datos que puedan ser utilizados para predicción fotovoltaica y gestión de la eficiencia energética con relación a la conexión eléctrica de generadores FV en condiciones de radiación solar ideales extrayendo la mejor eficiencia posible en términos de aprovechamiento del recurso natural y renovable, este problema está estrechamente relacionada al estudio de la respuesta eléctrica de las celdas solares constituyendo el módulo solar, para ser empleada en la recolección de datos de radiación solar, haciendo uso consecuentemente del diseño electrónico y de sistemas embebidos para ofrecer una solución a la problemática observada.

La formulación de hipótesis se la plantea como solución al problema descrito, y concierne a las variables en estudio que fueron observadas y medidas con equipo electrónico debidamente desarrollado y validado. La hipótesis se enmarca en la generación de un sistema de adquisición de datos inteligente de radiación solar a partir de celdas de Si, y la relación entre estas variables con previo estudio de observación y medición. La estructura de la hipótesis se deriva en diversos subprocesos que se detallan a continuación de la mano con los requerimientos del sistema. El estudio investigativo experimental se desarrolló con la finalidad de observar la relación entre las variables concernientes al problema y poderlas emplear en la recolección de datos de radiación solar. Para lo cual se partió de un modelamiento estadístico correlacional, analizando las variables dependientes, independientes, controladas y contaminantes al sistema, y poder obtener un modelo que represente las características de interés en el trabajo reduciendo al máximo el posible error existente.

3.1.1. Medidor de energía solar y relación de datos

Con el objetivo de obtener una relación confiable entre datos de radiación solar incidente en la superficie terrestre y de respuesta eléctrica del módulo solar se utilizó un medidor de energía solar de precisión digital SM206-SOLAR, las características de este dispositivo se adjuntan en el Anexo D, entre las más importantes resaltan su alta resolución de 0.1 W/m^2 , el rango de error de $\pm 10\%$ lecturas + 2 dígitos y un coeficiente de error de temperatura de $0.38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} / ^\circ \text{C}$.

Con el uso de este dispositivo se pudo relacionar la radiación incidente artificial y obtener datos experimentales de laboratorio mediante el emulador de radiación solar con control de altitud, provenientes del módulo solar NPA5S-12H, es importante mencionar que dicho módulo solar se lo ubicó a 30° sobre la horizontal, debido a que en condiciones reales es como va a estar ubicado el panel solar, por lo tanto es necesario contar con datos reales del posicionamiento del módulo solar; como se muestra en la Ilustración 1-3.

El sistema circuital que se diseñó para la recolección y análisis de datos se muestra a continuación. Debido a que las variables dependientes de interés a medir son la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto del módulo solar, se diseñó un circuito electrónico que permite forzar estas dos condiciones de trabajo para ser leídas, procesadas y comunicadas a través de un sistema embebido. El circuito mostrado en la Ilustración 2-3 se conforma de un MOSFET IRF540 como dispositivo de conmutación. Cuando V_{GS} sea menor al voltaje de umbral V_{th} del MOSFET estará apagado impidiendo el paso de la corriente hacia la resistencia de carga R_1 que tiende a cero para disminuir las diferencias de voltaje debido a este tipo de cargas.



Ilustración 1-3: Pruebas de laboratorio con el medidor de potencia solar SM206-SOLAR.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Cuando V_{GS} incrementa hasta alcanzar el voltaje de umbral el MOSFET trabajará en la región activa, permitiendo el paso de corriente de drenaje y forzando así la condición de cortocircuito. El voltaje de disparo es controlado empleando una señal PWM proveniente del dispositivo controlador STM32F103C8T6, que a través de un filtro pasa bajos con frecuencia de corte de 0.25 Hz , haciendo posible el disparo a 3.3 V . Debido a las pérdidas debido a la conmutación se empleó un amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje, con el fin de asegurar una impedancia altamente baja en las compuertas *gate-source* cuando sea activado el MOSFET. A través de la compuerta de drenaje se adquiere la corriente y el voltaje, cuando se trabaja con ambas condiciones independientemente, ya que no es posible sostener ambas condiciones al mismo tiempo. El circuito es mostrado en la Ilustración 2-3.

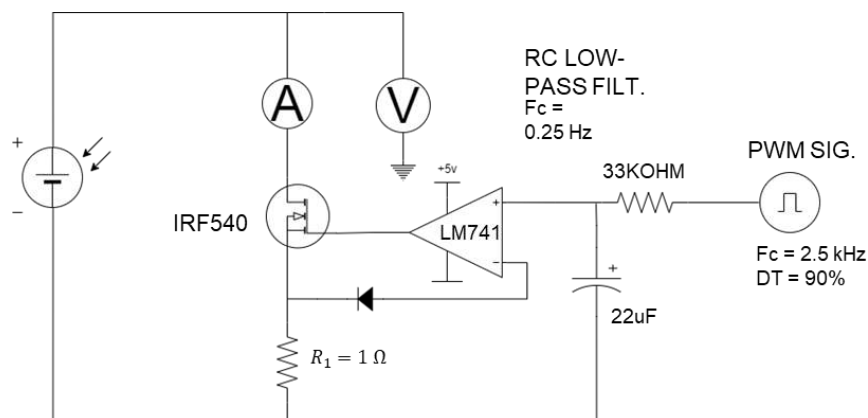


Ilustración 2-3: Esquema circuital implementado para la lectura de I_{sc} y V_{oc} .

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El experimento constó de la variación y control de la fuente de iluminación artificial, midiendo el resultado en características eléctricas del módulo solar, voltaje y corriente como se muestra en la Ilustración 2-3, mediante un sensor de potencia INA226, el cual fue expuesto a pruebas de comparación con multímetros de laboratorio para comprobar su fidelidad en la medición, resultados mostrados y analizados en el siguiente capítulo. Se registró la radiación lumínica incidente para cada valor obtenido, mediante el sensor de potencia solar de precisión digital.

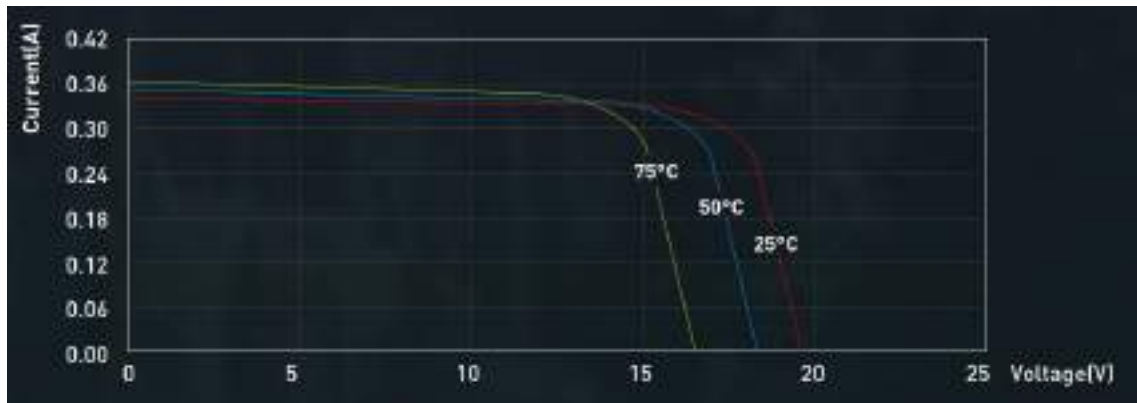


Ilustración 3-3: Curvas IV a diferentes temperaturas, Irradiancia: 1000 W/m^2 .

Fuente: (Newpowa, 2022).

El estudio a posterior fue el análisis de la variación en dependencia de las variables en estudio y desarrollo de algoritmos y modelos haciendo uso de plataformas de programación y cómputo numérico. Una de las variables que influye en las celdas solares, es la temperatura a la que se exponen las mismas, cuando existe presencia de luz solar, el fabricante del módulo solar NPA5S-12H incluye en su hoja de especificaciones (ANEXO A) las curvas I-V (Irradiancia: AM 1.5, 1000 W/m^2) expuestas a 3 niveles diferentes de temperatura, Ilustración 3-3. El mismo experimento se realizó con el fin de comprobar la variación de características eléctricas en dependencia de la radiación solar y consecuentemente de la temperatura del módulo solar y obtener un modelo que se ajuste a las condiciones reales que va a estar expuesto el sistema de adquisición de datos y el sensor de Si.

3.2. Requerimientos hardware del instrumento desarrollado

El sistema que se propone implementar debe cumplir con el objetivo principal de presentar datos de irradiancia solar [W/m^2] incidente en determinada hora del día, dispositivo que debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- La medición debe ser indirecta, a través de un dispositivo transductor de tipo radiante – eléctrico o celda FV, que en conjunto será constituido en un panel FV.
- El sistema FV debe ser autónomo, es decir, debe cumplir satisfactoriamente su funcionamiento sin ser conectado a la red eléctrica.
- El dispositivo debe ser fiable y económico.

3.3. Descripción modular del dispositivo

El instrumento autónomo de medición de irradiación solar, consta fundamentalmente de 4 bloques, el primero es el de adquisición de datos, el segundo es el de procesamiento y control de información, el tercero es el de comunicación y el último es la gestión de alimentación y almacenamiento de la energía producida. En la Ilustración 4-3 se puede observar la arquitectura general del sistema, en esta se incluyen algunas de las características principales tanto de comunicación como de función de cada bloque.

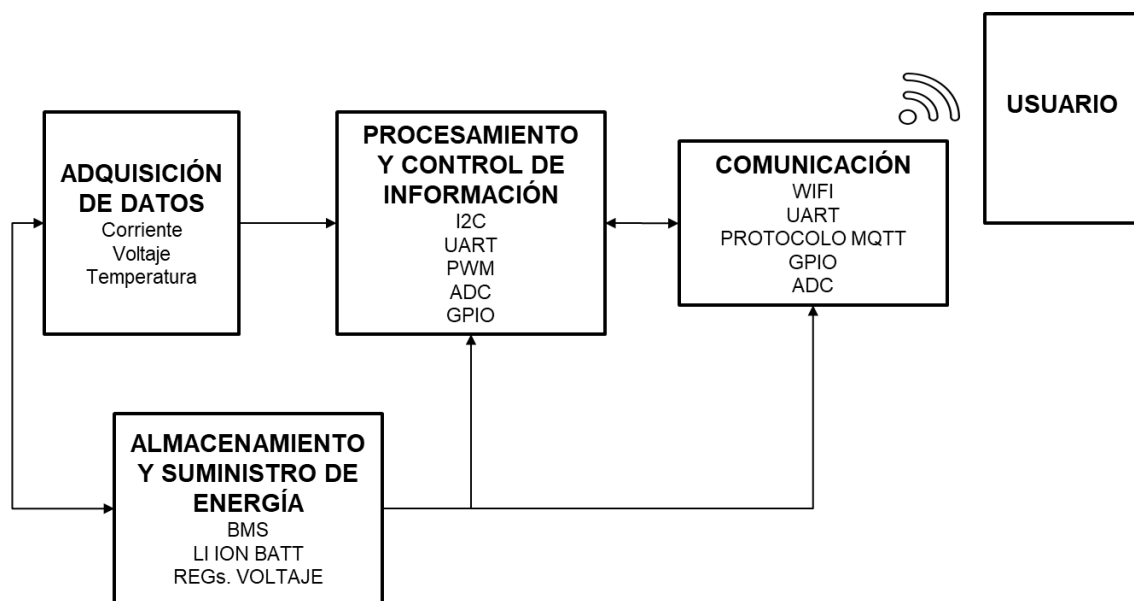


Ilustración 4-3: Arquitectura general del Sistema.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.3.1. Bloque de adquisición de datos

Este bloque se encarga de recolectar la información del medio exterior para ser utilizada y analizada por el programa y el ser humano. Los elementos electrónicos que se emplearon para cumplir con la adquisición de datos son el medidor de corriente y potencia bidireccional INA226 y el sensor de temperatura LM35.

El elemento que nos permite la transducción de la variable de interés, como se mencionó en secciones anteriores es el panel fotovoltaico, el cual ofrece características de corriente y voltaje que son medidas debidamente con instrumentos calibrados y probados.

3.3.1.1. Sensores y transductores

El sensor de corriente y potencia bidireccional INA226, es un dispositivo fabricado por *Texas Instruments*, de muy buena calidad y excelentes características, estas se enlistan en la Tabla 1-3 .

El dispositivo no mide directamente la corriente, como lo suelen hacer dispositivos de Efecto Hall, este sensor basa su funcionamiento en la caída de voltaje en una resistencia de derivación interna, usualmente de $100\text{ m}\Omega$; cuenta con funciones de programación a registros de calibración, tiempo de conversión y de promedio. Mide voltaje de entre un rango de 0V hasta 36 V y corriente por medio de una carga, ya sea antes o después de esta, reporta corriente, voltaje y potencia. Tiene una ganancia de error máxima del 0.1 % y un *offset* máximo de $10\mu\text{V}$. En la siguiente Ilustración se observa el sensor en cuestión.



Ilustración 5-3: Medidor de corriente y potencia bidireccional, INA226.

Fuente: (Espruino, 2022).

Cabe mencionar que este dispositivo cuenta con una interfaz I2C compatible, con la cual se puede adjuntar a un maestro I2C con 4 direcciones ajustables y procesar los datos que se almacenan en 16 direcciones programables. La principal característica por la que se escogió este tipo de sensor es su resolución nativa de 16 bits en la conversión analógica – digital, además frente al INA 219 es capaz medir el voltaje entre VBUS y GND, como el INA 219 que mide únicamente entre IN y

GND, esto hace al INA226 un dispositivo más flexible que puede ser empleado en antes o después de la carga. La exactitud con la que se programó a este monitor de corriente, puede ser observada en la sección 4.1.1 de este documento.

Tabla 1-3: Especificaciones técnicas del sensor INA226.

Característica	Especificación	Unidad
Voltaje de alimentación	2.7 – 5.5	V
Corriente de reposo	330 - 420	μ A
Entrada analógica $IN +$, $IN -$	-0.3 – 40	V
Entrada en el Bus de voltaje	0 – 36	V
Corriente en cada pin	5	mA
Resolución ADC	16	Bits
Tamaño de paso LSB: voltaje de derivación	2.5	μ V / bit
Tamaño de paso LSB: bus de voltaje	1.25	mV / bit

Fuente: (Texas Instruments, 2015).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El siguiente sensor empleado, debido principalmente a su significativo tamaño es el LM35, transductor de precisión analógico de temperatura. Las características están localizadas en la Tabla 2-3. Los dispositivos de la serie LM35 se componen de circuitos integrados de precisión en la medición de temperatura, cuya salida de voltaje es linealmente proporcional a la temperatura en grados centígrados. No requiere de ninguna calibración o ajuste externo para proporcionar una precisión típica de $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente y $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ dentro de todo su rango de medición, entre -55 y $+ 150^{\circ}\text{C}$. El tipo de empaque empleado en este trabajo es el TO-92, teniendo una longitud de 19.4 mm. y un ancho de 5.2 mm., siendo perfecto para este trabajo, ya que el sensor está en contacto directo con la parte posterior del módulo solar. En la siguiente ilustración se observan las dimensiones extraídas de la hoja de especificaciones del fabricante. La característica principal de interés para la adquisición mediante un puerto ADC en un microcontrolador, es su factor de escala lineal de $+10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.

El elemento indispensable en el sistema de medición indirecta de irradiancia y como fundamental requisito es el transductor de tipo autogenerador, de transducción radiante-eléctrico y de efecto físico radiación – corriente, el módulo solar. En la Sección 2.2.6.4 se mencionó al sensor basado en celdas de Silicio, como uno de los primeros requisitos a cumplir, allí se mencionan algunas de sus características y se presenta como ANEXO A, la hoja de especificaciones del módulo solar escogido, donde se pueden ver a detalle las características del mismo.

Además de los dispositivos mencionados se emplea el esquema circuital mostrado en la Ilustración 2-3: Esquema circuital implementado para la lectura de I_{sc} y V_{oc} Ilustración 2-3, y explicado en la misma sección con el fin de forzar las condiciones necesarias y adquirir los datos de interés para ser procesados posteriormente.

3.3.2. Bloque de procesamiento y control de información

La función de este bloque es recibir los datos, procesarlos y enviarlos hacia el bloque de comunicación inalámbrica, además comanda operaciones PWM para el control del circuito que conduce a situaciones de cortocircuito y circuito abierto, con respecto al módulo solar. Se requieren funciones de comunicación UART, I2C, conversión ADC y entradas/salidas de propósito general. En la Ilustración 8-3 se observa gráficamente el diagrama de conexiones y comunicación del microcontrolador con los elementos sensores y de comunicación.

3.3.2.1. Tarjeta de desarrollo microcontrolador

Debido a estas exigencias y en estudio de los diferentes micro controladores disponibles en el mercado se escogió el STM32F103C8T6, que incorpora todas las características que se requieren para el sistema de control y procesamiento de información, además de otras que le hacen un controlador de altas capacidades y de buen rendimiento para este tipo de aplicaciones.

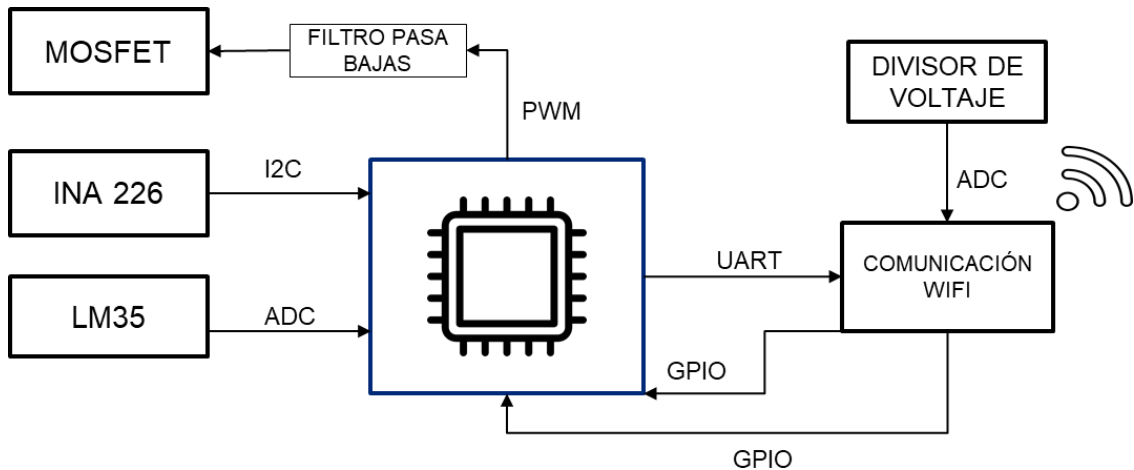


Ilustración 8-3: Diagrama de interfaces necesarias del dispositivo microcontrolador.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El dispositivo de rendimiento de media densidad basado en un MCU ARM® de 32 bits con flash de 64 Kbytes, USB, CAN, 7 temporizadores, 2 ADC de 12bits y 9 interfaces de comunicación, es

fabricado por *STMicroelectronics*, Italia. Se constituye de un núcleo de CPU Arm® Cortex®-M3 de 32 bits, con una frecuencia máxima de 72 MHz, memoria estática de acceso aleatorio (SRAM) de 20 Kbytes, oscilador de 32kHz para RTC con calibración, dos interfaces de comunicación I2C, hasta tres USARTs, dos SPIs, modos de bajo consumo, convertidores A/D de $1\mu s$, entre otras. Especialmente se consideró su pequeña dimensión de 23 mm de ancho y 53 mm de longitud, como se muestra en la Ilustración 9-3.



Ilustración 9-3: Tarjeta microcontroladora STM32F103C8T6 "blue pill".

Fuente: (Tolocka, 2021).

Una característica especial de este micro controlador es su modo de depuración de tipo serial wire (SWD) e interfaz JTAG, esto quiere decir que requiere de un dispositivo externo para su programación, en este trabajo se empleó el ST-LINK V2 (Ilustración 11-3) propio de *STMicroelectronics*. Debido a su reducido espacio tampoco cuenta con un conversor USB – Serial, por lo que es necesario conectar a su interfaz USART, un conversor de tipo FTDI FT232RL, Ilustración 10-3.



Ilustración 10-3: Conversor USB - Serial, FTDI FT232R.

Fuente: (Llamas, 2016).



Ilustración 11-3: Programador ST-Link V2 (SWD).

Fuente: (Amazon, 2018).

Una de las características de este tipo de micro controladores es que tienen un ambiente integrado de desarrollo, denominado *STM32CubeIDE*. Este es una de las herramientas de desarrollo multi sistema operativo todo en uno, se basa en plataformas de programación C/C++ que permite codificar y depurar código de programación para micro controladores y microprocesadores STM32.

Tabla 3-3: Principales características técnicas del STM32F103C8T6.

Característica	Especificación	Unidad
Voltaje de operación (V_{DD})	2 – 3.6	V
Voltaje de entrada I/O	$V_{DD} + 0.3$	V
Frecuencia de reloj interna	Max. 72	MHz
Consumo de corriente típico	36	mA

Fuente: (ST, 2022).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.3.3. *Bloque de comunicación inalámbrica*

Este bloque integrado con un solo dispositivo tiene la función de transmitir los datos a través de un protocolo de comunicación IoT, denominado MQTT, el cual trabaja bajo el modelo de suscripción/publicación con una comunicación bidireccional, las ventajas de este protocolo se analizaron en la sección 2.2.17.2 del primer capítulo. Den entre los dispositivos que integran estándares de comunicación WIFI, se escogió el ESP8266 Wemos D1, el cual puede ser observado en la siguiente ilustración.



Ilustración 12-3: Wemos D1 Mini ESP8266 WIFI.

Fuente: (Naylamp, 2021).

Empleado como un adaptador WiFi, es capaz de dotar de acceso a internet inalámbrico a nuestro diseño micro controlado con una conectividad a través de interface UART. Algunas de las características de este módulo es su MCU de 32 bits de bajo consumo, ADC integrado de 10 bits, pila de protocolos TCP integrada, WiFi 2,4 GHz, soporta WPA/WPA2m, SDIO 2.0, (H) SPI, UART, I2C, I2S, tele comando IR, PWM, GPIO, entre otras.

Tabla 4-3: Especificaciones técnicas de ESP8266 wemos D1 mini.

Característica	Especificación
Voltaje de alimentación	5V DC
Voltaje de periféricos I/O	3.3 V DC
CPU	Tensilica Xtensa LX3 (32 bit)
Frecuencia de reloj	80 MHz
RAM de instrucciones	32KB
Memoria flash externa	4MB
Corriente de reposo	40 μ A

Fuente: (Naylamp, 2021).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.3.4. *Bloque de Almacenamiento y suministro de energía*

Este bloque se encarga de gestionar la carga de la batería y a la vez de asegurar el suministro continuo de potencial eléctrico necesario para alimentar el sistema digital, mostrado en la Ilustración 8-3. El esquema empleado en este bloque es el siguiente.

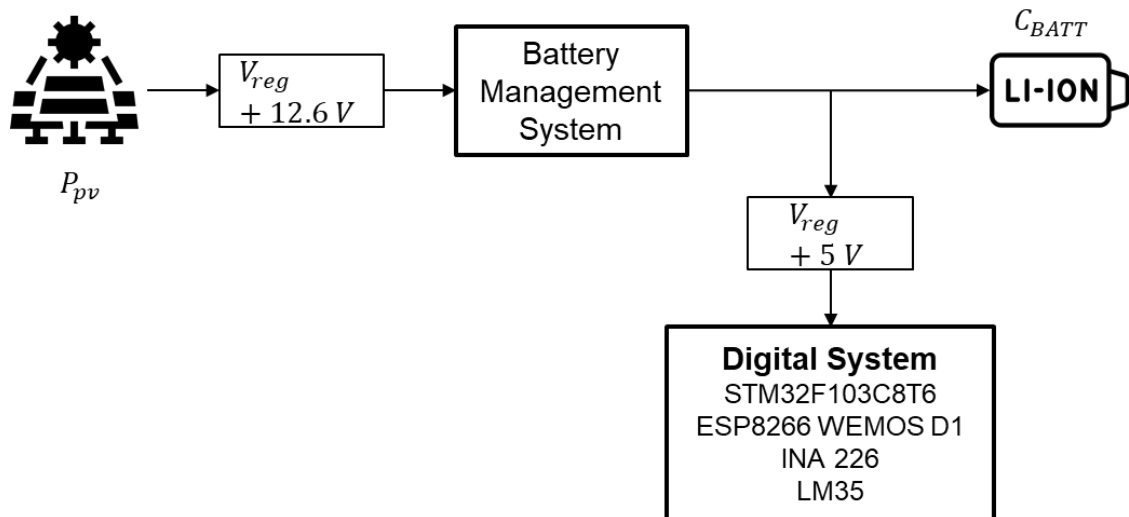


Ilustración 13-3: Esquema del sistema FV autónomo empleado.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Es importante incluir en horas de la noche, donde no es aprovechable el consumo del corriente en el sistema de procesamiento, un modo de bajo consumo de corriente, evitando así consumos de corriente innecesarios. Este modo de consumo de baja corriente en la tarjeta de procesamiento es comandado por la tarjeta de comunicación, ya que esta es la que se ubica en el tiempo y con respecto a la hora del día ordenar esta condición.

3.3.4.1. Dimensionamiento del sistema FV autónomo

Se debe tomar en consideración que cada sistema autónomo FV es distinto, en dependencia de su aplicación y consumo de corriente y potencia, por ello es necesario dimensionar los elementos del sistema fotovoltaico (tamaño del generador, acumulador) con el propósito de suministrar de manera fiable la energía eléctrica exigida por una determinada carga a partir de la radiación disponible en la zona. En la Tabla 5-3 se resume el consumo de corriente en diferentes modos de operación cada componente que integra el instrumento sensor de irradiancia solar.

Considerando que el consumo de corriente del sistema digital en modo continuo es alrededor de 118.35 mA , consecuentemente el sistema digital tendrá un consumo de potencia de $5\text{ V} \times 118.35\text{ mA} = 0.59175\text{ W}$. Se obtiene que la capacidad de descarga, C_{desc} es de alrededor de 17 W/h , considerando un voltaje de suministro de 12 V . y 12 horas de descarga en la noche, por lo tanto, las características de las baterías de Li-ion deben ser suficientes para suplir esta capacidad de descarga, esto dá como resultado 3 baterías en serie de 3.7 V . y 2600 mA . Con respecto con el generador de energía eléctrica, este debe satisfacer la potencia de descarga en 12 horas de luz solar, considerando las mejores condiciones, consecuentemente el panel debe

satisfacer una potencia de $\frac{17W}{12h} = 1.4202 W.$ de carga y la potencia del sistema digital de 0.59175 W., eso significa por lo menos un panel solar de 5W, sobredimensionando al sistema con un factor del 40%, debido a que en este análisis no considero la potencia solar disponible con respecto al lugar de instalación y posición del módulo PV.

Tabla 5-3: Corriente de consumo de los componentes del instrumento desarrollado.

Dispositivo	Corriente de Consumo		
	Modo continuo	Modo de apagado	Modo <i>Deep Sleep/Stand by</i>
INA226	0.35 mA	2.3 uA	-
STM32f103C8T6	50 mA	30 mA	2.4 uA
ESP8666 wemos D1	68 mA	0.68 mA	0.17 mA

Fuente: (ST 2022, p. 32) (Espruino, 2022) (Naylamp, 2021).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.3.4.2. Banco de baterías

Como se demuestra en el anterior desarrollo, el banco de baterías debe constar con las características de tres baterías conectadas en serie de 3.7 V. y 2600 mA., por lo que se optó por emplear baterías de tipo Li-ion 18650, debido a su tamaño y características eléctricas de carga y descarga, como se muestra en la Tabla 6-3.



Ilustración 14-3: Baterías Li-ion 18650.

Fuente: (Electrónica DIY, 2022).

3.3.4.3. Sistema de gestión de carga

El sistema de gestión de baterías que se escogió es el balanceador de carga de baterías BMS de 3 celdas y 10 A. debido a que se emplearon baterías de tipo Li-ion. Este módulo cuenta con

protección contra sobrecarga y sobre descarga, protección de cortocircuito una vida útil de 30 000 horas y una resistencia interna de 60mΩ. En la siguiente ilustración se denota el módulo empleado.

Tabla 6-3: Especificaciones técnicas de las baterías Li-ion 18650.

Característica	Especificación
Capacidad típica	2600 mAh
Voltaje por celda	Nominal: 3.6 V. Carga: 4.2 V. Descarga: 2.5V.
Corriente de carga	Estándar: 2.6 A. Máxima: 6.0 A.
Tiempo de carga	Estándar: 1.5 hr.
Resistencia interna	20 mΩ (Máx.)
Densidad de energía	Volumétrica: 535 Wh/l

Fuente: (Electrónica DIY, 2022).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.



Ilustración 15-3: BMS 3S 10 A Balanceador de carga de baterías Li-ion.

Fuente: (Alitools, 2020).

Las principales características se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 7-3: Especificaciones técnicas del módulo balanceador de baterías Li-ion.

Característica	Especificación	Unidad
Voltaje entrada de carga	12.6 - 13	V
Voltaje de baterías a cargar	11.1 (serie)	V
Corriente máxima	10	A
Voltaje de sobrecarga	4.25 – 4.35 ±0.05	V/celda
Voltaje de descarga	2.5 – 3 ±0.05	V/celda
Corriente de reposo	< 6	μA
Temperatura de trabajo	-40 – 50	°C

Fuente: (Unit, 2022).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.3.4.4. Acoplamiento de voltaje

Debido a que el panel fotovoltaico produce un voltaje que varía en relación a la cantidad y luz solar incidente, es necesario incluir un módulo de regulación de voltaje. En la Ilustración 13-5 se denota la necesidad de contar con dos módulos reguladores de voltaje, uno que regula el voltaje para la carga de baterías a 12.6 V. y otro que regula a un voltaje de 5 V. para la alimentación del sistema digital.

Para este trabajo se escogió el convertidor reductor de voltaje regulable MP1584, principalmente por su tamaño reducido de 17 mm de ancho y 22 mm de largo. Este convertidor es capaz de manejar una carga de máximo 3 A, de corriente de salida. En la Tabla 8-3 se puede encontrar algunas características de interés del módulo.



Ilustración 16-3: Regulador MP1584EN Step-down.

Fuente: (Joslin, 2022).

Tabla 8-3: Características técnicas del reductor de voltaje MP158EN.

Característica	Especificación	Unidad
Voltaje de entrada	4.5 - 28	V
Voltaje de salida	0.8 - 20	V.
Eficiencia	96 max	%
Frecuencia de conmutación	1	Mhz típico
Ondulación de salida	< 30	mV
Temperatura de operación	-45 - 85	°C

Fuente: (MPS, 2021).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.4. Esquemas de conexión del instrumento sensor

En las siguientes secciones se detallan los circuitos electrónicos diseñados para implementar la propuesta planteada. Principalmente se detallan los esquemas circuitales de los tres bloques mencionados con anterioridad. En la Ilustración 17-3 se observan gráficamente las conexiones realizadas para enlazar tres de los cuatro bloques del instrumento sensor.

3.4.1. Diagrama de conexión del bloque de adquisición de datos

En la Ilustración 17-3 de color verde se presenta el esquema circuitual del bloque de adquisición de datos, donde:

- **PV_INPUT:** es la entrada de voltaje directamente desde el módulo fotovoltaico NPA5S-12H, con un voltaje variable entre 0 y 21 V. aproximadamente.
 - **OUT_CHARGE:** representa la bornera de salida para dirigir el voltaje a través de un diodo hacia el módulo de gestión de carga de las baterías, teniendo un voltaje similar al de entrada del módulo fotovoltaico, considerando las pérdidas del diodo en condiciones reales, -0.7 V aproximadamente.
 - **MOLEX_LM35:** es el conector de tipo molex donde se alimenta el sensor de temperatura LM35 con $+5\text{ V}$. y se recibe la señal de voltaje que representa la temperatura en $+10.0\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$.
 - **IN-1, IN-2:** representa la entrada de voltaje de alimentación de $+5\text{ V}$. Para todos los bloques.
- En la Tabla 9-3 se detallan los componentes empleados en este bloque, así como sus valores y descripción de las conexiones empleadas.

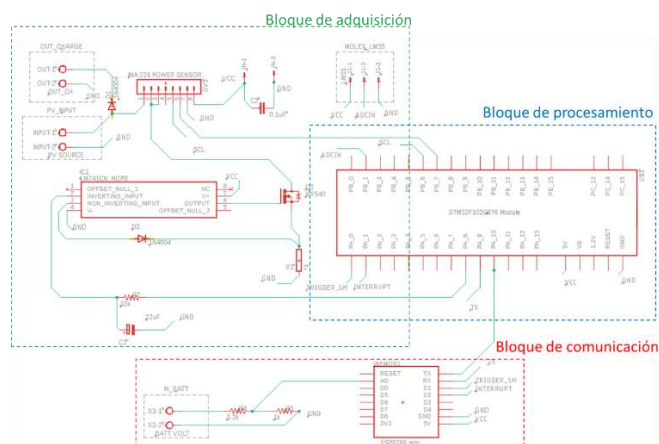


Ilustración 17-3: Esquema circuitual de los bloques de adquisición, procesamiento y comunicación de datos.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Tabla 9-3: Descripción de los elementos electrónicos del bloque de adquisición de datos.

Dispositivo	Valor	Conexiones
Sensor medidor de potencia y corriente	INA226	Recibe alimentación de +5V. la corriente se mide entre la fuente FV y R1 a través del MOSFET, en el mismo punto mide voltaje y se conecta con el MCU de procesamiento mediante I2C.
Diodo 1 (D1)	1N4004	Evita regresos de corriente desde el módulo BMS de las baterías.
Condensador 2 (C2)	0.1 uF	Filtro para el voltaje de alimentación.
CI amplificador operacional	LM741	Conduce el disparo del MOSFET ofreciendo una baja impedancia en la salida. Se alimenta con +5V y GROUND.
Diodo 3 (D3)	1N4004	Evita compensación de voltaje en la entrada no inversora del Ampl. Op.
MOSFET de potencia	IRF540	Dispositivo conmutador para forzar el cortocircuito de la fuente FV.
Resistencia 1 (R1)	1 Ω / 5 W.	Resistencia de potencia de bajo valor evitando pérdidas de voltaje.
Resistencia 2 (R2)	33 k Ω / 0.25 W.	Constituye un filtro pasivo para obtener un voltaje analógico a partir de una señal PWM.
Condensador 1 (C1)	22 uF	Constituye un filtro pasivo de baja frecuencia de conmutación.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.4.2. Diagrama de conexión del bloque de procesamiento de datos

Este bloque es visible en la Ilustración 17-3 de color azul, se conforma únicamente del MCU STM32F103C8T6 que se encarga de comunicarse con los elementos sensores y comandar acciones para ejecutar correctamente varias acciones. Recibe una alimentación de +5 V.

En la siguiente tabla se describen las configuraciones y usos de los diversos pines empleados de este microcontrolador.

Tabla 10-3: Descripción de los periféricos empleados del MCU STM32.

Número de PIN	Descripción
PB_1	Entrada de conversión analógica – digital, para leer el valor de temperatura desde el LM35.
PB_6, PB_7	Bus de comunicación I2C con el medidor de potencia y corriente, SCL y SDA respectivamente.
PA_0	<i>System Wakeup</i> , atento a cualquier señal de interrupción en modo de consumo de baja corriente.
PA_1	Entrada de propósito general, para interrupciones desde el ESP8266.
PA_8	Señal PWM
PA_9, PA10	Comunicación UART con el módulo de comunicación inalámbrica. TX, RX respectivamente.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.4.3. Diagrama de conexión del bloque de comunicación inalámbrica de datos

El bloque de color rojo en la Ilustración 17-3 representa el bloque que se encarga de comunicar los inalámbricamente los datos recogidos y procesados anteriormente, mediante protocolo IoT hacia el servidor virtual para almacenamiento y presentación visual, donde:

IN_BATT: es la entrada de voltaje desde las baterías para ser medidas mediante un ADC en el MCU de comunicación inalámbrica a través de un divisor de voltaje.

En la siguiente tabla se describen los componentes y valores de los elementos electrónicos utilizados.

Tabla 11-3: Descripción del esquema circuital del bloque de comunicación

Dispositivo	Valor	Descripción
ESP8266	Wemos D1 mini	Recibe alimentación de voltaje de + 5 V. Se comunica mediante sus pines RX y TX con el MCU de procesamiento de datos, D1 y D2 se encargan de comandar el modo de bajo corriente en este MCU; y A0 lee el voltaje de las baterías.
R4	3.3 k Ω	Resistencias que conforman el divisor de voltaje, con una relación V_{in}/V_{out} de 4.
R3	1 k Ω	

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.4.4. Diagrama de conexión del bloque de almacenamiento y suministro de energía

En la siguiente ilustración se observa el esquema de componentes electrónicos empleados con la finalidad de almacenar la energía eléctrica recibida por la fuente FV y suministrar los correctos niveles de voltaje al sistema digital. Donde es notable que:

PV_SOURCE: representa la entrada de voltaje desde el módulo fotovoltaico NPA5S-12H, este voltaje será empleado para cargar de las baterías.

BMS_P: es la entrada de voltaje regulada al módulo BMS de gestión de carga para las baterías.

BMS_OUT, BMS_IN: son las entradas y salidas de voltaje para el balanceamiento de las baterías, dirigidas hacia el BMS 3S 10A.

V_BATT: representa la salida de voltaje de las baterías a ser medido por el MCU de comunicación inalámbrica.

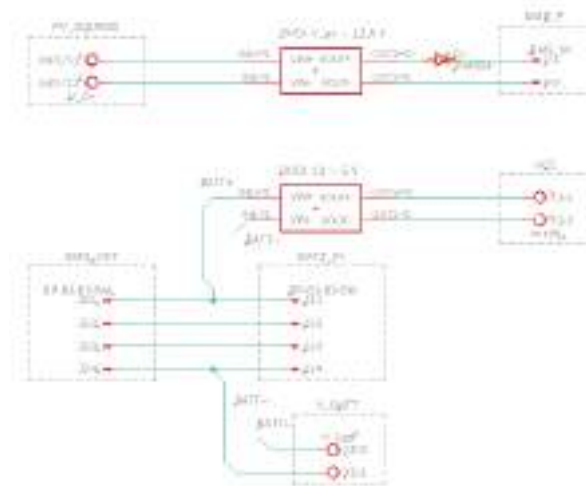


Ilustración 18-3: Esquema circuital del bloque de almacenamiento y suministro de energía.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En este bloque se hizo uso de dos módulos reductores de voltaje tipo Buck, uno para regular el voltaje a 12 V. para cargar las baterías y el segundo para regular el voltaje a 5V. con el fin de alimentar el sistema digital.

3.4.5. Diagrama de conexiones del instrumento desarrollado

En la siguiente ilustración se observan las conexiones de los elementos empleados en el instrumento, como la descripción de las mismas. Donde V_{pv} representa el voltaje fotovoltaico que alimenta la carga de las baterías, I_{in} la corriente del módulo solar de entrada para ser medida en

el INA 226 mediante el circuito MOSFET-OPAMP que se encarga de cortocircuitar el módulo permitiendo esta lectura.

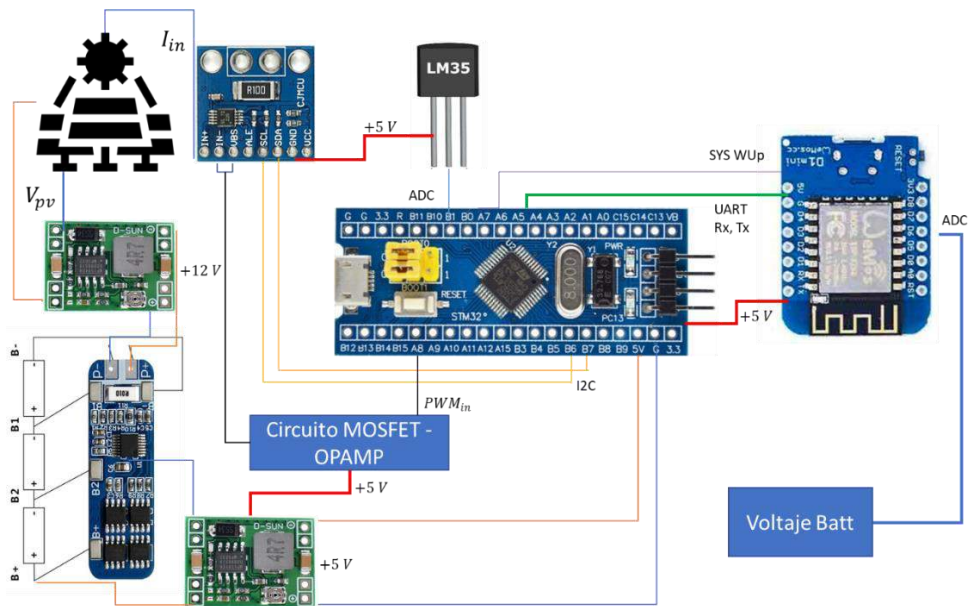


Ilustración 19-3: Diagrama de conexiones del instrumento completo.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.5. Requerimientos *software* del instrumento desarrollado

El instrumento desarrollo exige requerimientos de tipo *software* con el fin de ejecutar determinadas tareas mediante el equipo hardware, como también cubrir las necesidades de visualización de datos. Los requerimientos son los siguientes:

- Adquirir los datos relacionados con el módulo FV, corriente, voltaje y temperatura; y datos relacionados al sensor, voltaje de batería y *sleep mode*.
- Enviar los datos recolectados y almacenarlos en una base de datos dentro de un servidor virtual.
- El dispositivo debe presentar datos históricos de irradiancia solar útiles para investigaciones relacionadas a la generación eléctrica renovable.
- Los datos deben ser visualmente presentados a través de una aplicación web.

3.5.1. Descripción del *software* del sistema

Cuando se habla de dotarle de inteligencia a un dispositivo electrónico, estrechamente se habla de una comunicación inalámbrica y de toma de decisiones a partir de *machine learning* o redes neuronales. En este trabajo se incluyó un módulo de comunicación el cual a través de protocolos

IoT es capaz de transmitir datos e información para ser procesada en un servidor y presentada a través de una aplicación web. El protocolo más empleado para sistemas donde se requiere presentar datos a través de internet es HTTP, siendo un método eficaz, sin embargo, este no permite la comunicación en dos direcciones, ya que solo responde a peticiones de clientes. MQTT es un protocolo diseñado para comunicar dispositivos o *things* hacia un *backend* una vez la conexión es establecida. Por ello y más ventajas fue escogido para dotar de comunicación al sistema. Eclipse Leshan es otro protocolo IoT basado en *OMA Lightweight M2M* de grandes ventajas, pero está diseñado para dispositivos que soporten programación en Java. En la Ilustración 20-3 muestra el esquema empleado.

El instrumento dentro de sus características *software*, como se describió en secciones anteriores, consta de un nodo sensor y un servidor virtual donde de almacenan y visualizan los datos. Una vez los requerimientos de tipo *hardware* han sido cumplidos se diseña el esquema modular software que permite ejecutar las funciones de cada dispositivo *hardware*. En la sección anterior referente al *Bloque de procesamiento y control de información*, se describieron las interfaces necesarias de los dispositivos microcontroladores, los mismos que se presentaron en la Ilustración 8-3. En la siguiente ilustración se describe la arquitectura general de software.

3.5.2. *Software para la configuración del instrumento*

Los distintos sistemas *software* que se emplearon para la programación de los elementos *hardware* que integran el instrumento de recolección de datos de irradiancia solar tanto en el sensor como en el servidor son los siguientes:

3.5.2.1. *Software para la programación del MCU STM32*

En este trabajo se configuró y programó el microcontrolador STM32F103C8T6 mediante su propio ambiente de desarrollo integrado, *STM32CubeIDE* debido principalmente a la capacidad de manejo de registros y acceso a los mismos mediante una simple programación desarrollada en C/C++. La integración de servicios y la facilidad con la que se pueden crear proyectos y configurar periféricos son una de las muchas ventajas que ofrece este *software*.

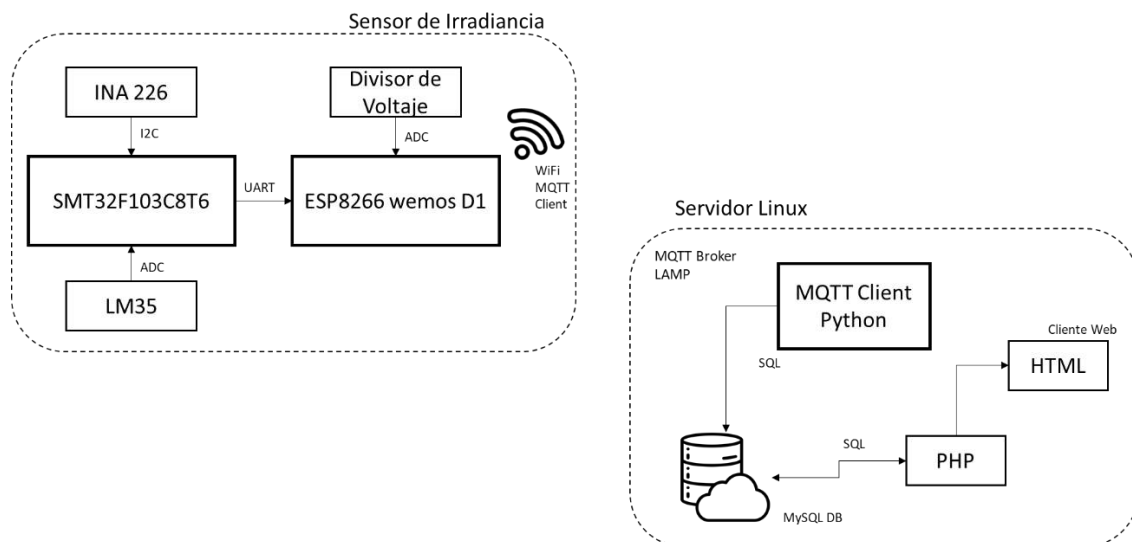


Ilustración 20-3: Arquitectura general software del instrumento.

Fuente: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Cabe mencionar que este tipo de microcontroladores también se pueden programar en el ambiente de desarrollo ofrecido por Arduino, aun así, debido a características como consumo de recursos FLASH-SRAM, configuración de la frecuencia de reloj, velocidad de ejecución de código y velocidad de lectura en sus diferentes periféricos, se prefiere la programación en el *STM32CubeIDE*. En este trabajo se desarrolló el código mediante la versión 1.9.0 del IDE.

3.5.2.2. Software para la programación del MCU ESP8266

Las tarjetas WiFi de desarrollo ESP8266 se pueden programar mediante lenguajes como *MicroPython* y Arduino, en este caso se escogió el ambiente de programación integrado de Arduino debido a sus características de fácil incorporación con protocolos IoT, como por ejemplo el protocolo de comunicación bajo suscripción/publicación MQTT. El IDE de arduino permite con facilidad la programación, depuración y subida de código escrito en este lenguaje para diferentes placas ya sea de Arduino o de otros desarrolladores como son las tarjetas ESP8266. Se utilizó la versión 1.8.19.

3.5.2.3. Software para el desarrollo de la aplicación web

Como se observa en la Ilustración 21-3, con el propósito de comunicar el sensor de irradiancia de manera “inteligente” se partió en primer lugar de la incorporación de un protocolo IoT mencionado anteriormente. Dentro de un sistema virtual de tipo servidor Linux, se desarrollan y montan varios servicios que sirven para presentar los datos visualmente a cualquier cliente web.

Se empleó el *stack* de servicios LAMP (Linux-Apache-MySQL-PHP) permitiendo desarrollar un ambiente completo para el desarrollo de aplicaciones, puntualmente este *stack* se lo emplea para trabajar sobre un sistema operativo de código abierto, un servidor web, gestionar una base de datos y un lenguaje de programación que permita desarrollar aplicaciones web. Además de estos se hizo uso de otros lenguajes de programación como HTML, JavaScript y CSS, que en conjunto conforman paquetes potentes de desarrollo web para *frontends* como Bootstrap.

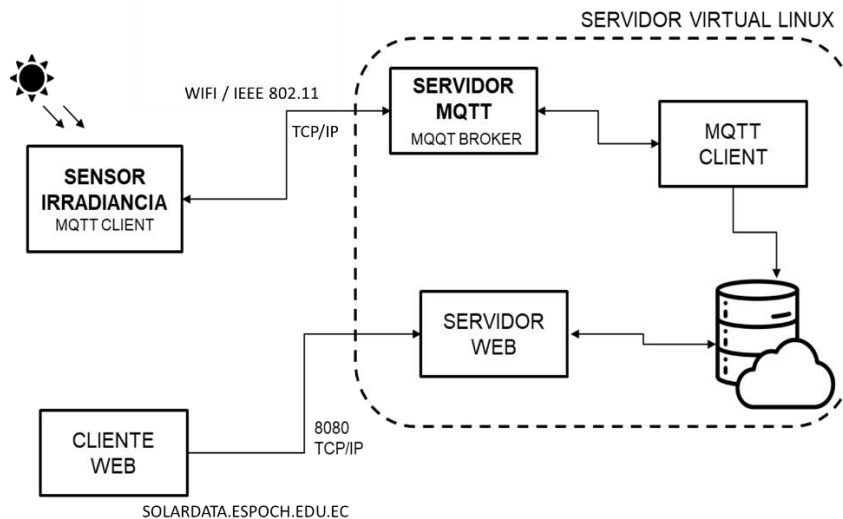


Ilustración 21-3: Esquema de comunicación IoT a través de protocolo MQTT.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Es importante tener en consideración que para trabajar sobre el servidor la fecha debe estar actualizada, de no estarlo se generan problemas de actualización con los servidores de descarga de paquetes de datos. El comando para la actualización de la fecha es el siguiente: “ `$ timedatectl set-time 'AAAA-MM-DD HH:MM:SS'` ”

Los servicios LAMP fueron activados mediante líneas de comando en el servidor, como también las configuraciones necesarias para dotar de las seguridades debidas tanto a la base de datos como al servicio *MQTT mosquitto*. Este último servicio de código abierto es un bróker de mensajería implementada con versiones 5.0, 3.1.1 y 3.1 del protocolo MQTT, sus principales ventajas son su tamaño ligero y disponibilidad desde ordenadores de una placa hasta servidores virtuales complejos. El servicio de broker *mosquitto* permite ser la puerta de enlace entre diferentes clientes que publiquen mensajes y se suscriban a tópicos de interés, estos clientes están debidamente autenticados con usuario, contraseña y un ID único para cada uno de estos, dejando en claro los niveles de seguridad que brinda el protocolo.

En el servidor también se ejecutó *scripts* de *Python* con la finalidad de implementar el cliente MQTT dentro del servidor y también de recoger los datos y almacenarlos en la base de datos montada con el *stack* mencionado.

3.6. Lógica de programación del instrumento recolector de datos

En instrumento desarrollado, sigue principalmente 4 lógicas de programación. La primera tiene que ver con la obtención de los datos de interés, tanto del módulo solar como del mismo instrumento sensor, continua la lógica que lleva a cabo la comunicación inalámbrica de datos y el envío los datos hacia el bróker MQTT, mediante publicación de *topics*. La tercera lógica se encuentra embebida en el sistema virtual, mediante un *script* de *Python* el cual se encarga de suscribirse a los temas de interés y almacenarlos en la base de datos; mientras que la última lógica a seguir es la que permite presentar visualmente los datos mediante la aplicación web diseñada.

3.6.1. Lógica de programación del MUC STM32

Los bloques de procesamiento y control de información y el bloque de comunicación, siguen algoritmos de programación para lograr las funciones y requerimientos que han sido planteados en anteriores capítulos, ejecutando las siguientes lógicas de programación. La unidad microcontroladora STM32F103C8T6, se le cargó la programación que sigue la lógica que se muestra en la Ilustración 22-3, en esta el programa comienza con la declaración de periféricos empleados estos son, UART, ADC, GPIO, I2C, DMA y TIM. Paso seguido se realiza la calibración del INA226 mediante la librería “F7_INA226.h”, la cual permite la escritura y lectura hacia los diferentes registros reprogramables del INA226.

El modo de consumo de baja corriente se lo maneja mediante una activación desde el módulo de comunicación ESP8266, empleando una entrada de propósito general y una interrupción externa. Mientras el modo de baja consumo este desactivado cada 15 min se va a realizar las diferentes lecturas de los valores de interés. Se debe mencionar que el modelo de irradiancia solar, enfoca su error cuando la corriente tiende a 0, por lo cual se realiza un control exigiendo que, para corrientes menores a 8 mA y mayores a 1 A, el valor de irradiancia sea 0. Por último, se envían los datos recogidos hacia el módulo de comunicación Wifi mediante comunicación UART.

3.6.2. Lógica de programación del MUC ESP8266

En la Ilustración 23-3 se denota la lógica que sigue el MCU ESP8266, comenzando con la definición de constantes y variables empleadas en el programa, como las credenciales de wifi, credenciales del bróker MQTT, contadores, entre otros. Seguido de la configuración de las interfaces de conexión a la red Wifi y al bróker MQTT. En una función denominada *GET_DATA* () del programa, se asegura que la conexión MQTT se mantenga establecida y a continuación se consulta la hora para ser sujeta a condiciones, concretamente si son horas de día o de noche con el fin de enviar al bloque de procesamiento de información a un modo de bajo consumo de corriente.

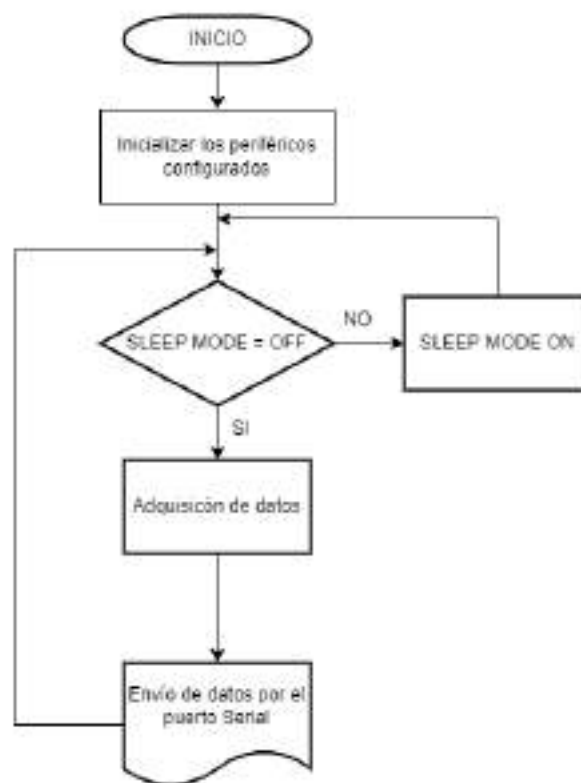


Ilustración 22-3: Diagrama de flujo STM32f103C8T6.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Cuando son horas de noche, se publica un mensaje mediante el protocolo MQTT sobre el estado mencionado, se publica el voltaje de la batería y se pone al microcontrolador en modo de consumo de baja corriente por una hora. Cuando se tratan de horas de luz solar, en una primera instancia se “despierta” al MCU Arm Cortex, se adquieren los valores de interés y se publican consecuentemente a través de varios *topics* MQTT, pasando finalmente a un modo de bajo

consumo de baja corriente durante 15 minutos, un ciclo de reloj del mismo MCU se encargará de levantarlo cuando el ciclo termine.

Se debe mencionar que se trabajó con la librería *time.h* la cual permite hacer consultas de la fecha actual a un servidor NTP (*Network Time Protocol*), y trabajar en función de la hora. Aun así se debe hacer un control de la hora registrada, si la fecha no concuerda con el tiempo actual, el MCU es reseteado para comenzar con la lógica nuevamente. Además de esta, se hizo uso de librerías de código abierto para la conectividad a Internet (*ESP8266EWiFi.h*) y conectividad al bróker MQTT (*PubSubClient.h*).

En el ANEXO C y

ANEXO D se puede encontrar a más detalle los diagramas de flujo de las lógicas de programación para los microcontroladores empleados.

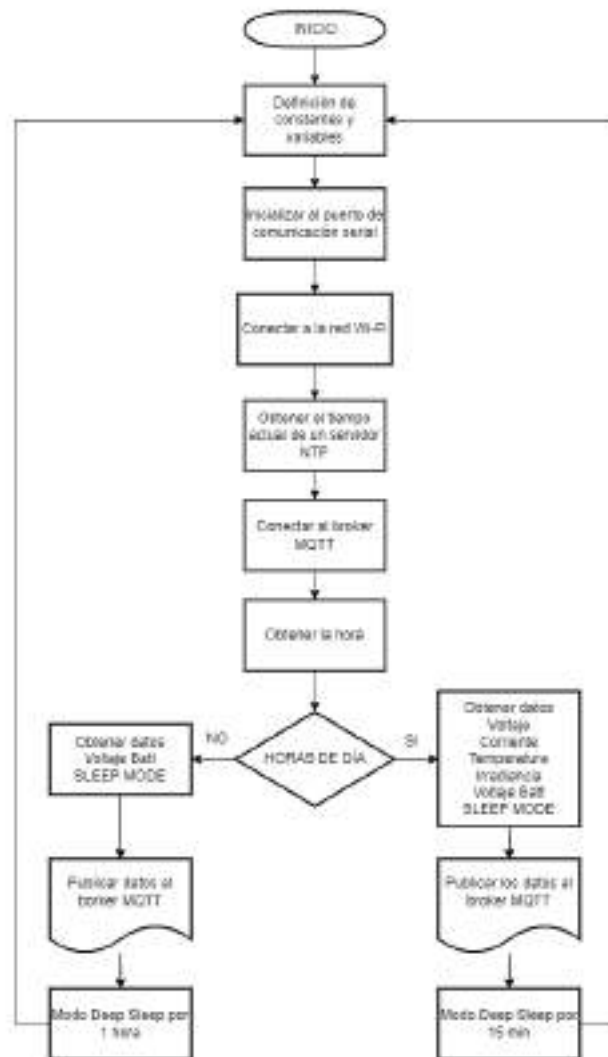


Ilustración 23-3: Diagrama de flujo del ESP8266 Wemos D1.

3.6.3. *Lógica de programación del script de Python*

Mediante la versión 3.10 de *Python* instalada en el servidor Linux, es posible programar scripts en este lenguaje, por el cual se realizó la lógica de programación con la finalidad de inicializar un cliente MQTT que se suscriba a los *topics* enviados por el cliente sensor y almacenarlos en la base de datos instalada en el servidor. Dos librerías de código abierto, fueron utilizadas en este script, *paho-mqtt* que provee una la conexión a clientes MQTT mediante programación en *Python*; *mysql-connector* que permite la fácil incorporación y envío de datos hacia una tabla de datos, perteneciente a la base de datos MySQL. En la Ilustración 24-3 se describe la lógica que sigue el programa de Python.

El programa comienza definiendo parámetros necesarios para la autenticación tanto para la base de datos, como para el *broker* y cliente MQTT. Para la conexión con la base de datos son necesarios datos como usuario, contraseña, *host* y tabla o base de datos; mientras que para establecer conexión con el *broker* MQTT se deben especificar los *topics* a los cuales se va a suscribir, el ID, usuario y contraseña del cliente, *host* y puerto del broker MQTT.

La librería *paho-mqtt* define funciones con las cuales recibe los mensajes de suscripción, debido a que estos llegan independientemente de acuerdo hayan sido enviados desde el cliente sensor, se los debe acumular en un array de la longitud del número de datos recibidos. Una vez este array este completo, se invoca a la función que se encarga de insertar estos datos en la tabla correspondiente de la base de datos.

La función *write_data(messages)* se encarga de inicializar una conexión con el servidor MySQL, se almacena el objeto de conexión y se crea un cursor propio de la conexión, parámetros indispensables para que el envío sea satisfactorio. Una vez recibido los datos en la correspondiente tabla se debe vaciar el array para esperar a los nuevos datos que lleguen. El cliente MQTT se mantiene en escucha a mensaje que lleguen en los *topics* especificado, invocando a una función *client.loop_forever()*. En el ANEXO E se presenta con más detalle la lógica del script empleado en el servidor Linux.

Este programa escrito en *Python* debe ejecutarse de manera continua en el servidor, parte de la ejecución continua se debe a la función propia del cliente MQTT que se mantiene en escucha a nuevos mensajes, pero una vez cerrado el terminal de acceso al servidor todos los procesos son cerrados, por ello es necesario ejecutar el *script* en segundo plano. En Linux, el comando *nohup* es empleado con el fin de ignorar la señal de HUP (*hangup*) al cerrarse una sesión, por ejemplo mediante protocolo SSH. El comando empleado es *nohup python3 name.py &*, el proceso se ejecutará en segundo plano con un ID en específico, ese código puede ser obtenido ingresando el comando *ps ax | grep name.py* y el mismo puede ser finalizado con le comando *kill -9 PID*.

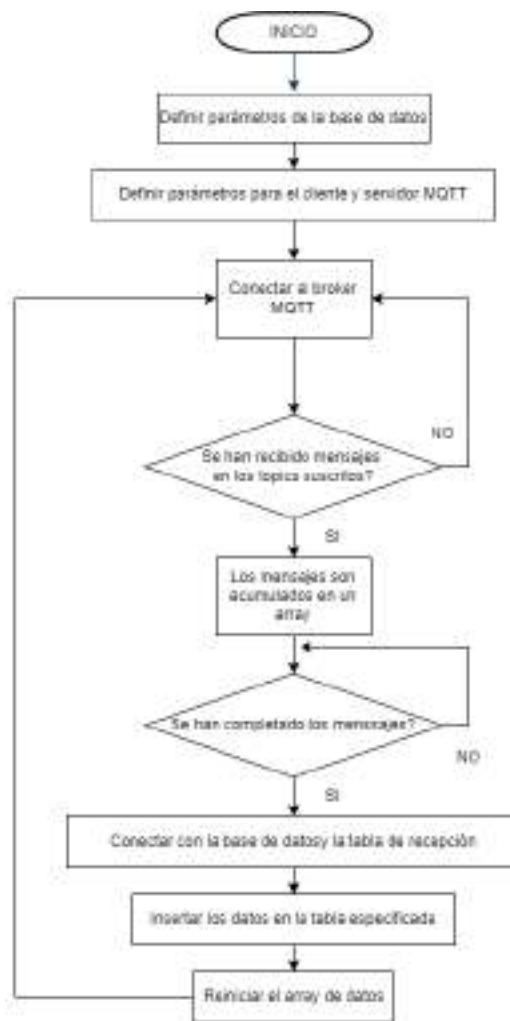


Ilustración 24-3: Lógica de programación del script de Python en el servidor.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.6.4. *Lógica de programación de la aplicación web*

La aplicación web tiene como objetivo presentar visualmente los datos que llegan a la base de datos, y permitir descargas de información al usuario. En ese sentido se diseñó la página web mediante codificación HTML y CSS, mientras que mediante programación en PHP se logra el flujo de consultas a la base de datos para la generación de los reportes .csv y el flujo de consultas para la presentación gráfica de los datos diarios de irradiancia solar y temperatura en el sensor. En las siguientes ilustraciones se observa el flujo de petición hacia la base de datos en ambos casos.



Ilustración 25-3: Flujo de consulta para generar el reporte CVS.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El programa comienza definiendo el intervalo de fechas donde se solicitan los datos de irradiancia solar y temperatura, se procede a conectar con la base de datos y escribir la consulta de tipo SELECT hacia la base de datos, la cual responderá con los datos requeridos si la conexión se ha establecido con la satisfacción. Una vez los datos sean recibidos se almacenarán en diferentes filas, separando los datos de interés del array indexado en el que llegan, por último, se definen datos necesarios para la generación del archivo .csv y se logra obtener el mismo para el usuario que lo solicite, desde la página web.

En la siguiente ilustración se muestra el flujo de petición para generar las gráficas de irradiancia solar y temperatura en la página web, esta lógica sigue un programa escrito en php, instalado y configurado como servicio del *stack* LAMP.



Ilustración 26-3: Flujo de consulta y graficación.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.7. Diseño e implementación del prototipo hardware

El proceso que se siguió para la implementación del prototipo instrumento autónomo de medición indirecta y recolección de datos de irradiancia solar, comenzó con los diseños de circuitos eléctricos que fueron previamente probados en una placa de pruebas como la *breadboard*, este proceso se puede observar en la siguiente ilustración.

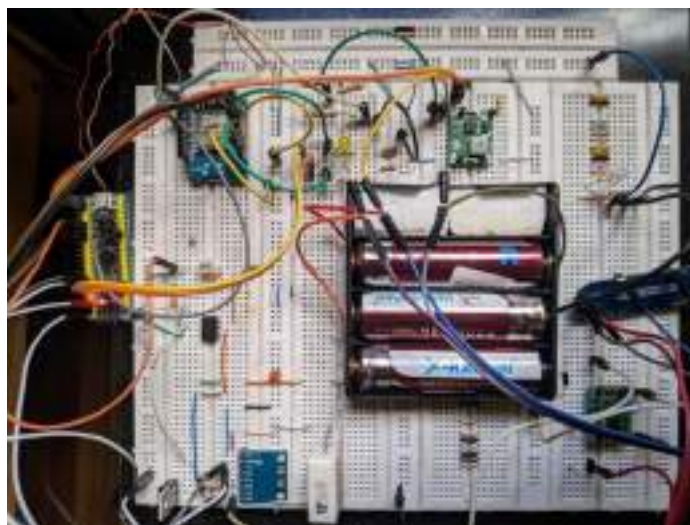


Ilustración 27-3: Montado del sistema en una placa de pruebas.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

3.7.1. *Fabricación de las tarjetas de circuito impreso*

Una vez validado el sistema en la placa de pruebas se procede con el desarrollo de los circuitos necesarios para implementar el sistema. El circuito que enlaza 3 de los bloques principales del sistema se puede observar a detalle en el ANEXO F, donde se emplearon todos los dispositivos mencionados en las secciones anteriores. De la misma manera, en el ANEXO G se encuentra el diseño circuital del bloque de alimentación.

Con la ayuda del software de diseño electrónico automático se puede conectar los esquemáticos diseñados con la placa de circuito impreso del mismo diagrama, el resultado se observa en la siguiente ilustración. Posteriormente este diseño es reflejado en una placa de baquelita para la posterior ubicación y soldadura de componentes. La técnica que se empleó en este trabajo para la obtención del circuito impreso, fue mediante una máquina CNC.

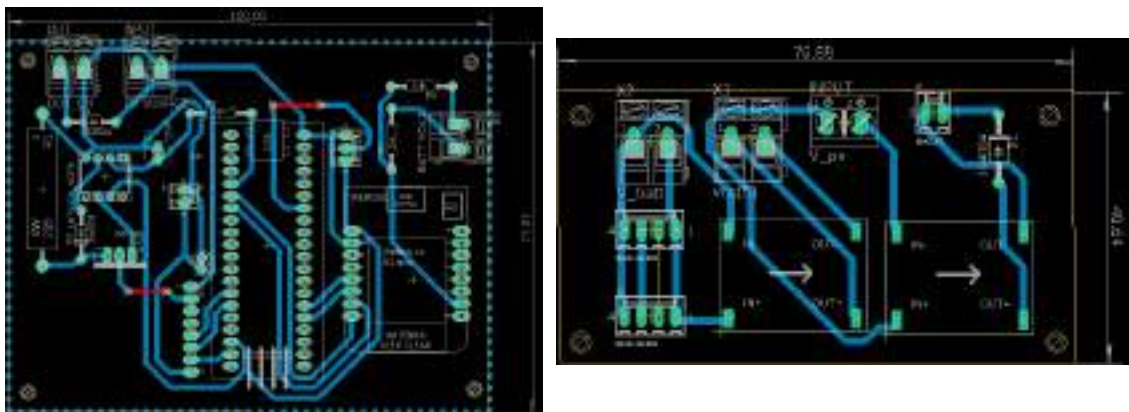


Ilustración 28-3: Diseño de las placas de circuito impreso.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Una vez incorporado los componentes en el circuito el resultado es el presentado en la Ilustración 29-3.

Como es notable en la Ilustración 29-3 (Izq.) se emplearon borneras y conectores tipo molex para la entrada y salida de señales eléctricas. De izquierda a derecha en la misma imagen la primera bornera se la emplea para la salida de voltaje fotovoltaico de alimentación a las baterías, la segunda bornera es la entrada de voltaje FV para la adquisición de información (corriente, voltaje), el primer molex recibe la alimentación de 5V. desde la placa de alimentación, el segundo molex recibe información desde el sensor de temperatura LM35, ajustado al panel FV, la última bornera es la entrada de voltaje de las baterías.

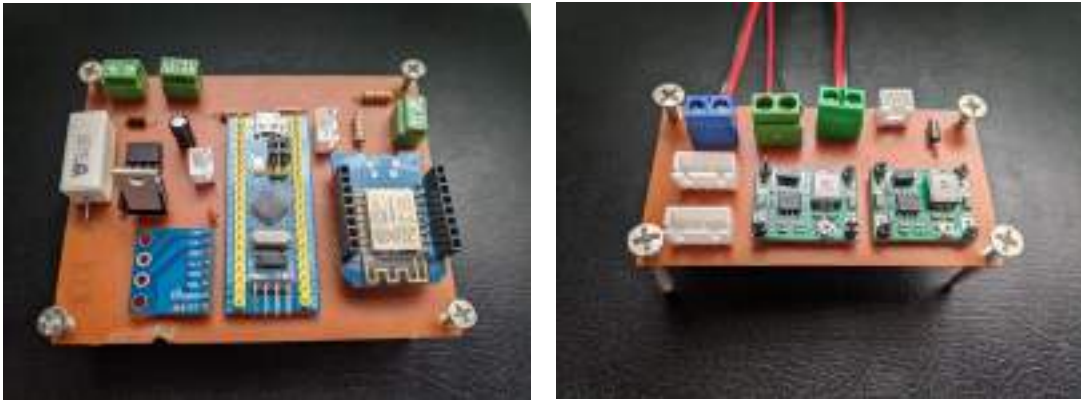


Ilustración 29-3: Circuito de adquisición, procesamiento y comunicación de datos (Izq.).

Circuito de alimentación y BMS (Der.)

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la Ilustración 29-5 (Der.) se empleó de igual manera tanto borneras como conectores tipo molex para la entrada y salida de señales eléctricas. De izquierda a derecha, la primera bornera es la entrada de voltaje FV para la alimentación de baterías, la segunda bornera es la salida de voltaje de alimentación para el circuito digital, la última bornera se utiliza para la salida de voltaje de baterías. De la misma manera, el primer molex es la entrada para el balanceo de las baterías (existen 2, pero solo se utiliza uno por simplicidad) y el segundo molex es la salida de voltaje de carga de las baterías, 12.6 V.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se describen y analizan los resultados obtenidos mediante la investigación experimental y diseño del instrumento propuesto. Puntualmente se enlistan los resultados a los que se llegó mediante la obtención el modelo estadístico empleado con la ayuda del medidor de potencia solar SM206-SOLAR y estudios de fidelidad del sensor de voltaje y corriente.

En la Ilustración 1-4 se muestra el dispositivo desarrollado al cual se le realizaron pruebas de consumo de corriente, pruebas de comunicación de datos, prueba de autonomía energética y pruebas precisión de datos de irradiancia solar recolectados por el instrumento desarrollado.



Ilustración 1-4: Instrumento recolector de datos de irradiancia solar desarrollado.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El instrumento recolector de datos de irradiancia se encuentra ubicado en el techo del Laboratorio de Robótica e Industria 4.0 de la Facultad de Informática y Electrónica, ubicada en el mismo lugar donde se instalaron un conjunto de paneles solares para aprovechamiento del recurso solar disponible en la zona, como se puede observar en la Ilustración 2-4.

4.1. Modelo estadístico de Irradiancia, V_{oc} e I_{sc}

Siguiendo el esquema y método descrito en la sección anterior, se lograron obtener un conjunto de datos a partir del experimento realizado, donde se observa y mide las características eléctricas del módulo solar expuesto a una fuente de iluminación variable en el laboratorio, sujeto a determinación de potencia solar generada mediante el SM206-SOLAR.



Ilustración 2-4: Ubicación del instrumento desarrollado.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

4.1.1. Mediciones de Voltaje y Corriente

Considerando que es indispensable contar con un equipo de alta fidelidad en la adquisición de datos, se hizo uso de un monitor de corriente y potencia bidireccional con interfaz compatible I2C (INA226) y se realizaron pruebas de comparación y validación del instrumento empleado con polímetros Lucas Nulle LM2330.

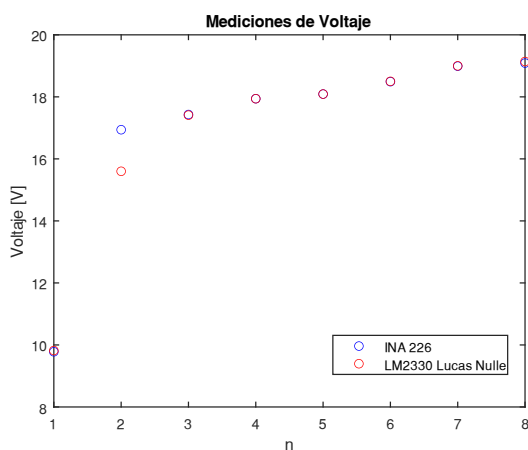


Ilustración 3-4: A la izquierda comparación entre las mediciones de voltaje. A la derecha el experimento realizado.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la Ilustración 3-4 se demuestra la exactitud con la cual realiza las mediciones el monitor de corriente y potencia, esto se logró mediante la calibración de los registros de corriente LSB y calibración, agregando también un factor de corrección para el caso del voltaje y corriente. Con el fin de obtener datos numéricos del error que presenta en el conjunto de mediciones, se realiza el siguiente análisis.

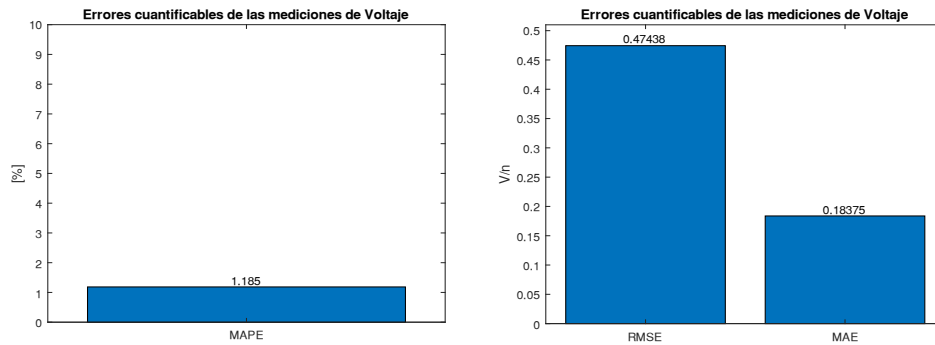


Ilustración 4-4: Error en la medición de un conjunto de valores de voltaje.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la Ilustración 4-4 se denota claramente como el coeficiente de determinación se acerca bastante a 1, lo cual es un indicador de buena relación de datos; el error medio absoluto porcentual es menos del 2% por medición, el error cuadrático medio es de ± 0.47 V/ número de medición y por último el error medio absoluto es del ± 0.18 V/ número de medición. Notándose que la medición de voltaje la realiza con una buena exactitud.

De igual manera se realizó el mismo procedimiento con las mediciones de corriente, los resultados se muestran en la Ilustración 5-4, donde n representa el número de muestras recolectadas a lo largo del experimento.

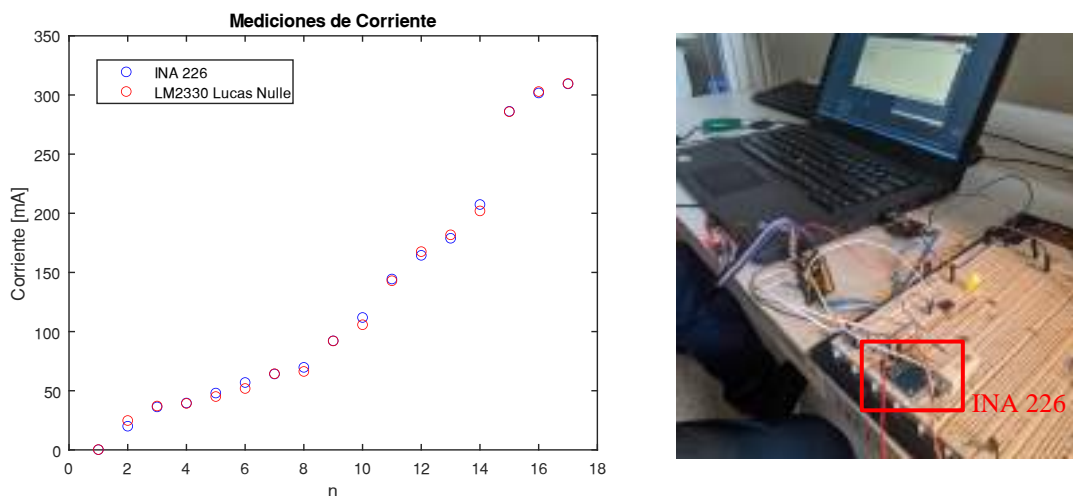


Ilustración 5-4: Izquierda, mediciones de corriente. Derecha, experimento realizado con el monitor de corriente y potencia INA 226.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la Ilustración 6-4 se presenta los resultados del análisis de índices de errores, obteniendo un error medio absoluto porcentual del 5.07 %, un error cuadrático medio de ± 3.05 mA/ número de medición y un error medio absoluto de ± 2.26 mA/número de medición; dando a notar en nivel de exactitud con el cual se realizaron las mediciones y posteriormente este error minimiza el error en el modelo relacional de irradiancia propuesto.

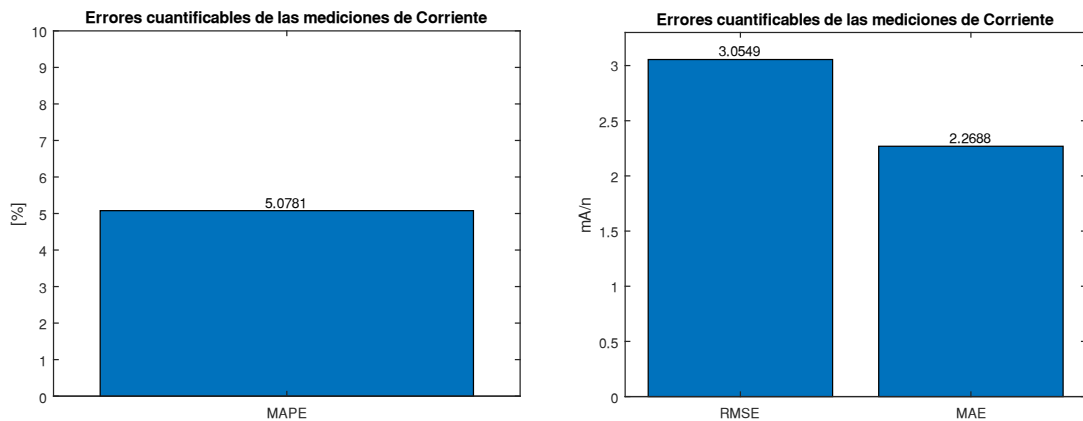


Ilustración 6-4: Índices de error en el conjunto de datos de medición de corriente.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Esta prueba tiene como finalidad comprobar la estabilidad del dispositivo medidor de potencia y corriente, en este sentido se pone a prueba el mismo realizando medidas de voltaje, corriente y potencia dentro de un intervalo de tiempo de 10 segundos en el cual se va a tomar el doble de muestras, debido a que el *script* programado realiza tomas cada 500 ms con el fin de verificar con más exactitud la variación de datos. La prueba consistió en poner el panel solar en una condición de cortocircuito, variando el reóstato de potencia a su mayor capacidad (1000 Ω). En la Tabla 1-4 se detallan los valores obtenidos y el respectivo análisis estadístico.

Estos datos fueron obtenidos mediante comunicación serial entre computadora y STM32, ya que este se comunica con el medidor mediante I2c, como se explicó en los anteriores capítulos. Al obtenerse un coeficiente de variación mucho menos del 15% se observa que la adquisición de datos según análisis de repetibilidad y reproductibilidad, es apropiada para la aplicación desarrollada.

Tabla 1-4: Datos enviados por el medidor de potencia y corriente INA 226,

No.	Fecha y hora	Voltaje [V]	Corriente [mA]	Potencia [mW]
1	04/06/2022. 15:23:16	0.548	109.4000	602.73
2	04/06/2022. 15:23:16	0.551	109.5000	602.73
3	04/06/2022. 15:23:17	0.551	108.5000	595.10
4	04/06/2022. 15:23:17	0.552	109.5999	610.36
5	04/06/2022. 15:23:18	0.551	109.4000	602.73
6	04/06/2022. 15:23:18	0.551	109.3000	602.73
7	04/06/2022. 15:23:19	0.551	109.5999	602.73
8	04/06/2022. 15:23:19	0.552	109.8000	610.36
9	04/06/2022. 15:23:20	0.553	110.0000	610.36
10	04/06/2022. 15:23:20	0.553	109.1999	602.73
11	04/06/2022. 15:23:21	0.543	109.4000	602.73
12	04/06/2022. 15:23:21	0.551	109.4000	602.73
13	04/06/2022. 15:23:22	0.551	109.4000	602.73
14	04/06/2022. 15:23:22	0.551	109.5000	602.73
15	04/06/2022. 15:23:23	0.553	110.5000	610.36
16	04/06/2022. 15:23:23	0.552	109.6999	602.73
17	04/06/2022. 15:23:24	0.55	109.6999	602.73
18	04/06/2022. 15:23:24	0.552	109.9000	602.73
19	04/06/2022. 15:23:25	0.543	108.3000	587.47
20	04/06/2022. 15:23:25	0.537	108.8000	587.47
Media aritmética		0.5498	109.4450	602.3485
Desviación estándar		0.0041	0.4946	6.2991
Coefficiente de variación		0.0074	0.0045	0.0104

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

4.1.3. *Correlación entre datos y ajuste de curva lineal*

Posterior a la recolección de datos, es necesario reconocer la relación que existe entre la irradiancia simulada y tanto la corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto producido por el panel solar; para este fin se presenta a continuación gráficas de dispersión en los diferentes niveles de temperatura promedio con la que se trabajó en el experimento.

El comportamiento de la radiación incidente y el voltaje de circuito abierto experimental, como se denota en la Ilustración 7-4 en círculos azules denota un crecimiento exponencial, por lo que

al caracterizar este comportamiento se consideró un ajuste de curva de tipo exponencial. Por otro lado, el comportamiento que describe la variación de radiación con respecto a la corriente de corto circuito, es mayormente lineal, por lo que se empleó una regresión lineal, pero antes se emplea una prueba estadística haciendo uso del coeficiente de correlación producto momento de Pearson (r), para asegurarnos de la fuerza de la relación lineal entre los valores cuantitativos estudiados.

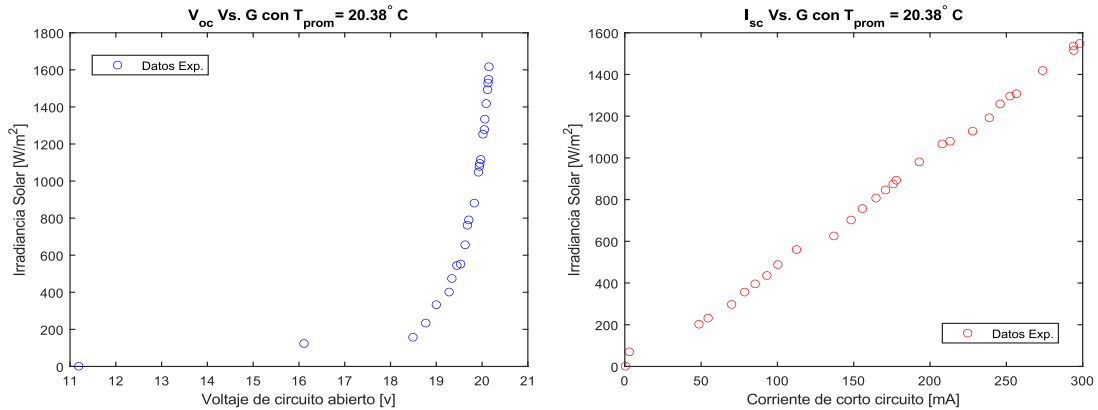


Ilustración 7-4: Relación entre voltaje e irradiancia (izq.) y corriente e irradiancia (der.).

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El proceso de calcular el coeficiente de correlación lineal r , concierne involucrar datos pareados (x , y) que en este caso serán los pares (I_{sc} , G), los datos empleados y cálculos necesarios se detallan en las tablas del ANEXO H y ANEXO I, con los cuales se resumió los principales resultados en la siguiente tabla.

Tabla 2-4: Coeficientes de correlación de Pearson en los diferentes niveles de temperatura

r	20.38° C	27.44° C	31.52° C	40° C
{I _{sc} , G}	0.9982	0.9982	0.9959	0.9976
{V _{oc} , G}	0.5099	0.6453	0.5018	0.6397

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Como se observa los valores del par {corriente de cortocircuito, irradiancia} muestran una correlación lineal significativa, mientras que en el par {voltaje de circuito abierto, irradiancia} no existe evidencia suficiente para sustentar una conclusión de una correlación lineal significativa. Consecuentemente se realizó una regresión lineal para los valores que mostraron una correlación lineal significativa, y para los que no se realizó un ajuste exponencial para observar el comportamiento a diferentes niveles de temperatura, los resultados en conjunto se muestran en la

siguiente Ilustración y los resultados individuales se los puede analizar en el ANEXO J y ANEXO K.

Según la Ilustración 8-4 el voltaje de circuito abierto disminuye cuando aumenta la temperatura, esto es más visible cuando la temperatura sobrepasa los 50°C pero en condiciones reales de exposición al sol la temperatura ligeramente sobrepasa los 40°C, como indica la ilustración de la derecha un aumento de temperatura en 19.62°C corresponde una disminución del voltaje en 2.47 V., mientras que en la ilustración de la izquierda se nota un pequeño aumento de corriente, mientras se eleva la temperatura, como se corrobora en la gráfica de la hoja de especificaciones.

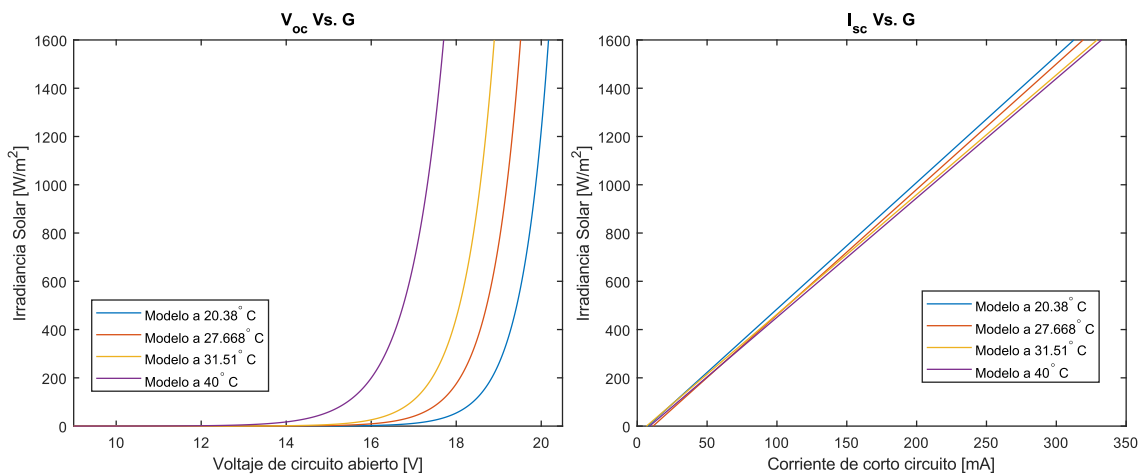


Ilustración 8-4: Ajuste exponencial (izq.) y ajuste lineal (der.) a los datos experimentales.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Como los datos obtenidos experimentalmente presentan gran semejanza a los datos del fabricante se puede trabajar con cualquiera de los dos modelos con el fin de obtener la radiación solar en función de la corriente o voltaje, en este trabajo se decidió continuar con la correlación lineal significativa comprobada, ya que este presenta menores complicaciones y menor consumo de recursos en cualquier sistema micro controlado.

En la Ilustración 9-4, se puede observar el diagrama de dispersión de los pares $\{I_{sc}, G\}$ comprendido con una variación de temperatura desde los 18°C hasta los 43°C, y la regresión lineal realizada sobre los datos.

En la Ecuación 1-4 se muestra el modelo matemático que representa el comportamiento de la irradiancia solar en función de la corriente de cortocircuito del módulo solar NPA5S-12H.

$$G = 5.168 \cdot I_{sc} - 46.24$$

Ecuación 1-4: Modelo de Irradiancia en dependencia de I_{sc} obtenido.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

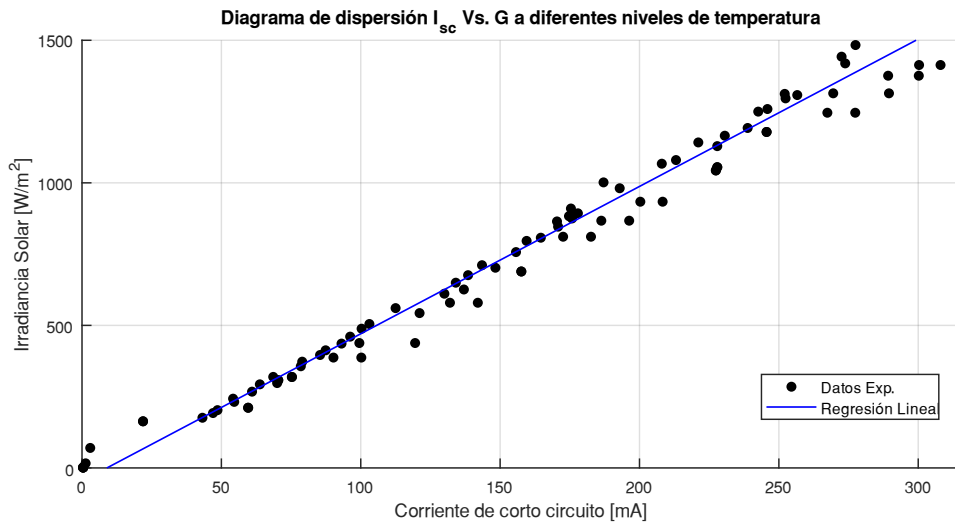


Ilustración 9-4: Diagrama de dispersión $\{I_{sc}, G\}$ del experimento realizado.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Cabe mencionar que la calidad del ajuste que MATLAB nos ofrece con relación al modelo lineal obtenido es de un coeficiente de determinación de 0.9826, un error cuadrático medio de $\pm 64.41 \text{ W/m}^2$ por mA y una suma de errores cuadráticos (SSE) de $4.232e+05$.

El error porcentual absoluto medio (MAPE), muestra el rendimiento del modelo desarrollado en términos de porcentaje y es independiente de la escala de trabajo. Mientras menos sea este error, mejor será el modelo, este indicador muestra la desviación absoluta media en porcentaje ya que calcula el error del valor real y el calculado mediante el modelo, es decir, nos muestra que tan alejado se encuentra el modelo con referencia a los valores reales.

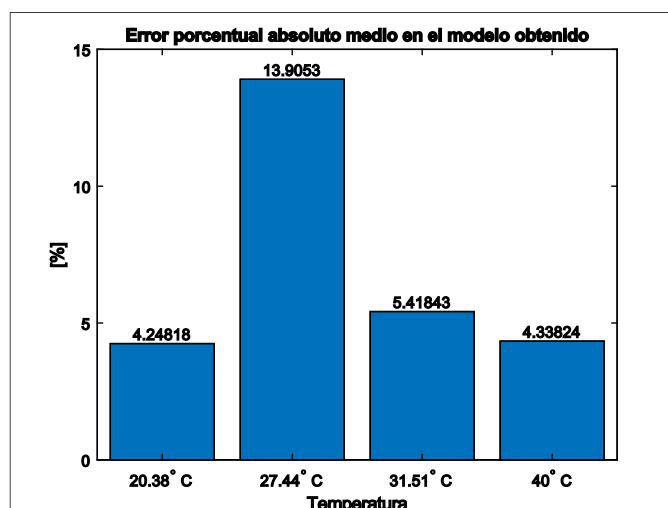


Ilustración 10-4: MAPE del modelo.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la Ilustración 11-4 se observa el MAPE para cada región de temperatura con la cual se consideró la dependencia del modelo, observándose un aumento del error al trabajar con temperaturas de aproximadamente 27°C. y 32°C. Por otro lado, se tiene el indicador de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), indicador que nos muestra la desviación del modelo con respecto al valor real, mientras menor sea este error mejor el modelo propuesto y su predicción o calculo. En la siguiente ilustración se muestra el resumen gráfico de RMSE, lo cual demuestra cual es la variación permisible de error en cada valor de temperatura.

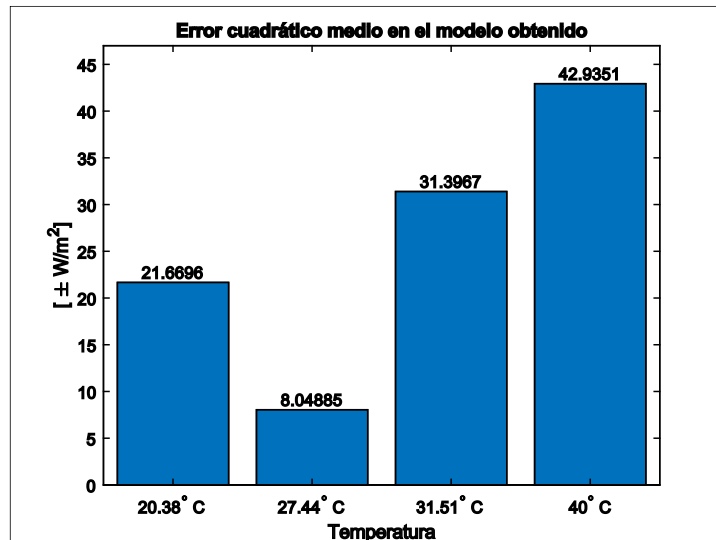


Ilustración 11-4: RSME del modelo obtenido.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Por último, el valor que nos permite calificar la exactitud del modelo es el valor relativo del RMSE, el cual es bien aceptado en la predicción de irradiancia solar como indicador de precisión. Mazorra-Aguilar y Díaz (2018, p. 177-178) con relación a datos de radiación solar ofrecida mediante datos satelitales, comentan que cambios en la ubicación y condiciones climáticas alteraran las desviaciones e incertidumbres en las mediciones de suelo significativamente, indicando que los errores reportados por las estaciones varían, en dependencia de lo mencionado, dentro de un rango desde 4 hasta un 34% del rRMSE promedio por hora.

Este trabajo muestra en la siguiente ilustración el análisis gráfico del rRMSE en cada rango de temperatura en estudio, observándose un error promedio 10.74%, el cual es calificado como bueno. Para valores del rRMSE menores al 10 % la exactitud del modelo resulta ser excelente, mientras que al trabajar con valores menores al 30 % la exactitud es equitativa. (Padhma, 2021)

De igual manera, en predicción de producción de energía FV, Kato (2016, p. 99) menciona que el RMSE relativo en 7 diferentes locaciones de US varían entre el 32 y 47%, considerando errores pequeños a los comprendidos entre el 20-25%.

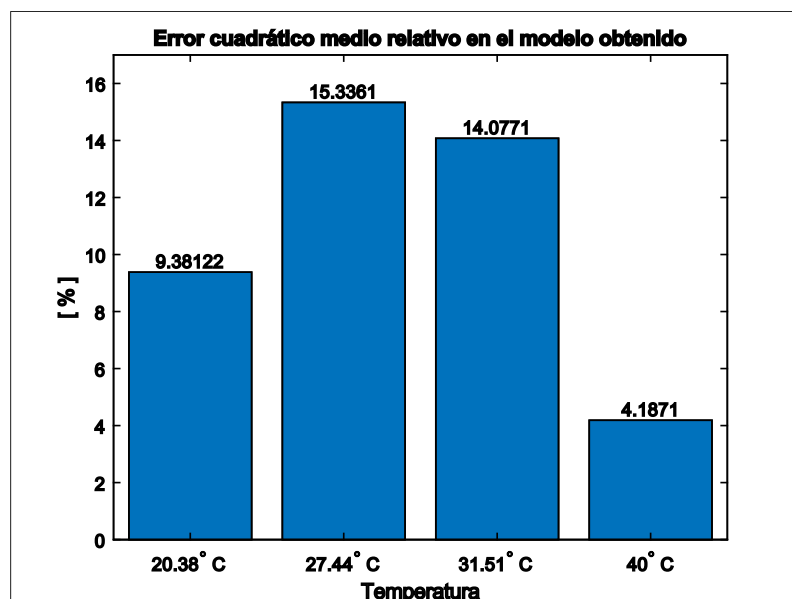


Ilustración 12-4: rRMSE del modelo desarrollado variando la temperatura.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

4.2. Pruebas de consumo de corriente

Como se muestra en la sección *Dimensionamiento del sistema FV autónomo*, los principales dispositivos que conforman el instrumento desarrollado incluyen modos de consumo de bajo corriente, considerando la autonomía energética del mismo, se le programó para que en reposo trabaje con el menor consumo de corriente continua. En este sentido el instrumento trabaja mediante un ciclo, que comienza cuando el ESP8266 es despertado por el reloj interno después de contar un cierto tiempo programado, este realiza los procesos mostrados en la Lógica de programación del instrumento recolector de datos y consecuentemente despierta al STM32 y el INA 226 mediante una interrupción externa, comenzando el ciclo de trabajo de estos componentes, una vez finalizado la recolección y transmisión de datos todos los elementos son puestos en modo de consumo de baja corriente, esperando al siguiente ciclo.

La prueba que se realizó sobre el instrumento sensor fue conectar un amperímetro DC entre la línea de alimentación de las baterías y del sistema de consumo de corriente. Para esta prueba se empleó un multímetro *Fluke 175* con una exactitud de $\pm(1.0\% + 3)$ y una resolución máxima de 0.01 mA. El tiempo en el que cumple un ciclo es aproximadamente 35 segundos, dentro de este intervalo de tiempo se registraron 45 variaciones de corriente en el multímetro, las cuales fueron registradas. El experimento puede ser observado en el ANEXO H.

En la Ilustración 13-4 se muestra el ciclo de consumo de corriente DC del instrumento desarrollado.

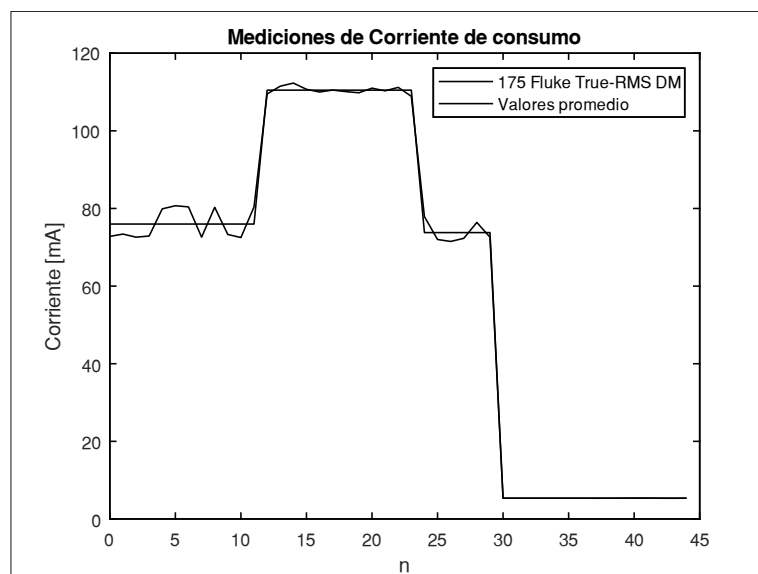


Ilustración 13-4: Ciclo de consumo de corriente.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Los valores promedio de corriente continua de consumo obtenida por el instrumento se detallan en la Tabla 5-4.

Tabla 3-4: Corrientes de consumo durante el ciclo de trabajo activo.

Corriente de consumo [mA]			
1er etapa	2do etapa	3ra etapa	4ta etapa
72.8	109.5	77.9	5.35
73.4	111.5	72.0	5.35
72.6	112.3	71.5	5.35
72.9	110.7	72.3	5.35
79.9	110	76.4	5.35
80.7	110.5	72.6	5.35
80.4	110.1		5.35
72.6	109.8		5.34
80.3	111.0		5.35
73.3	110.3		5.36
72.5	111.2		5.37
80.4	108.9		5.38
Valores promedio			
75.9833	110.4883	72.7833	5.3542

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Cabe mencionar que entre las 3 primeras etapas existe un tiempo de trabajo de alrededor de 25 segundos, mientras que la cuarta etapa donde el consumo de corriente es el mínimo se mantiene durante 15 minutos, hasta comenzar el siguiente ciclo, durante este intervalo de tiempo se aprovecha el recurso solar disponible y las baterías son cargadas.

4.3. Pruebas de autonomía energética

Con la finalidad de probar la autonomía eléctrica del instrumento se realizó un experimento, que consistió en poner en funcionamiento al sensor durante 5 días normalmente, y los demás días desconectar el voltaje dirigido a cargar las baterías, con esto ponemos a prueba el instrumento simulando las peores condiciones solares, es decir días que no haya suficiente fuente solar para cargar las baterías. El experimento resultó en 10 días de funcionamiento, donde se registró el valor de voltaje de las baterías cuando inicia del día (0:00:00) y cuando termina el día (23:00:00), obteniendo el índice de carga o descarga durante el día y su porcentaje con respecto al voltaje inicial. Además, se registró también la irradiancia solar promedio en el día de prueba, con la finalidad de relacionar la potencia solar con los índices de carga o descarga.

4.3.1. Pruebas de por día de carga / descarga

En la siguiente figura se puede observar el nivel de voltaje de las baterías a través del periodo de prueba comprendido desde el 24 de julio hasta el 02 de agosto, cabe mencionar que a partir del 29 de julio se desconectaron las baterías.

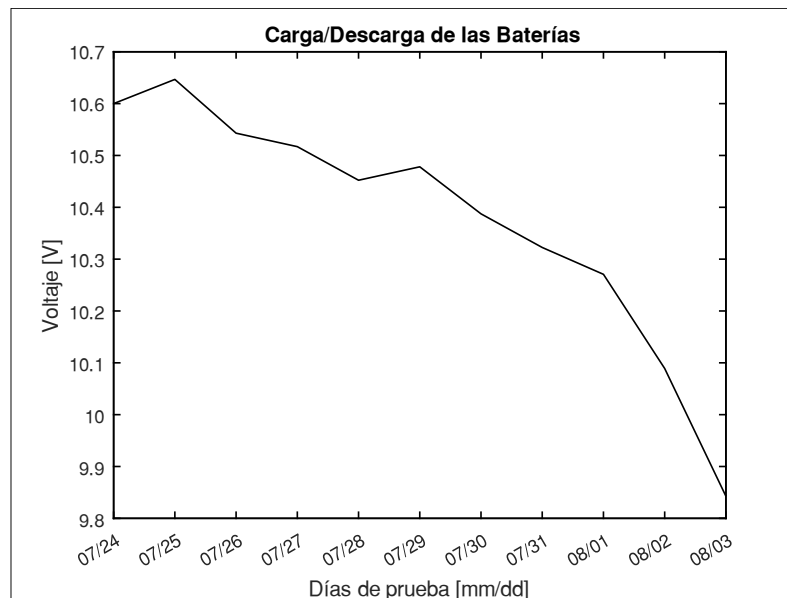


Ilustración 14-4: Carga/Descarga de las baterías a través del periodo de prueba.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la siguiente tabla se muestra el detalle numérico de la anterior ilustración.

Tabla 4-4: Índices de carga/descarga a lo largo de los días de prueba

Día	Irradiancia	Voltaje de la Batería [V]		Carga/Descarga	
	Promedio [W/m-2]	Inicio	Fin	[V]	[%]
24/07/2022	545.4819	10.6000	10.6597	0.0597	0.5632
25/07/2022	324.3185	10.6467	10.5560	-0.0907	-0.8519
26/07/2022	365.1569	11.0000	10.5170	-0.0260	-0.2466
27/07/2022	274.6178	10.5170	10.4522	-0.0648	-0.6161
28/07/2022	422.4700	10.4522	10.4781	0.0259	0.2477
29/07/2022	566.1399	10.4781	10.3874	-0.0907	-0.8656
30/07/2022	548.3505	10.3874	10.3235	-0.0639	-0.6151
31/07/2022	525.3314	10.3225	10.2836	-0.0389	-0.3768
01/08/2022	519.1141	10.2707	10.1150	-0.1557	-1.5159
02/08/2022	363.8654	10.0891	9.8427	-0.2464	-2.4422

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Con lo que se puede ver que el índice de carga en días con un promedio de irradiación solar promedio mayor a 400 W/m-2 es de 0.40 % sobre el nivel de batería inicial, lo que significa que un día soleado con un nivel de batería inicial de 10.56 al finalizar el día de carga se cargará en 42.24 mV. Por otro lado, en días con un promedio de irradiación solar menor a 380 W/m-2 el índice de descarga promedio de las baterías es aproximadamente de 0.572 % sobre el nivel de batería inicial.

De igual manera, con la prueba de autonomía se comprobó que, al quinto día de autonomía total, el índice de descarga crece en un 3 % aproximadamente sobre el índice de descarga inicial, lo cual indica una descarga significativa en relación a los días anteriores. Añadiendo los tres días con un promedio de radiación solar menor a 400 W/m-2, aproximadamente el instrumento tendría una autonomía de 7 días, en total descarga antes de entrar al punto de quiebre y descargase en su totalidad; cabe mencionar que el instrumento funciona correctamente hasta disminuir sobre los 5 V.

Las ilustraciones que presentan gráficamente la radiación solar medida por el instrumento desarrollado y el nivel de batería a lo largo de cada día del periodo de prueba, se muestran en el ANEXO M.

4.3.2. Pruebas de por horas de carga y noche de descarga

En esta prueba se realiza el análisis de los voltajes de carga y descarga durante el día y la noche, considerando que en la noche se espera una descarga de las baterías y se quiere saber el índice promedio de descarga por noche, mientras que en el día o en horas de iluminación solar las baterías son cargadas por la potencia solar disponible, pero existe el caso donde no se carguen debido a días nublados o de insuficiente potencia solar, para estos casos se desea saber el índice de carga y descarga por hora de claridad solar.

En la Tabla 5-4 se detalla el análisis realizado con los valores anteriormente presentados y añadiendo dos días más a las pruebas. En la misma las horas noche fueron consideradas desde las 19:00 del presente día hasta las 07:00 del día siguiente, sabiendo que en estas horas el consumo de corriente del instrumento es de aproximadamente de 4 mA y no existe voltaje de carga de parte del sistema de carga solar. Las horas día fueron consideradas desde las 7:00 hasta las 19:00 del presente día, sabiendo que el transcurso del día existe tres posibilidades, carga o descarga de las baterías y mantenerse en el mismo nivel. Los datos se comenzaron a registrar desde el 24 de julio y el análisis se detiene en el 5 de agosto del 2022.

Tabla 5-4: Voltaje en las baterías, analizados en horas noche y horas día.

Fecha	Horas Noche				Horas Día			
	Voltaje inicial	Voltaje Final	Voltaje de descarga	Índices de descarga	Voltaje inicial	Voltaje Final	Voltaje de carga	Índice de carga
24/07					10.6078	10.6727	0.0649	0.6118
25/07	10.6727	10.6338	0.0389	0.3645	10.6338	10.5170	-0.1168	-1.0984
26/07	10.5170	10.5170	0.0000	0.0000	10.5170	10.5170	0.0000	0.0000
27/07	10.5170	10.5041	0.0129	0.1227	10.5041	10.4781	-0.0260	-0.2475
28/07	10.4781	10.4392	0.0389	0.3713	10.4392	10.5041	0.0649	0.6217
29/07	10.5041	10.4522	0.0519	0.4941	10.4522	10.4003	-0.0519	-0.4965
30/07	10.4003	10.3485	0.0518	0.4981	10.3485	10.3355	-0.0130	-0.1256
31/07	10.3355	10.2966	0.0389	0.3764	10.2966	10.2966	0.0000	0.0000
01/08	10.2966	10.2058	0.0908	0.8818	10.2058	10.1669	-0.0389	-0.3812
02/08	10.1669	9.9724	0.1945	1.9131				
03/08	10.4522	10.3485	0.1037	0.9921	10.3485	10.3744	0.0259	0.2503
04/08	10.3744	10.2966	0.0778	0.7499	10.2966	10.5300	0.2334	2.2668
05/08	10.5300	10.4522	0.0778	0.7388	10.4522	10.6078	0.1556	1.4887

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022

En la anterior tabla se registran los datos del anterior experimento, donde se registre un índice de descarga por noche de 0.4770% sobre el nivel de voltaje inicial en condiciones normales y de 0.8327% en condiciones de carga solar desconectada, lo cual muestra que la descarga aumenta en casi el doble cuando las condiciones se mantienen en una descarga continua de las baterías. Mientras que en horas de iluminación solar muestra un índice de carga de 1,0478% sobre su voltaje inicial y de 0.4486 en día de insuficiente energía solar para cargar las baterías, similar al índice de descarga durante la noche.

4.4. Pruebas de transmisión, recepción y presentación de datos

Se puso a prueba el sensor y el sistema de visualización de datos, con el fin de observar si existen pérdidas de información durante la transmisión, recepción y presentación debidos a diversas causas; para lo cual se observó el funcionamiento del sistema durante 24 horas en el cual se debieron haber receptado 63 datos, considerando que se toman 4 datos por hora durante 13 horas de iluminación solar y 1 dato por hora durante 11 horas de oscuridad. En la siguiente ilustración se observa la presentación la página web, durante el periodo de esta prueba, a la cual se puede acceder con la dirección *solardata.esPOCH.edu.ec/solardata*.



Ilustración 15-4: Inicio de la página web que presenta los datos de radiación solar por día.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El envío de datos puede ser corroborado mediante un cliente MQTT configurado en la misma red de instalación de broker MQTT. Para esta prueba de trabajo con dos clientes MQTT, uno mediante un *script* de *Python* que recibe todos los mensajes de interés, voltaje de carga y hora y fecha de envío. El segundo cliente es una aplicación de escritorio en *Windows*, denominada *MQTT Explorer*, la cual nos ofrece una visualización gráfica de los datos de interés. En las siguientes ilustraciones se pueden observar ambos clientes que sirven para corroborar el envío de datos desde el sensor, como también los datos graficados por la aplicación web.



Ilustración 16-4: Cliente MQTT del broker solardata en la aplicación de prueba MQTT Explorer

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Como denota la Ilustración 16-4, para esta particular prueba se denota que la recepción y actualización de datos es deficiente, ya que solo presenta 15 datos de los 63 esperados, mostrando para otros días una mayor actualización y presentación de datos. Las ventajas de esta aplicación es su uso abierto hacia desarrolladores de aplicaciones y fácil presentación de datos desde un cliente MQTT, pero aun así perder el 74.20% de los datos enviados por el sensor en día es un alto costo.

Por otro lado, en la Ilustración 17-4 se presenta una parte de los datos recolectados por el *script* de *Python*, el cual presentó en su terminal 62 conjuntos de datos, representando una pérdida del 4.76% de datos en todo el día de la prueba, de los cuales 1 dato se perdió y 2 resultaron ser inválidos. Cabe mencionar que mediante este script se puede observar un dato adicional, el voltaje de carga de las baterías, el cual puede ser monitoreado en caso exista una descarga abrupta en el voltaje de las baterías.

Debido a los tiempos de demora en conexión a la red WiFi, al servidor MQTT, servidor NTP y al durante la recepción de datos desde el sistema de adquisición de datos, existe retrasos que hace que a primeras y últimas horas de día no se receipten los 4 datos como se esperaba, pero

considerando que a estas horas la radiación solar es sumamente baja, estos datos se pueden despreciar.

```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL JUPYTER
Time b'Fri Aug  8 08:40:38 2022\n'
Vltaje, V b'13.3095'
Sollardata/Corriente, mA b'0.1880'
Sollardata/Temperatura, C b'10.6504'
Sollardata/Irradiancia b'4.2733'
Sensor/Voltaje Batt b'18.7894'
Sensor/SLEEP MODE b'0'
Time b'Fri Aug  8 07:01:08 2022\n'
Vltaje, V b'13.3237'
Sollardata/Corriente, mA b'13.2560'
Sollardata/Temperatura, C b'20.3564'
Sollardata/Irradiancia b'38.6378'
Sensor/Voltaje Batt b'18.7894'
Sensor/SLEEP MODE b'0'
Time b'Fri Aug  8 07:10:08 2022\n'
Vltaje, V b'13.7775'
Sollardata/Corriente, mA b'20.3310'
Sollardata/Temperatura, C b'21.2090'
Sollardata/Irradiancia b'215.2549'
Sensor/Voltaje Batt b'18.7894'
Sensor/SLEEP MODE b'0'
Time b'Fri Aug  8 07:30:39 2022\n'
Vltaje, V b'12.8155'

```

Ilustración 17-4: Terminal de *Visual Studio Code*

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

ID	FECHA	CORRIENTE	TEMPERATURA	IRRADIANCIA	VOLTAJE BATT	SLEEP MODE
738	2022-08-08 00:04:41	0	0	0	20,8181	0
739	2022-08-08 00:07:28	0	0	0	20,8181	0
740	2022-08-08 00:10:17	0	0	0	20,8181	0
741	2022-08-08 00:13:06	0	0	0	20,8087	0
742	2022-08-08 00:15:55	0	0	0	20,7994	0
743	2022-08-08 00:18:44	0	0	0	20,7894	0
744	2022-08-08 00:21:33	0	0	0	20,7894	0
745	2022-08-08 00:24:22	0	0	0	20,7894	0
746	2022-08-08 00:27:11	0	0	0	20,7894	0
747	2022-08-08 00:30:00	0	0	0	20,7894	0
748	2022-08-08 00:32:49	0	0	0	20,7894	0
749	2022-08-08 00:35:38	0	0	0	20,7894	0
750	2022-08-08 00:38:27	0	0	0	20,7894	0
751	2022-08-08 00:41:16	0	0	0	20,7894	0
752	2022-08-08 00:44:05	0	0	0	20,7894	0
753	2022-08-08 00:46:54	0	0	0	20,7894	0
754	2022-08-08 00:49:43	0	0	0	20,7894	0
755	2022-08-08 00:52:32	0	0	0	20,7894	0
756	2022-08-08 00:55:21	0	0	0	20,7894	0
757	2022-08-08 00:58:10	0	0	0	20,7894	0
758	2022-08-08 01:00:59	0	0	0	20,7894	0
759	2022-08-08 01:03:48	0	0	0	20,7894	0
760	2022-08-08 01:06:37	0	0	0	20,7894	0
761	2022-08-08 01:09:26	0	0	0	20,7894	0
762	2022-08-08 01:12:15	0	0	0	20,7894	0
763	2022-08-08 01:15:04	0	0	0	20,7894	0
764	2022-08-08 01:17:53	0	0	0	20,7894	0
765	2022-08-08 01:20:42	0	0	0	20,7894	0
766	2022-08-08 01:23:31	0	0	0	20,7894	0
767	2022-08-08 01:26:20	0	0	0	20,7894	0
768	2022-08-08 01:29:09	0	0	0	20,7894	0
769	2022-08-08 01:31:58	0	0	0	20,7894	0
770	2022-08-08 01:34:47	0	0	0	20,7894	0
771	2022-08-08 01:37:36	0	0	0	20,7894	0
772	2022-08-08 01:40:25	0	0	0	20,7894	0
773	2022-08-08 01:43:14	0	0	0	20,7894	0
774	2022-08-08 01:46:03	0	0	0	20,7894	0
775	2022-08-08 01:48:52	0	0	0	20,7894	0
776	2022-08-08 01:51:41	0	0	0	20,7894	0
777	2022-08-08 01:54:30	0	0	0	20,7894	0
778	2022-08-08 01:57:19	0	0	0	20,7894	0
779	2022-08-08 02:00:08	0	0	0	20,7894	0
780	2022-08-08 02:02:57	0	0	0	20,7894	0
781	2022-08-08 02:05:46	0	0	0	20,7894	0
782	2022-08-08 02:08:35	0	0	0	20,7894	0
783	2022-08-08 02:11:24	0	0	0	20,7894	0
784	2022-08-08 02:14:13	0	0	0	20,7894	0
785	2022-08-08 02:17:02	0	0	0	20,7894	0
786	2022-08-08 02:19:51	0	0	0	20,7894	0
787	2022-08-08 02:22:40	0	0	0	20,7894	0
788	2022-08-08 02:25:29	0	0	0	20,7894	0
789	2022-08-08 02:28:18	0	0	0	20,7894	0
790	2022-08-08 02:31:07	0	0	0	20,7894	0
791	2022-08-08 02:33:56	0	0	0	20,7894	0
792	2022-08-08 02:36:45	0	0	0	20,7894	0
793	2022-08-08 02:39:34	0	0	0	20,7894	0
794	2022-08-08 02:42:23	0	0	0	20,7894	0
795	2022-08-08 02:45:12	0	0	0	20,7894	0
796	2022-08-08 02:48:01	0	0	0	20,7894	0
797	2022-08-08 02:50:50	0	0	0	20,7894	0
798	2022-08-08 02:53:39	0	0	0	20,7894	0
799	2022-08-08 02:56:28	0	0	0	20,7894	0
800	2022-08-08 02:59:17	0	0	0	20,7894	0

Ilustración 18-4: Recepción de datos en la base de datos, visto desde el servidor.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

La Ilustración 18-4 muestra la tabla de datos consultada desde el servidor Linux, donde se puede comprobar la recepción de datos, presenta el mismo número de datos que el anterior *script*, con la pérdida de un datos y 2 datos inválidos que no son registrados en la base de datos. Estos mismos datos sirven para graficar los mismos visualmente en la aplicación web, como se muestra en la siguiente ilustración.

La Ilustración 19-4 muestra la radiación solar procesada por el instrumento recolectado de una manera visual, en la página web desarrollada. Como se denota durante el día medido existió una alta variación de radiación, mayormente debido a la presencia de nubosidades en el cielo, lo que impide que la curva de la irradiancia solar durante el día siga una distribución normal.



Ilustración 19-4: Datos graficados en la aplicación desarrollada.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la siguiente ilustración se pueden observar la descarga de datos, dependiendo del intervalo de interés.



Ilustración 20-4: Descarga del reporte de datos seleccionando un rango de fechas.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El servicio de *phpMyAdmin* fue levantado sobre el servidor, y es posible acceder hacia el mediante la dirección <http://solardata.esPOCH.edu.ec:8080/phpmyadmin> sobre la red del servidor, especificando el usuario y la contraseña configurado en MySQL. La tabla DATA consta de 7 filas, el ID, la fecha de registro, la corriente, la temperatura, la irradiancia solar, el voltaje de las

baterías y el estado del modo de bajo consumo *sleep mode*. Este último nos indica si el instrumento entró o no en modo de consumo de baja corriente durante la noche, un 0 indica que el modo esta apagado y un 1 indica que el modo ha sido activado automáticamente, gracias a la lógica de programación que fue escrita en los microcontroladores. Esta información puede ser visualizada en la Ilustración 21-4.

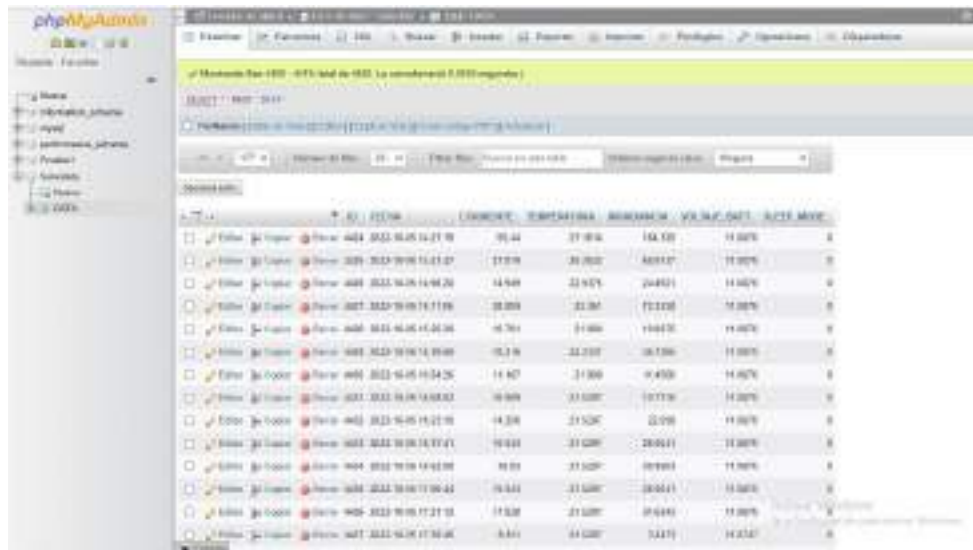


Ilustración 21-4: Interfaz de acceso de la base de datos *phpMyAdmin*

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

4.5. Pruebas de repetitividad del instrumento

La estabilidad del sistema en general se lo comprobó con una prueba de repetitividad durante 18 minutos de prueba, debido a que el sistema se demora 30 segundos en la conexión al servidor MQTT, NTP y WIFI y 30 segundos en la adquisición y envío de información desde el bloque de adquisición y procesamiento de información; durante este intervalo de tiempo se registró un total de 20 datos, con los cuales se realizó un análisis estadístico presentado en la Tabla 6-4. Las condiciones de prueba durante estos 18 minutos fueron en su mayoría constantes.

4.6. Pruebas de comparación y fidelidad de datos

Con el fin de obtener una comparativa entre el instrumento recolector de datos de irradiancia solar a partir de sensores de silicio y otros dispositivos que ofrecen la misma respuesta de irradiancia solar en W/m^2 , se realizó pruebas de funcionamiento y relación de datos que se detallan a continuación.

4.6.1. Pruebas con el medidor de potencia solar SM-206-SOLAR

Para esta prueba se destinó un día de prueba en el cual se realizaron un total de 15 tomas de irradiancia solar a diversas horas del día, registrando el valor tanto por SM-206-SOLAR como también por el instrumento desarrollado. El periodo de prueba comprende desde las 10 a.m. hasta las 4 p.m. del 23 de julio, 2022; las muestras fueron registradas aproximadamente cada media hora. En la Tabla 7-4 se muestra el los datos obtenidos y el análisis de error existente entre ambos datos.

Tabla 6-4: Repetitividad de datos en el instrumento desarrollado.

Hora:Min:Seg	Voltaje Baterías	Voltaje, V	Corriente, mA	Irradiancia	Temperatura
15:58:51	6.7596	9.1320	104.1000	420.8093	23.673
15:59:51	6.7578	9.1551	103.9000	419.9347	22.735
16:00:51	6.8082	9.2067	103.8000	419.4974	23.673
16:01:51	6.7654	9.1449	102.9000	415.5617	23.732
16:02:51	6.7727	9.2126	102.2000	412.5006	23.204
16:03:51	6.8082	9.2102	104.8000	423.8704	23.204
16:04:51	6.7563	9.1378	104.5000	422.5585	23.497
16:05:51	6.7693	9.1746	105.3000	426.0569	23.086
16:06:51	6.7823	9.1699	104.4000	422.1212	23.262
16:07:52	6.7823	9.2292	104.0000	420.3720	23.204
16:08:52	6.7174	9.2008	103.5000	418.1855	22.852
16:09:52	6.7563	9.0868	103.3000	417.3109	23.204
16:10:52	6.7693	9.1152	103.4000	417.7482	22.676
16:11:52	6.7434	9.1544	103.9000	419.9347	23.673
16:12:52	6.7693	9.1295	102.3000	412.9379	23.262
16:13:52	6.7304	9.0856	102.7000	414.6871	22.265
16:14:52	6.7823	9.1497	105.7000	427.8061	22.324
16:15:52	6.7563	9.1069	104.4000	422.1212	23.028
16:16:52	6.7563	9.1378	103.8000	419.4974	23.204
Promedio	6.7650	9.1550	103.8250	419.6067	23.1745
Variación estándar	0.02137	0.04034	0.88254	3.85934	0.42522
Coefficiente de variación	0.00316	0.00441	0.00850	0.00920	0.01835

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la Ilustración 22-4, se puede observar gráficamente los datos presentados en la Tabla 7-4, la cual presenta una buena relación con relación a los datos comparados entre la irradiancia solar obtenida mediante el instrumento desarrollado y el medidor de potencia solar SM206 SOLAR. Más adelante se procederá a realizar el análisis de métricas de error para determinar cualitativamente el error presente en esta comparación de datos.

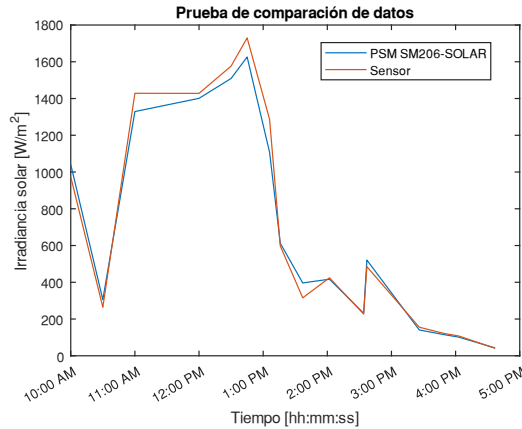


Ilustración 22-4: Prueba de comparación de datos.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

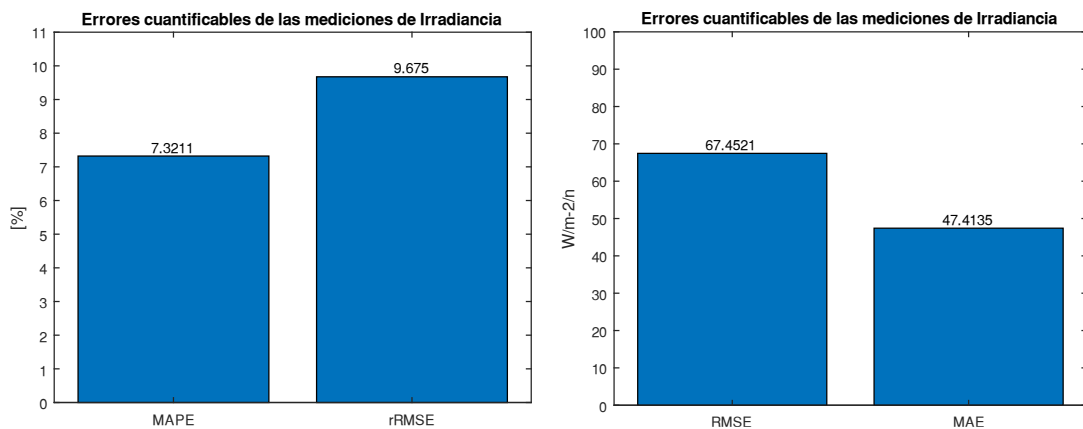


Ilustración 23-4: Cuantificación gráfica del análisis estadístico de errores

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la Ilustración 23-4 se resumen el resultado del estudio estadístico del error generado por la comparación del conjunto de datos presentados en la anterior tabla. El MAPE sugiere un error del 7,32 % mientras que el rRSME un error del 9,67 %, valores debajo del 10 % son catalogados como exactitudes excelentes (Padhma,2021). Mientras que en predicción solar mediante datos satelitales se presentan errores de tipo rRSME con valores rondando entre 17 % y 30 %. (Mazorra-Aguir y Díaz, 2018: pp. 177-183).

Tabla 7-4: Datos de la comparación realizada.

	Hora	SM-206-SOLAR	Sensor
n	[hh:mm:ss]	[W/m-2]	
1	10:00:00	1041.0	973.8670
2	10:30:00	305.3	264.2996
3	11:00:00	1329.1	1428.4403
4	12:00:00	1401.0	1428.0074
5	12:30:00	1509.2	1576.5013
6	12:45:00	1625.9	1729.7574
7	13:06:00	1107.3	1286.8733
8	13:16:00	612.5	597.6534
9	13:37:00	396.4	315.3850
10	14:02:00	416.8	424.4826
11	14:34:00	231.4	227.0679
12	14:37:00	520.9	485.1449
13	15:26	140.7	155.6349
14	15:49:00	115.4	121.8666
15	16:03:00	101.5	107.7500
16	16:37:00	42.6	40.4800

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

4.6.2. *Pruebas de radiación solar promedio*

A partir de esta prueba se va a trabajar con dos fuentes de información sobre radiación solar, una a nivel local la Red de Estaciones Meteorológicas (REM) del Grupo de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) propiedad del INAMHI; puntualmente se van a trabajar con datos de la estación meteorológica ESPOCH, comprendidos dentro del periodo del 24 de julio del 2022 hasta el 01 de agosto del 2022. Por otro lado, una fuente de información a nivel mundial de radiación solar con portal web radiaciónsolar.es/ es empleada en esta sección de la misma manera que la anterior fuente, con motivo de realizar un análisis comparativo y obtener indicadores de exactitud del sistema desarrollado en relación con los datos generados en el periodo de tiempo mencionado.

En la Ilustración 24-4 se observa gráficamente la Irradiancia solar promedio por día a lo largo de la semana de prueba, los valores puntuales pueden ser comprobados en la Tabla 8-4.

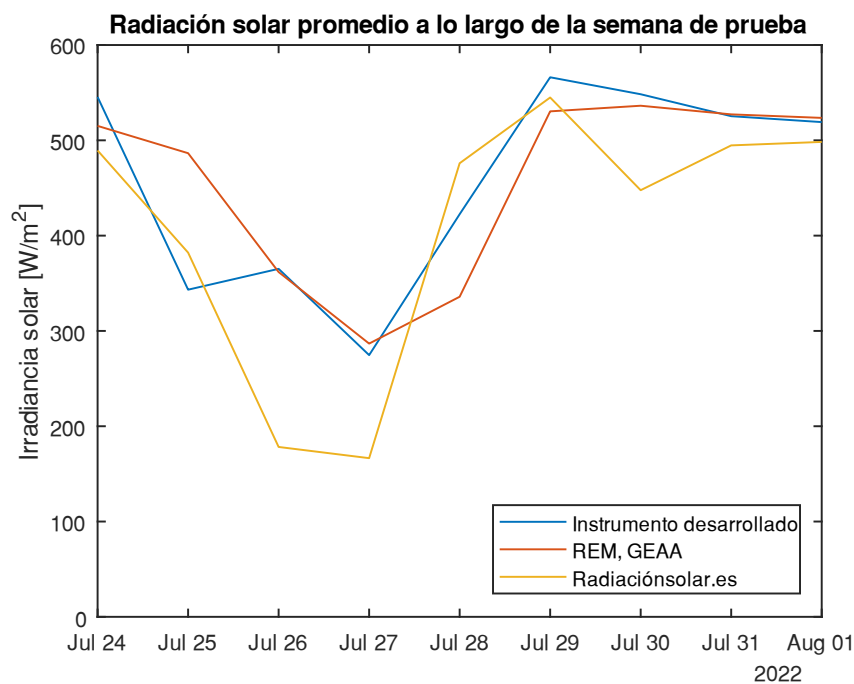


Ilustración 24-4: Radiación solar promedio en los días de prueba.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Tabla 8-4: Irradiancia solar promedio durante 9 días de prueba

Fecha [dd:mm:aa]	Irradiancia Promedio [W/m-2]		
	Sensor	REM, GEAA	Radiaciónsolar.es
24/07/2022	545.48191	515.12875	489.3414
25/07/2022	343.27230	486.47775	382.1667
26/07/2022	365.15696	361.79883	178.2500
27/07/2022	274.61784	286.69808	166.5000
28/07/2022	422.46996	335.85092	475.9494
29/07/2022	566.13993	530.38833	544.9167
30/07/2022	548.35058	536.29686	447.6667
31/07/2022	525.33145	527.23164	494.6667
01/08/2022	519.11419	523.54000	498.3333

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

De acuerdo al análisis estadístico de los datos ofrecidos, se observa que el instrumento desarrollado con respecto a los datos ofrecidos por la REM, GEAA ofrece un error MAE de ± 36.64 W/m-2 por día y un RMSE de ± 58.25 W/m-2 por día. Con respecto al error porcentual, el estudio mostró un 8.5% de MAPE y un 15% de RMSE relativo, siendo una exactitud buena. (Padhma, 2021)

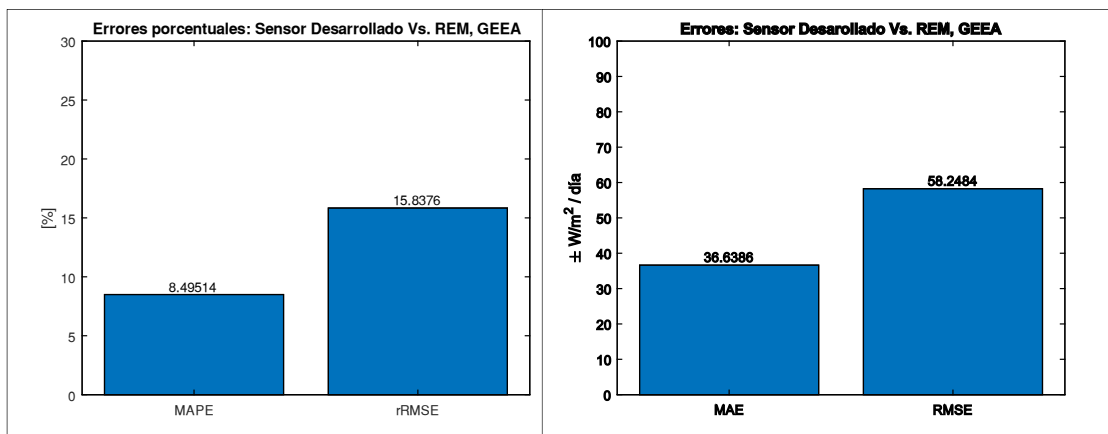


Ilustración 25-4: Errores cuantificables sobre los datos obtenidos y los sugeridos por la REM, GEAA.

Realizado por: Alarcón Maza; Kevin, 2022.

La otra fuente con la que se desea observar cuan buena es la exactitud del instrumento, es la página web radiaciónsolar.es que presenta un pronóstico de radiación solar previsto diariamente en la ciudad de Riobamba, basado en datos del portal web tutiempo.net. Los datos del pronóstico para los días de prueba, pueden ser observados en el ANEXO P. Este pronóstico se lo realiza considerando factores como ángulo de incidencia de radiación solar, previsión meteorológica, entre otros factores (TuTiempo.net, 2022).

La siguiente ilustración muestra los resultados del análisis de error con respecto al instrumento desarrollado y los datos presentados en radiaciónsolar.es. Se denota que el error es mayor que el anterior análisis con los datos sugeridos por la REM, GEAA.

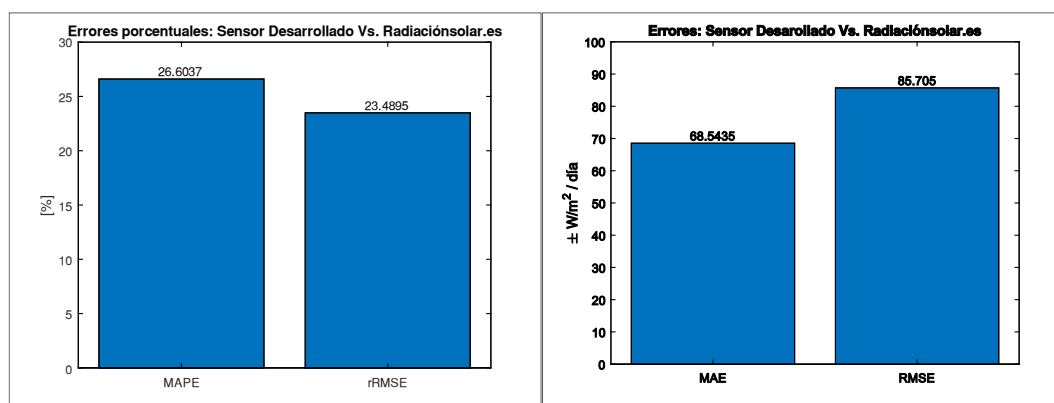


Ilustración 26-4: Errores con respecto al portal web radiaciónsolar.es.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El análisis de error porcentual muestra un error por debajo del 30%, lo cual es considerado como un rendimiento o exactitud equitativa, mientras que el error cuadrático medio sugiere un error de $\pm 85.54 \text{ W/m}^2$ por día.

4.6.3. Pruebas de radiación solar diaria

La siguiente prueba consiste en estudiar la exactitud del instrumento sensor de radiación solar con respecto al registro de datos por hora. En este estudio se va a trabajar con los datos presentados por la REM, GEAA, debido a que en el anterior análisis presentó un menor nivel de error.

La siguiente ilustración presenta la radiación solar a lo largo del 30 de julio del 2022, el séptimo día de prueba, a la misma se presentan tanto los datos registrados por el sensor y los datos de la REM, GEAA. Las demás gráficas concernientes al resto de días pueden ser observada a detalle en el Anexo L.

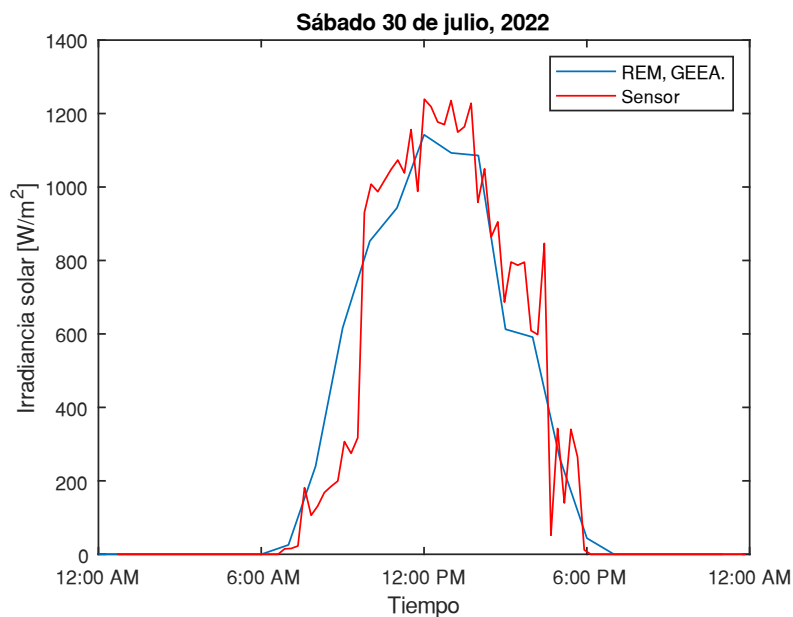


Ilustración 27-4: Radiación solar a lo largo del 30 de julio, 2022.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

En la ilustración el trazo en azul denota la radiación solar presentada por la REM, GEAA la cual registra sus datos cada hora puntualmente, mientras que el sensor desarrollado registra 4 datos por hora, produciendo una mayor sensibilidad ante las variaciones mayormente de nubes en el día, que obstaculice el aprovechamiento de la potencia solar disponible, por ello es visible las variaciones en el trazo de color rojo. Con la finalidad de comprobar la desviación de los datos registrados por el sensor de los datos de la REM, GEAA, se realiza el correspondiente análisis

estadístico. Las diversas tablas de datos empleadas para obtener el resultado estadístico de la Tabla 9-4 pueden ser observadas en el Anexo Q.

En la siguiente tabla se resume el análisis estadístico de los 9 días que se realizó la prueba, en el mismo se obtiene un valor de error promedio absoluto de $\pm 71,31 \text{ W/m}^2$ por hora, mientras que el error cuadrático promedio sugiere un error de $\pm 130,23 \text{ W/m}^2$ por hora de prueba. Se obtuvo un error porcentual del 25,73% (MAPE) y de 34,51% de error relativo RMSE.

Tabla 9-4: Errores promedio por hora de registro de datos del instrumento desarrollado.

Día	MAE [Wm-2]	MAPE [%]	RMSE [Wm-2]	rRMSE [%]
24/07/2022	35.5159	10.4409	50.3955	30.8221
25/07/2022	27.3536	21.3536	49.7421	30.2539
26/07/2022	67.7010	18.4745	99.2452	20.9543
27/07/2022	96.6092	67.3181	119.3127	47.9519
28/07/2022	49.1382	20.0926	311.2423	19.1481
29/07/2022	38.4054	18.1149	62.9607	19.1839
30/07/2022	55.3210	13.9483	71.9453	23.3727
31/07/2022	57.9354	19.5108	80.0008	62.2861
01/08/2022	213.805	42.3197	327.1927	56.6753
Promedio	71.3094	25.7303	130.2263	34.5164

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

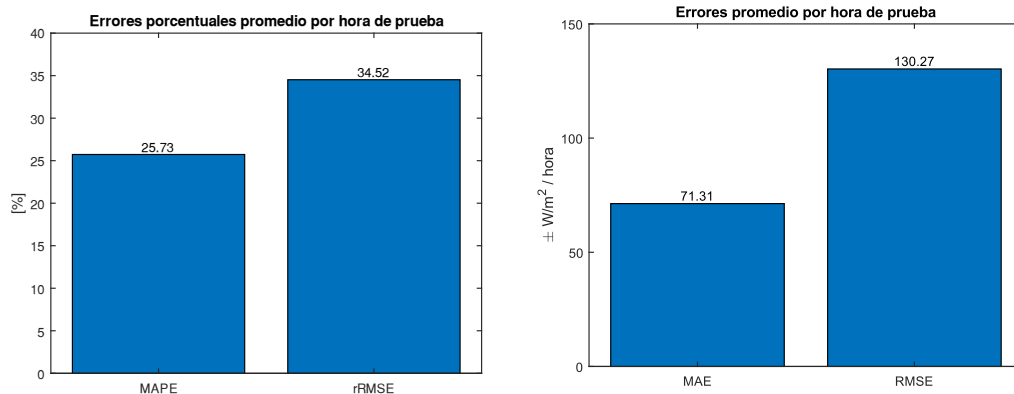


Ilustración 28-4: Errores promedio por hora de prueba del instrumento sensor de radiación solar.

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

Con respecto a la estimación de radiación solar con modelos ambientales de predicción numérica, se han presentado varios trabajos en la literatura la cual menciona que no muestran mucha desviación cuando se trata de días despejados, obteniendo errores de entre el 30-40% para

diferentes estaciones entre Europa, U.S.A. y Canadá, por lo que la estimación basada en el modelo numérico de este trabajo es considerada buena (Mazorra-Aguilar y Díaz, 2018, p. 172).

Hay que mencionar el error que existe con respecto a la variación de temperatura sobre el módulo solar por lo cual se presentan las gráficas de relación Irradiancia – Temperatura en el Anexo P, mostrando la estrecha relación entre estas dos variables y observándose que, a temperaturas bajas, el modelo presenta un cierto grado de error mayor al que se presenta con temperaturas elevadas.

4.7. Análisis económico del instrumento desarrollado

En la Tabla 10-4 se presenta el resumen y detalle de los gastos económicos empleados en el desarrollo y construcción del instrumento presentado en este Trabajo de Integración Curricular, dando como resultado del estudio un costo total de 280.82 dólares americanos. El análisis fue dividido en los diferentes bloques que comprende el instrumento, obteniendo que el bloque de adquisición comprende el 5.34 % del costo total, el bloque de procesamiento de la información comprende el 8,33%, el bloque de comunicación inalámbrica comprende un 2,85%, el bloque de almacenamiento y suministro de energía comprende el 11.73%, la fabricación de la carcasa y cableado en general consume un costo del 20,12% y por último los gastos mayores comprenden los costos de importación de algunos elementos, fabricación de la PCB y costos adicionales, representan un 51,63% del costo total.

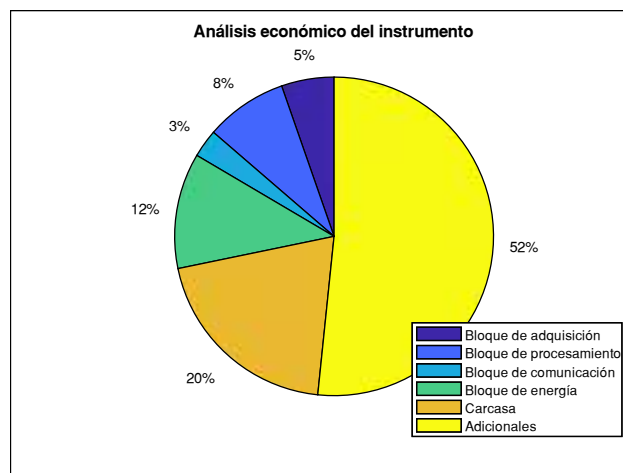


Ilustración 29-4: Resumen gráfico del análisis económico del instrumento

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

El costo del instrumento equivale al 272,64% del costo del SM206-SOLAR medidor digital de potencia solar, mientras que con respecto a un piranómetro de alta calidad marca *Subi Tek* el instrumento desarrollado representa apenas el 30.34% del costo total del piranómetro elaborado con alta tecnología, materiales de alta calidad y guiado por expertos. (Indiamart, 2022)

Tabla 10-4: Análisis económico del instrumento a detalle.

Bloques del instrumento	Componente	Cantidad	Costo (USD)
Adquisición de datos	INA 226	1	\$ 3.50
	MOSFET IRF540	1	\$ 1.25
	LM41	1	\$ 0.35
	Resistencias	4	\$ 0.50
	Panel solar	1	\$ 8.99
	Capacitores	2	\$ 0.25
	Diodos	3	\$ 0.15
Costo del bloque			\$ 14.99
Procesamiento de información	STM32F103C6T8	1	\$ 6.89
	FTDI FT323RL	1	\$ 4.50
	ST-LINK V2	1	\$ 12.00
Costo del bloque			\$ 23.39
Comunicación inalámbrica	ESP8266	1	\$ 7.99
Costo del bloque			\$ 7.99
Almacenamiento y suministro de energía	BMS 3S 10A	1	\$ 6.95
	Batería 18650	3	\$ 19.50
	Porta baterías	1	\$ 3.50
	MP 1584EN	2	\$ 3.00
Costo del bloque			\$ 32.95
Carcasa y cableado	Carcasa externa	1	\$ 45.50
	Cable par flexible #12 2 m	1	\$ 3.50
	Borneras y conectores MOLEX	22	\$ 7.50
Costo del bloque			\$ 56.50
Fabricación de la PCB			\$ 15.00
Costos de importación			\$ 30.00
Costos adicionales			\$ 100.00
COSTO TOTAL DEL INSTRUMENTO DESARROLLADO			\$ 280.82

Realizado por: Alarcón Maza, Kevin, 2022.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló un instrumento autosustentable que permite obtener mediciones indirectas y registro de datos de irradiancia solar basado en sensores de silicio, conformado de tres bloques compuestos de dispositivos sensores, una unidad micro controladora basado en procesadores Arm Cortex y tarjetas de comunicación inalámbrica con conexión WiFi incorporada.
- Se estudió el comportamiento de las variables en cuestión ($I - G$, $V - G$) en dependencia de la temperatura, con la finalidad de proponer un modelo estadístico que mejor se ajuste al comportamiento experimental. Por lo cual, se optó por desarrollar una regresión lineal de los datos experimentales de corriente de cortocircuito e irradiancia a diferentes niveles de temperatura, obtenido un modelo lineal con un R^2 de 0.9826 y un RMSE $\pm 64.41 \text{ W/m}^2$ por mA y un error RMSE relativo en promedio de 10.74 %.
- Se implementó el instrumento de medición indirecta de irradiancia solar a partir del modelo lineal obtenido, consiguiendo un consumo en estado de reposo de alrededor de 4 mA y en estado de trabajo de 152 mA, una autonomía de aproximadamente 7 días con un índice de descarga 0.572% en días nublados con irradiancia promedio menor a 380 W/m^2 y con un índice de carga de 1.0478% en días normalmente soleados.
- Se desarrolló la herramienta informática basado en una pila de servicios LAMP, instalados y configurados sobre un servidor Linux, que permite el registro y almacenamiento de los datos históricos de irradiancia solar recolectados por el instrumento sensor, siendo estos datos accesibles y descargables en formato .csv de utilidad para investigación relacionadas a la generación eléctrica renovable.
- Se evaluó la precisión de los datos obtenidos mediante análisis comparativo con datos provenientes de la estación meteorológica ESPOCH. El error cuadrático medio relativo determinó un 34,52 % de error en el registro por hora y un 15,83% en el registro promedio por día, mientras que con respecto al error absoluto medio, se obtuvo una desviación de $\pm 71.31 \text{ W/m}^2$ por hora de registro de datos y $\pm 36.64 \text{ W/m}^2$ por promedio diario de registro.
- El instrumento sensor de irradiancia solar desarrollado representa el 30.34% del costo de un piranómetro de alta calidad ofrecido en el mercado indio, sin considerar que este sensor no cuenta con características de autonomía energética, ni de automatización en el envío y registro de datos.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere estudiar el comportamiento del módulo solar ante variaciones de temperatura, considerando un ambiente cerrado y totalmente controlado, con el fin de promover la investigación dentro de este campo y asegurar un mejoramiento en el modelado y caracterización de celdas fotovoltaicas.
- Se debe considerar la incidencia del ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico con relación a la producción de corriente continua de cortocircuito e influencia en el modelo presentado, tomando en cuenta que los sistemas *solar tracking* mejoran considerablemente el rendimiento de la producción energética.
- Estudiar los diferentes modelos tanto estadísticos como predictivos que pueden mejorar los indicadores de error presentados en este trabajo, considerando que por ejemplo el modelo estadístico lineal puede ser reemplazado con una red de predicción neuronal, trabajando con más variables de entrada.
- Trabajar sobre eficiencia energética en sistemas fotovoltaicos en la ciudad de Riobamba, empleando los datos históricos recolectados y técnicas de *machine learning*, con la finalidad de ofrecer una alternativa sustentable y eficaz ante escasez de recurso petrolífero y promover la inclusión de parques fotovoltaicos en la institución previo análisis de potencial fotovoltaico en la localidad.

BIBLIOGRAFÍA

ALITOOOLS. *BMS 3s 10a Li-ion Battery protection board 18650 Charger Protection balancer PCB BMS 10A Module 12.6V equalizer board.* [en línea]. Alitools, 2020. [Consulta: 3 julio 2022]. Disponible en: <https://alitools.io/en/showcase/balansir-bms-3s-10a-li-ion-battery-protection-board-18650-charger-protection-balancer-pcb-bms-10a-module-12-6v-equalizer-board-4000886538934>.

ALLDATASHEET.COM. *LM35 Datasheet (PDF) - National Semiconductor (TI).* [en línea]. Electronic Components Datasheet Search, 2000. [Consulta: 3 julio 2022]. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8866/NSC/LM35.html>.

AMAZON. *ST-Link V2 USB Dongle Programador y depurador para STM8 STM32.* [en línea]. [Consulta: 3 julio 2022]. Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/ST-Link-Dongle-Programador-depurador-STM32/dp/B07B2K6ZPK>.

ARROZ, Guilherme; et al. *Computer architecture: digital circuits to microprocessors.* New Jersey: World Scientific, 2019. ISBN 978-981-323-833-6. QA76.9.C62 A77 2019, pp. 125-156.

BROWNSON, J.R.S. *Solar Energy Conversion Systems* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2014. [Consulta: 24 abril 2022]. ISBN 978-0-12-397021-3. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123970213000089>. pp. 199-235.

CALLEN, H.B. y CALLEN, H.B. *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics.* 2nd ed. New York: Wiley, 1985. ISBN 978-0-471-86256-7. QC311 .C25 1985

CENACE. *Gestión de la Institución.* [en línea]. Informe Anual. Quito: Operador Nacional de Electricidad, 2020. Disponible en: <http://www.cenace.gob.ec/informe-anual-2020/>.

CHEMISTRY. “Can static electricity damage solar cells?”. *Stack Exchange* [en línea]. [Consulta: 2 mayo 2022]. Disponible en: <https://chemistry.stackexchange.com/questions/113020/can-static-electricity-damage-solar-cells>.

CIRANI, Simone; et al. *Internet of things: architectures, protocols and standards.* First edition. Hoboken, NJ: Wiley. ISBN 978-1-119-35967-8. TK5105.8857 .C55 2019.

CRISWELL, D.R. “Solar Power via the Moon”. *The Industrial Physicist* [en línea]. S.l.: American Institute of Physics, 2022. [Consulta: 27 abril 2022]. Disponible en: <https://www.public.asu.edu/~gbadams/moonpower.pdf>.

CURLEY, R. *Renewable and alternative energy* [en línea]. New York: Britannica Educational Pub., in association with Rosen Educational Services, 2012. [Consulta: 29 abril 2022]. ISBN 978-1-61530-538-4. Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10465798>.

CUSHICÓNDOR COLLAGUAZO, Santiago. Estimación de irradiancia solar basada en modelos matemáticos y medición de variables eléctricas de paneles fotovoltaicos (Trabajo de titulación) (Grado de Ingeniería Eléctrica) [en línea]. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito, Ecuador. 2019. pp. 78-95. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20171>.

DIZDAREVIC, Jasenka; et al. *Survey of Communication Protocols for Internet-of-Things and Related Challenges of Fog and Cloud Computing Integration*. En: arXiv: 1804.01747, *ACM Computing Surveys*, vol. 51, no. 6, 2019. pp. 1-29. ISSN 0360-0300, 1557-7341. DOI 10.1145/3292674.

ELECTRÓNICA DIY. *Batería MOLICEL P26A 2600mA 35A*. [en línea]. Electronicadiy, 2022. [Consulta: 26 julio 2022]. Disponible en: <https://www.electronicadiy.com/products/bateria-molicel-p26a-18650-2600ma-35a>.

ENERDATA. *Global Energy Trends* [en línea]. 2021. S.l.: s.n. [Consulta: 29 abril 2022]. Disponible en: <https://www.flipsnack.com/enerdatamarketing/global-energy-trends-2021-edition.html>.

ESPRUINO. *INA226 Current/Voltage Measurement IC*. [en línea]. espruino.com, 2022. [Consulta: 3 julio 2022]. Disponible en: <https://www.espruino.com/INA226>.

FABARA, Cristian; et al. “Predicción de la Generación para un Sistema Fotovoltaico mediante la aplicación de técnicas de Minería de Datos”. *Revista Técnica «Energía»* [en línea], vol. 16, no. 1 (2019). [Consulta: 22 abril 2022]. ISSN 2602-8492, 1390-5074. DOI 10.37116/revistaenergia.v16.n1.2019.337. Disponible en: <http://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/337>.

FLORES FIALLOS, Juan José & RODRÍGUEZ GUAMBO, José Israel. Implementación de un sistema de adquisición de datos de temperatura, radiación y humedad de un panel solar de tubos al vacío para el estudio de la energía solar aprovechable en la ciudad de Riobamba. (Trabajo de Titulación) (Grado de Ingeniería Mecánica) [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica. Riobamba-Ecuador. 2015. pp. 60-110 [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/4652>.

FOSTER, J. *Realism and the climate crisis: hope for life*. Bristol: Bristol University Press, 2022. ISBN 978-1-5292-2326-2. 363.73874

FRAAS, L.M. “History of Solar Cell Development. En: L.M. FRAAS”, *Low-Cost Solar Electric Power* [en línea]. Cham: Springer International Publishing, 2014. pp. 1-12. [Consulta: 2 mayo 2022]. ISBN 978-3-319-07529-7. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-07530-3_1.

FRAGA, M.A; et al. *Sustainable material solutions for solar energy technologies: processing techniques and applications*. Amsterdam: Elsevier. Solar cell engineering, 2014. ISBN 978-0-12-821592-0.

GAËTAN, M. & IZUMI, K. *Trends in Photovoltaic Applications 2021*. [en línea]. Reporte. Sweden: International Energy Agency, 2021. IEA-PVPS T1-41:2021. Disponible en: https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2021/.

GORJIAN, S. & EBADI, H. “Introduction”. *Photovoltaic Solar Energy Conversion* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2021. pp. 1-26. [Consulta: 2 mayo 2022]. ISBN 978-0-12-819610-6. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128196106000016>.

GPCET. *Embedded Communications Protocols and internet of Things*. [en línea]. India: s.n., 20221. [Consulta: 11 mayo 2022]. Disponible en: <http://www.gpcet.ac.in/wp-content/uploads/2018/08/UNIT-V.pdf>.

HANKINS, M. *Stand-alone solar electric systems: the Earthscan expert handbook for planning, design, and installation*. London ; Washington, DC: Earthscan, 2010. ISBN 978-1-84407-713-7. TK1087 .H36 2010

HERSENT, Olivier. *The internet of things: key applications and protocols*. Chichester, West Sussex: Wiley, 2012. ISBN 978-1-119-99435-0. TH6012 .H47 2012

IEA. *Electricity Market Report*. [en línea]. Reporte.2021. S.l.: [Consulta: 29 abril 2022]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-july-2021>.

INDIAMART. “Pyranometer”. *indiamart.com* [en línea].2022 [Consulta: 5 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.indiamart.com/proddetail/pyranometer-21614065791.html?pos=3&pla=n>.

INDIAN RAILWAYS. *Handbook on study of data logger report*. [en línea]. India: Government of India, 2015. [Consulta: 11 mayo 2022]. Disponible en: <https://rdso.indianrailways.gov.in/works/uploads/File/Handbook%20on%20study%20of%20Data%20logger%20reports.pdf>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Resources to reserves 2013: oil, gas and coal technologies for the energy markets of the future*. Paris: OECD/IEA, 2013. ISBN 978-92-64-08354-7.

JARA, J. *Solar photovoltaic potential to complement hydropower in Ecuador: A GIS-based framework of analysis* [en línea]. Master Thesis in Geographical Information Science nr 92. Sweden: Lund University, 2018. [Consulta: 22 abril 2022]. Disponible en: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=8962977&fileOId=8962979>.

JARA, J. *Potencial solar fotovoltaico del Ecuador*. [en línea]. Ecuador: Corporación Eléctrica del Ecuador, 201. [Consulta: 22 abril 2022]. Disponible en: https://www.centrosur.gob.ec/wp-content/uploads/2021/08/1-20210719-Solar_FV_AEERE_UDA-Jos%C3%A9-Jara.pdf.

JOSLIN. “Regulador MP1584EN Step-down”. *Joslin Sac* [en línea]. 2022. Disponible en: <https://joslinperu.com/product/regulador-mp1584en-step-down/>.

KALOGIROU, S. *Solar energy engineering: processes and systems*. Burlington, MA: Elsevier/Academic Press, 2009. ISBN 978-0-12-374501-9. TJ810 .K258 2009

KATO, T. “Prediction of photovoltaic power generation output and network operation”. *Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems* [en línea], 2016, S.l.: Elsevier, pp.

77-108. [Consulta: 3 agosto 2022]. ISBN 978-0-12-803212-1. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128032121000040>.

LABORATORY NRE. Best Research-Cell Efficiency Chart. *Photovoltaic Research* [en línea]. 2020. [Consulta: 1 mayo 2022]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.

LABOURET, A. & VILLOZ, M. *Solar photovoltaic energy*. Stevenage: Institution of Engineering and Technology. IET renewable energy series, 9, 2010. ISBN 978-1-84919-154-8. TK1087 .L3313 2010

LLAMAS, L. Programar arduino mini pro con conversor FTDI FT232R. *Luis LLamas* [en línea]. 2016. [Consulta: 3 julio 2022]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/programar-arduino-mini-pro-conversor-ftdi-ft232r/>.

MANCILLA-DAVID, Fernando; et al. “A Neural Network-Based Low-Cost Solar Irradiance Sensor”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 3, 2014, pp. 583-591. ISSN 0018-9456, 1557-9662. DOI 10.1109/TIM.2013.2282005.

MAZORRA-AGUIAR, L. & DÍAZ, F. “Solar Radiation Forecasting with Statistical Models”. En: R. PEREZ (ed.), *Wind Field and Solar Radiation Characterization and Forecasting* [en línea]. Cham: Springer International Publishing, Green Energy and Technology, 2018, pp. 171-200. [Consulta: 3 agosto 2022]. ISBN 978-3-319-76875-5. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-76876-2_8.

MERCALDO, L.V. & DELLI VENERI, P. “Silicon solar cells: materials, technologies, architectures”. *Solar Cells and Light Management* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2020, pp. 35-57. [Consulta: 2 mayo 2022]. ISBN 978-0-08-102762-2. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081027622000021>.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. La demanda eléctrica del Ecuador aumentó en un 8,13%. [en línea] 2021. [Consulta: 29 abril 2022]. Disponible en: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/la-demanda-electrica-del-ecuador-aumento-en-un-813/#:~:text=En%20Ecuador%2C%20de%20enero%20hasta,incidieron%20para%20registrar%20este%20incremento.>

MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES. *Plan Maestro de Electricidad*. [en línea]. Quito: [Consulta: 29 abril 2022], 2019. Plan Maestro. Disponible en: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>.

MPS. *MP1584 3A, 1.5MHz, 28V Step-Down Converter* [en línea]. 8 agosto 2021. S.l.: s.n. . 2021. Disponible en: https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP1584EN-LF-Z/document_id/204.

MURPHY, R. *The Fossil-Fuelled Climate Crisis: Foresight or Discounting Danger?* [en línea]. Cham: Springer International Publishing, 2021. [Consulta: 25 abril 2022]. ISBN 978-3-030-53324-3. Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-53325-0>.

NAYLAMP. “WEMOS D1 MINI ESP8266 WIFI”. *Naylamp Electronics* [en línea]. 2021. [Consulta: 3 julio 2022]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/291-wemos-d1-mini-esp8266-wifi.html>.

OLADE. *Situación del consumo energético a nivel mundial y para América Latina y el Caribe (ALC) y sus perspectivas*. [en línea]. 2021. Quito: Disponible en: <https://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/06/Situacion-del-consumo-energetico-a-nivel-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC-y-sus-perspectivas.pdf>.

ORDOÑEZ, F. & VACA, D. *Mapa Solar del Ecuador* [en línea]. Atlas. Quito, 2020. [Consulta: 26 abril 2022]. Disponible en: <https://www.epn.edu.ec/mapa-solar-del-ecuador/>.

ORSETTI, C.; et al. “Reliable and Inexpensive Solar Irradiance Measurement System Design”. *Procedia Engineering*, vol. 168, 2016 pp. 1767-1770. ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2017.02.001.

PADHMA, M. “End-to-End Introduction to Evaluating Regression Models”. *Analytics Vidhya* [en línea], 2021. [Consulta: 3 agosto 2022]. Disponible en: https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/10/evaluation-metric-for-regression-models/#h2_8.

PETRECCA, G. *Energy conversion and management*. New York: Springer, 2014. ISBN 978-3-319-06559-5.

PILLAJO, Roberto. Diseño e implementación de un sistema instrumental para el monitoreo de irradiancia horizontal global e irradiancia horizontal difusa para la estimación de irradiancia

normal directa (Trabajo de Titulación) (Tesis de grado de Electrónica y Control). [en línea]. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito – Ecuador. 2021. pp. 56 – 91. [Consulta: 28 abril 2022]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22012>.

PLACKO, D. *Fundamentals of instrumentation and measurement*. London: ISTE Ltd. Instrumentation and measurement series, 2007. ISBN 978-1-905209-39-2.

QAZI, S. “Fundamentals of Standalone Photovoltaic Systems”. *Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2017. pp. 31-82. [Consulta: 9 mayo 2022]. ISBN 978-0-12-803022-6. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128030226000022>.

RICHHARIYA, Getnam: et al. “Solar cell technologies”. *Photovoltaic Solar Energy Conversion* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2020, pp. 27-50. [Consulta: 1 mayo 2022]. ISBN 978-0-12-819610-6. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128196106000028>.

SAHA, K. *The earth's atmosphere: its physics and dynamics*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-78426-5. QC861.3 .S24 2008

SATPATHY, R. & PAMURU, V. “Off-grid solar photovoltaic systems”. *Solar PV Power* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2021a, pp. 267-315. [Consulta: 9 mayo 2022]. ISBN 978-0-12-817626-9. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128176269000071>.

SAYIGH, A.A.M. & BACKUS, C. *Solar energy engineering*. New York: Academic Press, 1977. ISBN 978-0-12-620850-4. TJ810 .S623

SMITH, Z.A. & TAYLOR, K.D. *Renewable and alternative energy resources: a reference handbook*. Santa Barbara, Calif: ABC-CLIO. ABC-CLIO's contemporary world issues series, 2008. ISBN 978-1-59884-089-6. TJ808.3 .S65 2008

SORRELL, S. “Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, 2015, pp. 74-82. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2015.03.002.

ST. *STM32F103x8* [en línea]. marzo 2022. S.l.: s.n. [Consulta: 3 julio 2022]. Disponible en: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>.

STOFFEL, T. “Terms and Definitions”. *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2013, pp. 1-19. [Consulta: 23 abril 2022]. ISBN 978-0-12-397177-7. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123971777000012>.

TESTER, J.W.; et al. *Sustainable energy: choosing among options*. Cambridge, Mass: MIT Press, 2005. ISBN 978-0-262-20153-7. TJ808 .S85 2005

TIUPUL, P. & AREVALO, M. *Boletín Metereológico Marzo 2022*. [en línea]. Riobamba. [Consulta: 22 abril 2022]. Disponible en: https://www.esPOCH.edu.ec/index.php/component/k2/item/download/1579_0216226315d9ad627326d3719cd380fe.html.

TOLOCKA, E. Primeros pasos con la STM32 Blue Pill. *profe Tolocka* [en línea]. [Consulta: 3 julio 2022]. Disponible en: <https://www.profetolocka.com.ar/2021/04/12/primeros-pasos-con-la-stm32-blue-pill/>.

TUTTIEMPO.NET. *Radiación solar en Riobamba*. [en línea]. [Consulta: 4 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.tuttempo.net/radiacion-solar/riobamba.html>.

UNIT. “BMS 3S 10A Balanceador Carga de Baterías”. *UNIT Electronics* [en línea]. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/cargador-para-paquete-de-3-baterias-de-litio-10a-bms/>.

USHER, M.J. & KEATING, D.A. *Sensors and Transducers* [en línea]. London: Macmillan Education UK, 1996. [Consulta: 11 mayo 2022]. ISBN 978-0-333-60487-8. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-349-13345-1>.

VILLACÍS, J. & NETO, E. Análisis de la eficiencia energética de una estación fotovoltaica con un sistema de adquisición de datos de parámetros eléctricos y ambientales en la ESPE (Trabajo de Titulación) (Tesis de grado) [en línea]. Escuela Superior Politécnica del Ejército, Facultad de Informática y Electrónica. Sangolquí – Ecuador. 2015. [Consulta: 22 abril 2022]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10299>.


WILCOX, S.M. & MYERS, D.R., 2008. *Evaluation of Radiometers in Full-Time Use at the National Renewable Energy Laboratory Solar Radiation Research Laboratory*. [en línea]. S.l.: [Consulta: 23 abril 2022]. NREL/TP-550-44627, 946331. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/946331-7wa2rg/>.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO No. 8)*. Geneva 2, Switzerland: s.n, 2018.

ZEKRY, Abdelhalim; et al. “Solar Cells and Arrays”. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies* [en línea]. S.l.: Elsevier, 2018, pp. 3-56. [Consulta: 25 abril 2022]. ISBN 978-0-12-812959-3. Disponible en:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128129593000010>.

ANEXOS

ANEXO A: HOJA DE DATOS DEL MÓDULO SOLAR NPA5S-12H



NPA5S-12H

Monocrystalline Module

30 Cell

Monocrystalline Module

5W


Power Output


22.9%

Module Efficiency

5%


Power Tolerance






High Efficiency

Module Efficiency improved through advanced cell technology and manufacturing capabilities




High Performance Cost Ratio

Provide industry advanced cell technology and qualified materials at affordable prices



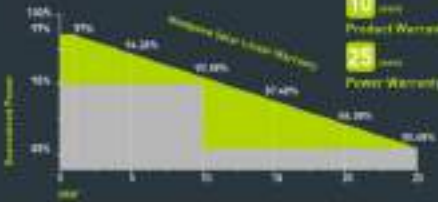
Efficient Sorting Process



System output maximized by reducing mismatch losses up to 2% with modules sorted & packaged by ampereage



Highly Reliable

Gold encapsulation and diffusion barriers provides long term protection against PID damage. Built to handle 1,400 Pa of front load, rear wide 2,400Pa (Hailstone Test at 1.375 inches in diameter falling at terminal velocity through the sky)

<p>Product Certificate: IEC 61215, IEC 61730</p> <p>Management Certificate: ISO 9001: 2015</p> <p>Other certificate: Fire Rating Class C, TÜV Rheinland</p> <p>Positive mechanical load: >5400Pa</p> <p>Positive Power Tolerance: 0-+5W</p> <p>Warranty: 25-year Linear Power Warranty</p>	<p style="text-align: center; font-weight: bold;">Performance Warranty</p>  <p style="font-size: 8px;"> 10 years Product Warranty 25 years Power Warranty </p>
---	---

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

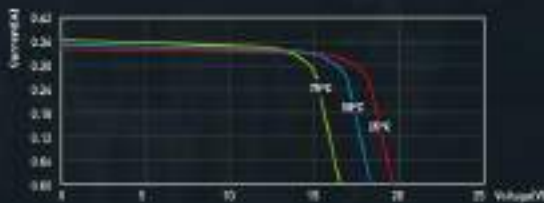
Type	NP435-120
Power Output (W)	9W
Voltage MPP (Voc)(V)	14.77V
Current MPP (Imp)(A)	0.32A
Voltage Open Circuit (Voc)(V)	19.00V
Short Circuit Current (Is)(A)	0.33A
Temperature Coefficient (Voc)	-30.13mV/°C
Temperature Coefficient (Imp)	13.965±0.015%/°C
Temperature Coefficient (Power)	-18.5±0.05%/°C
NOCT (Air 25°C, Sun 800W/m ² wind 1m/s)	47±2°C

© 2017 Newpowa Inc. All rights reserved. All other trademarks are the property of their respective owners.

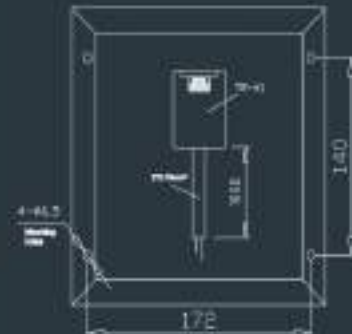
MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cells	Monocrystalline Silicon
Solar Cells Grade	Class A High Efficiency
Module Dimension (mm)(in.)	210(8.27) x 195(7.68) x 18(0.71)
Weight (kg)(lb)	0.96(1.16)
Packing Information (mm)(in.)	200(7.87) x 220(8.66) x 220(8.66) (11 pcs/crate)

I-V CURVES (Irradiance: AM1.5, 1km/m²)



*Specifications subject to technical changes and without notice. NEWPOWA reserves the right of final interpretation.



702-628-7600



sales@newpowa.com



www.newpowa.com



3633 Inland Empire Blvd, Ste 605, Ontario, CA 91764

ANEXO B: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MEDIDOR DE ENERGÍA SOLAR DE PRECISIÓN DIGITAL SM206.

III Specifications

- *Resolution: 0.1W/m², 0.1 Btu/(ft²-h)
- *Error range: ± (10%R+2dgts) R:readings
- *Temperature error: ±0.38W/m² / °C
[±0.12 Btu/(ft²-h)/°C] deviation at 25°C
- *Display: 4-1/2 LCD display,
maximum displayed numerical value 19999,
over load "OL"
- *Drift: < ±1.5% /year
- *Measuring range: 0.1~1999.9 W/m²,
0.1~1999.9 Btu/(ft²-h)
- *Wave length range: 340~1100nm; Incidence
Angle normal direction less than ±45 degree;
peak wavelength 900nm
- *Sampling time:2.5/s
- *Operation temperature and humidity:
0°C to 40°C <80%RH
- *Storage temperature and humidity:
-10°C to 50°C <70%RH
- *Dimensions and weight:
132(L)x60(W)x38(H)mm
- *Weight: approx. 150g
- *Battery needed: 9V 6F22 battery
- *Battery operation life: Approx. 100 hours

— 2 —

SOLAR POWER METER INSTRUCTION MANUAL



As this device is an intellectual precise measurement apparatus, it is very important that you read through these instructions before using this device.

I Overview

Thank you for selecting our product. Before using this meter, please carefully read this Manual. It will instruct you on correct operation methods and simple examination and handling essentials so you can benefit from its advantages.

This meter is a precision instrument for measuring light intensity. It is used in solar radiation measurement, solar research, physical and optical experiments, meteorology, and agriculture. It can also be used to measure glass light intensity to verify glass properties. For example: Measurement of light intensity through vehicle windows.

II Features

- *Selectable from two units:W/m² and Btu
- *4-1/2 digital display
- *Data retention function
- *Wide measure range without adjustment

— 1 —

IV Description of the display (Fig.1)

1. Value retention symbol
2. Displayed data
3. Low voltage symbol
4. English unit Btu/(ft²-h)
5. Metric unit W/m²

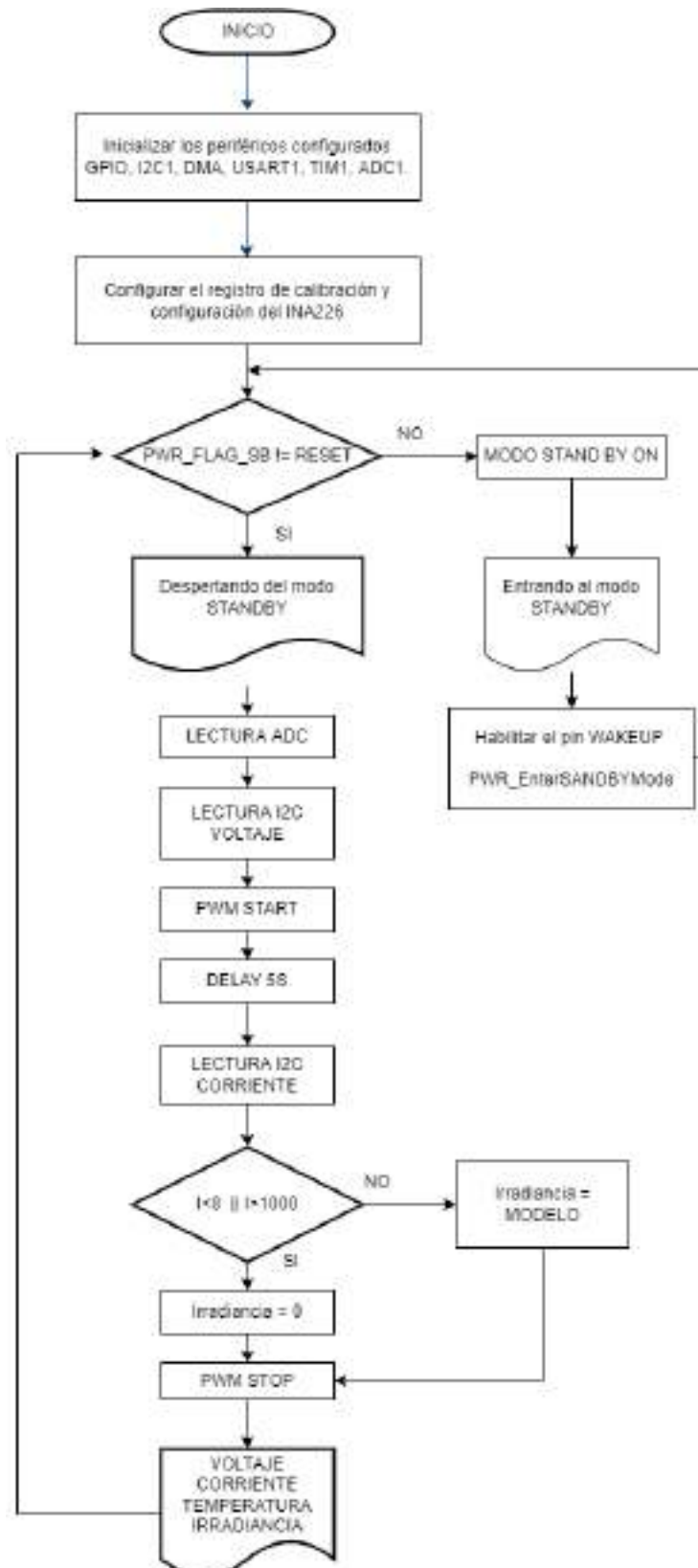


V Description of the keypad (Fig.2)

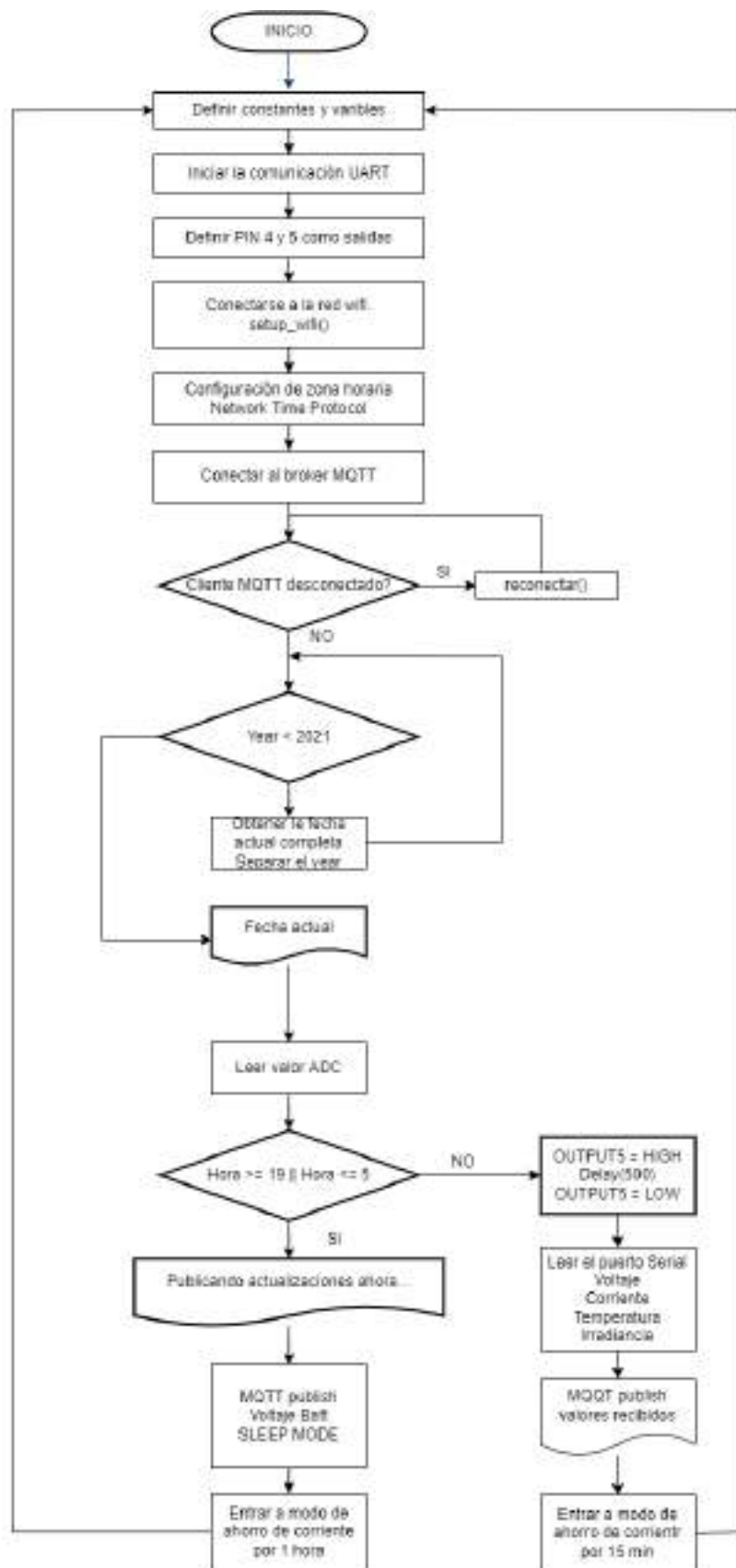
1. Photosensitive window
2. LCD display
3. ⏻ : ON/OFF button
4. W/B: Units W/m² and Btu/(ft²-h) selection key
5. HOLD: Value retention Key

— 3 —

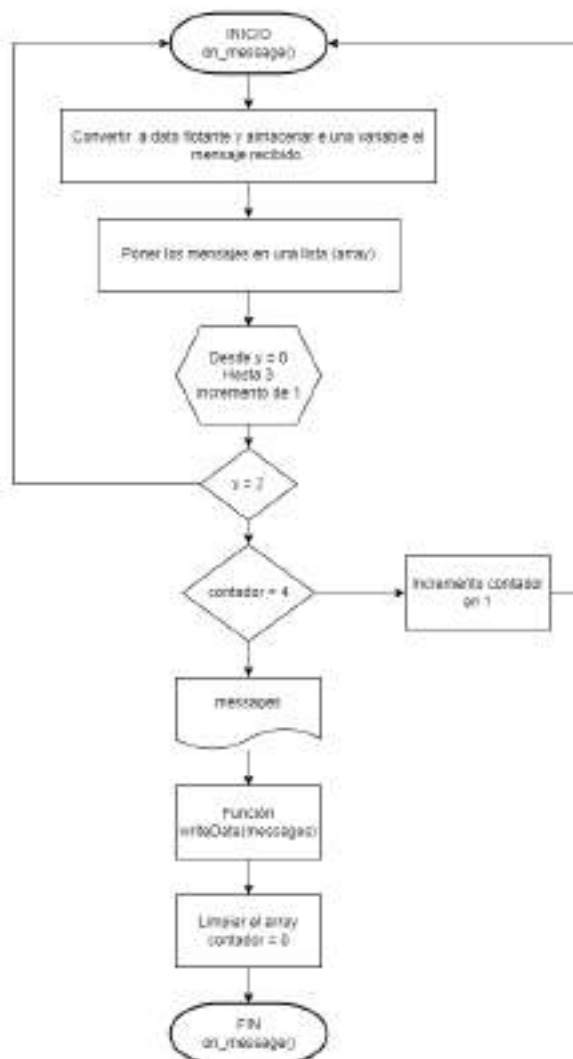
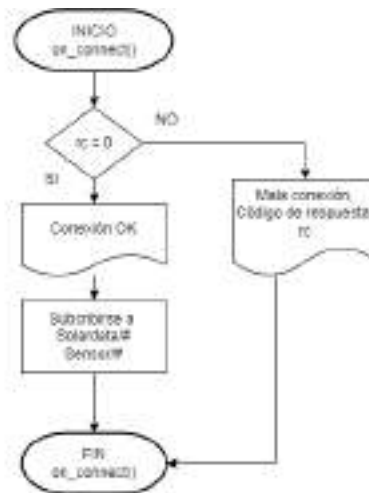
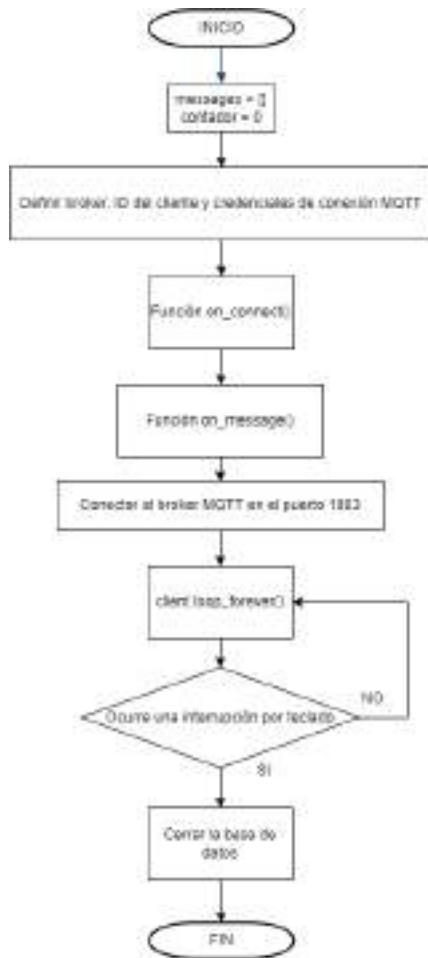
ANEXO C: DIAGRAMA DE FLUJO A DETALLE DE LA LÓGICA DE PROGRAMACIÓN DEL STM32F103C8T6.

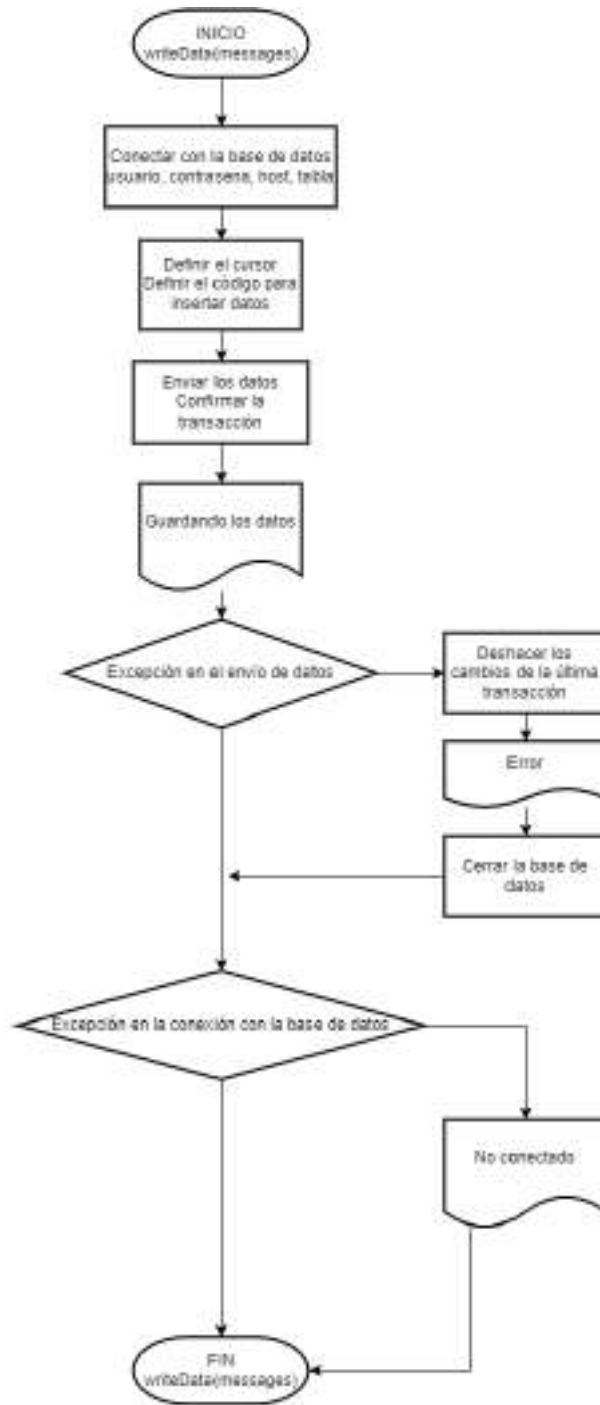


ANEXO D: DIAGRAMA DE FLUJO A DETALLE DE LA LÓGICA DE PROGRAMACIÓN DEL ESP8266 WEMOS D1.

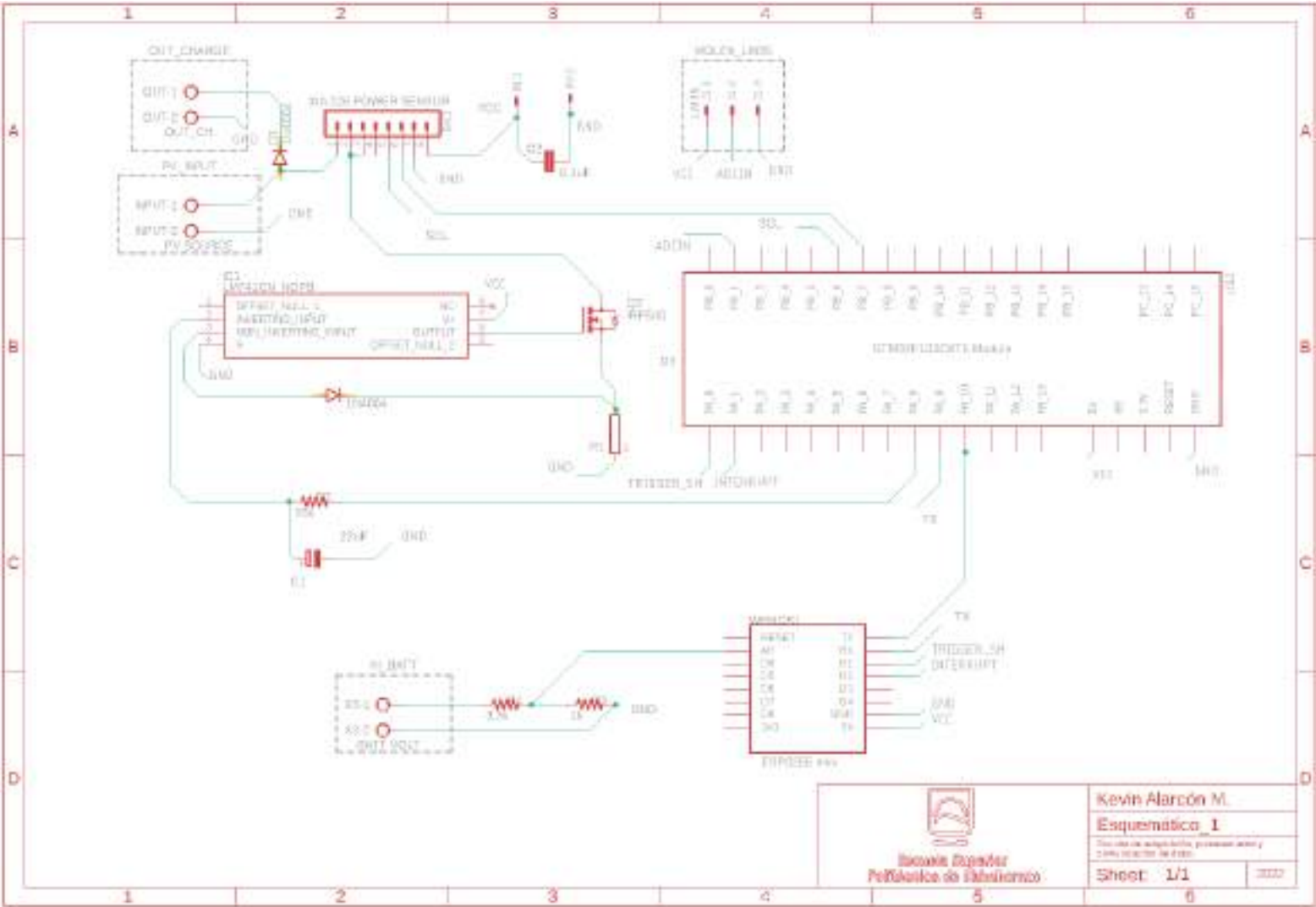


ANEXO E: LÓGICA DE PROGRAMACIÓN DEL SCRIPT DE PYTHON EN EL SERVIDOR LINUX

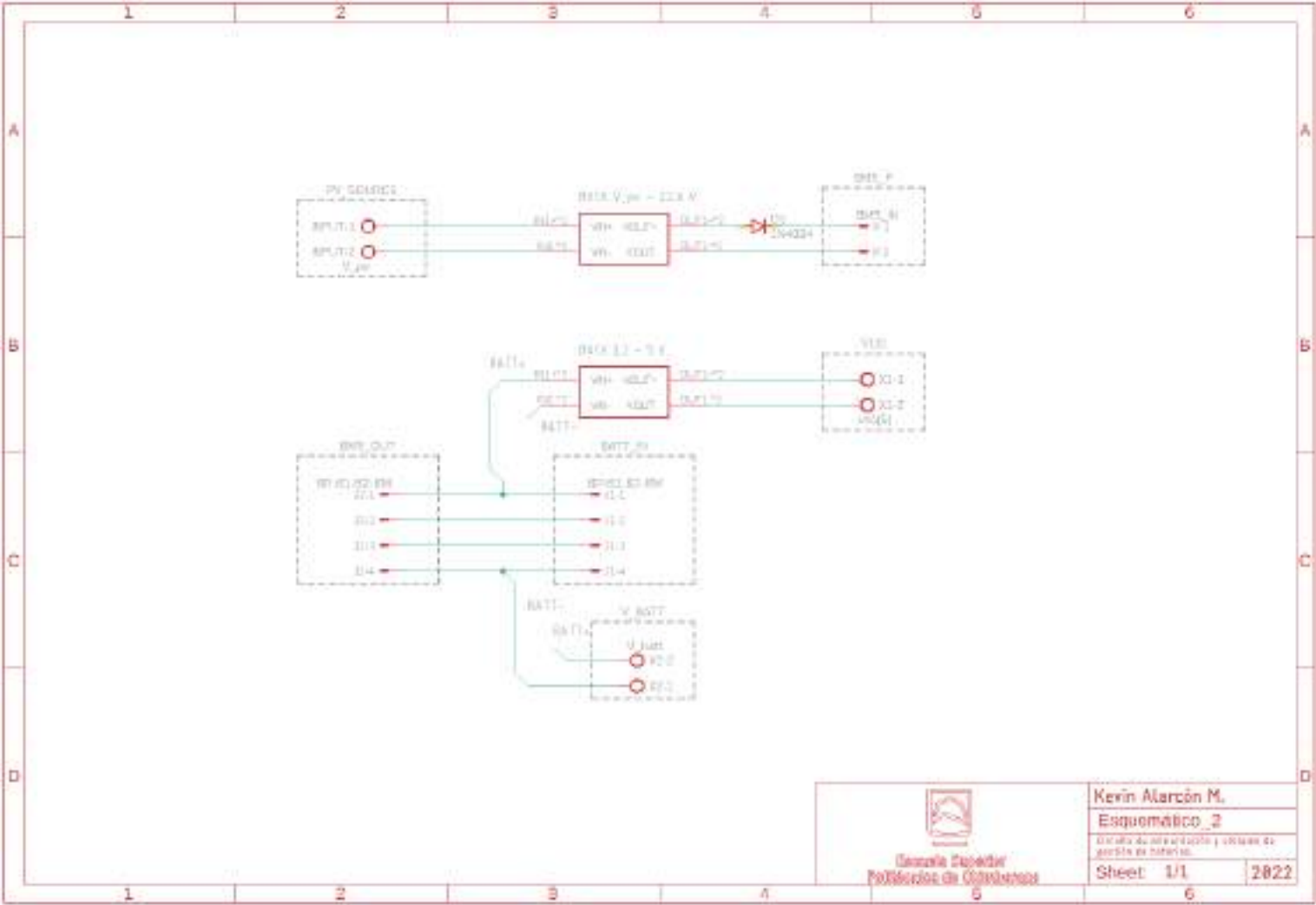




ANEXO F: ESQUEMA CIRCUITAL COMPLETO DE LOS BLOQUES DE ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y COMUNICACIÓN DE DATOS



ANEXO G: ESQUEMA CIRCUITAL DEL BLOQUE DE ALMACENAMIENTO Y SUMINISTRO DE ENERGÍA



**ANEXO H: DATOS (ISC, G) Y PROCESOS EMPLEADOS EN LA OBTENCIÓN DEL
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL**

18-22 grados C					
n	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	0,42	1,4	0,1764	1,96	0,588
2	2,95	70,14	8,7025	4919,6196	206,913
3	48,6	202,7	2361,96	41087,29	9851,22
4	54,6	231,7	2981,16	53684,89	12650,82
5	70	297,7	4900	88625,29	20839
6	78,5	356,6	6162,25	127163,56	27993,1
7	85,4	396,1	7293,16	156895,21	33826,94
8	93,1	436,1	8667,61	190183,21	40600,91
9	100,3	488,4	10060,09	238534,56	48986,52
10	112,5	560,6	12656,25	314272,36	63067,5
11	137	625,9	18769	391750,81	85748,3
12	148,3	702,2	21992,89	493084,84	104136,26
13	155,7	757,1	24242,49	573200,41	117880,47
14	164,6	807,5	27093,16	652056,25	132914,5
15	170,8	846,3	29172,64	716223,69	144548,04
16	175,8	875,1	30905,64	765800,01	153842,58
17	177,9	893,1	31648,41	797627,61	158882,49
18	192,9	981	37210,41	962361	189234,9
19	208	1067,1	43264	1138702,41	221956,8
20	213,1	1079,9	45411,61	1166184,01	230126,69
21	227,9	1128,7	51938,41	1273963,69	257230,73
22	238,8	1192,4	57025,44	1421817,76	284745,12
23	245,9	1258,9	60466,81	1584829,21	309563,51
24	252,4	1296,3	63705,76	1680393,69	327186,12
25	256,6	1307,9	65843,56	1710602,41	335607,14
26	273,8	1419	74966,44	2013561	388522,2
27	294,2	1515,2	86553,64	2295831,04	445771,84
28	294	1536,6	86436	2361139,56	451760,4
29	298,1	1548,6	88863,61	2398161,96	461637,66
Sum	4772,17	23880,24	1000601,28	25612659,3	5059319,26
Prom	164,557586	823,456552	34503,4924	883195,149	174459,285

22-33 grados C					
n	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	0,41	1,3	0,1681	1,69	0,533
2	1,3	16,1	1,69	259,21	20,93
3	43,2	176	1866,24	30976	7603,2
4	47	192,5	2209	37056,25	9047,5
5	54,2	242,9	2937,64	59000,41	13165,18
6	61	267,5	3721	71556,25	16317,5
7	63,8	293,2	4070,44	85966,24	18706,16
8	68,6	319,3	4705,96	101952,49	21903,98
9	79	372,7	6241	138905,29	29443,3
10	87,4	412,6	7638,76	170238,76	36061,24
11	96,2	460,5	9254,44	212060,25	44300,1
12	103,1	504,8	10629,61	254823,04	52044,88
13	121,1	543,1	14665,21	294957,61	65769,41
14	130	611,1	16900	373443,21	79443
15	134,1	649,7	17982,81	422110,09	87124,77
16	138,5	676,1	19182,25	457111,21	93639,85
17	143,5	711,1	20592,25	505663,21	102042,85
18	159,5	796,3	25440,25	634093,69	127009,85
19	170,4	864,6	29036,16	747533,16	147327,84
20	174,7	883,2	30520,09	780042,24	154295,04
21	175,4	909,9	30765,16	827918,01	159596,46
22	187,1	1001,6	35006,41	1003202,56	187399,36
23	221,1	1141,7	48885,21	1303478,89	252429,87
24	230,6	1165,3	53176,36	1357924,09	268718,18
25	242,6	1249,8	58854,76	1562000,04	303201,48
26	252,1	1312	63554,41	1721344	330755,2
27	272,5	1442,5	74256,25	2080806,25	393081,25
28	277,5	1483,3	77006,25	2200178,89	411615,75
29	294,9	1548,7	86966,01	2398471,69	456711,63
30	297,5	1574,4	88506,25	2478735,36	468384
31	294,8	1557,7	86907,04	2426429,29	459209,96
32	297,7	1582,2	88625,29	2503356,84	471020,94
33	299,5	1598,4	89700,25	2554882,56	478720,8
34	299,7	1596,6	89820,09	2549131,56	478501,02
35	297,8	1585,6	88684,84	2514127,36	472191,68
36	300,7	1602,5	90420,49	2568006,25	481871,75
37	281,8	1615,9	79411,24	2611132,81	455360,62
Sum	6400,31	32962,7	1458141,28	40038876,8	7634037,06
Prom	172,981351	890,883784	39409,2237	1082131,8	206325,326

33-37 grados C					
n	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	0,38	1,4	0,1444	1,96	0,532
2	21,89	163,5	479,1721	26732,25	3579,015
3	59,6	211,1	3552,16	44563,21	12581,56
4	70,4	307,6	4956,16	94617,76	21655,04
5	75,3	319	5670,09	101761	24020,7
6	100,2	387,1	10040,04	149846,41	38787,42
7	119,5	438,1	14280,25	191931,61	52352,95
8	142	579,4	20164	335704,36	82274,8
9	157,6	689	24837,76	474721	108586,4
10	182,6	811	33342,76	657721	148088,6
11	196,3	867,2	38533,69	752035,84	170231,36
12	208,3	933,8	43388,89	871982,44	194510,54
13	227,4	1043,5	51710,76	1088892,25	237291,9
14	227,9	1054,8	51938,41	1112603,04	240388,92
15	245,6	1178,4	60319,36	1388626,56	289415,04
16	277,4	1245,9	76950,76	1552266,81	345612,66
17	289,5	1314	83810,25	1726596	380403
18	300,2	1375,7	90120,04	1892550,49	412985,14
19	308	1413,3	94864	1997416,89	435296,4
Sum	3210,07	14333,8	708958,697	14460570,9	3198061,98
Prom	168,951053	754,410526	37313,6156	761082,678	168319,051

37-42 grados C					
n	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	0,38	1,4	0,1444	1,96	0,532
2	21,89	163,5	479,1721	26732,25	3579,015
3	59,6	211,1	3552,16	44563,21	12581,56
4	70,4	307,6	4956,16	94617,76	21655,04
5	75,3	319	5670,09	101761	24020,7
6	90,2	387,1	8136,04	149846,41	34916,42
7	99,5	438,1	9900,25	191931,61	43590,95
8	132	579,4	17424	335704,36	76480,8
9	157,6	689	24837,76	474721	108586,4
10	172,6	811	29790,76	657721	139978,6
11	186,3	867,2	34707,69	752035,84	161559,36
12	200,3	933,8	40120,09	871982,44	187040,14
13	227,4	1043,5	51710,76	1088892,25	237291,9
14	227,9	1054,8	51938,41	1112603,04	240388,92
15	245,6	1178,4	60319,36	1388626,56	289415,04
16	267,4	1245,9	71502,76	1552266,81	333153,66
17	269,5	1314	72630,25	1726596	354123
18	289,2	1375,7	83636,64	1892550,49	397852,44
19	300,3	1413,3	90180,09	1997416,89	424413,99
Sum	3093,37	14333,8	661492,587	14460570,9	3090628,47
Prom	162,808947	754,410526	34815,3993	761082,678	162664,656

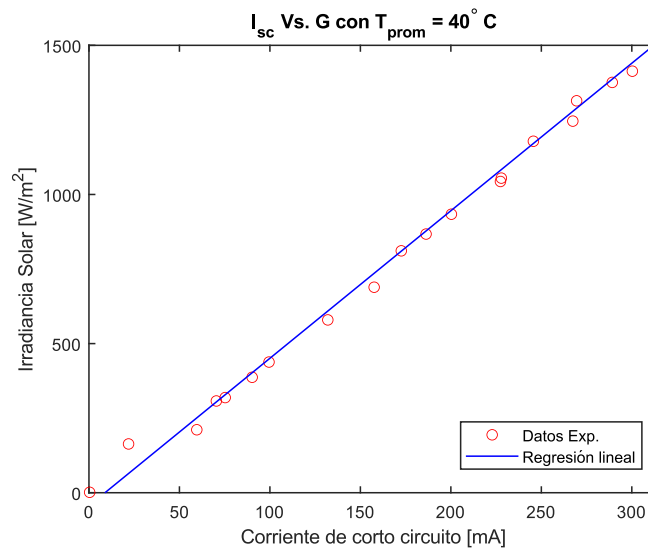
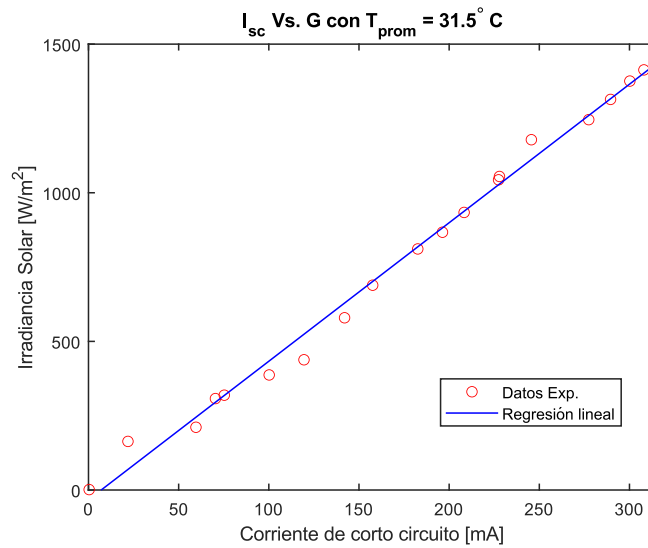
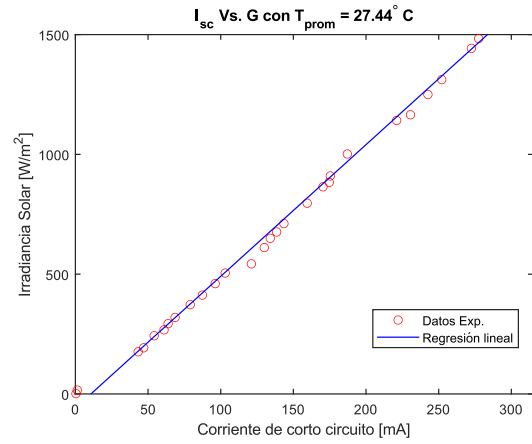
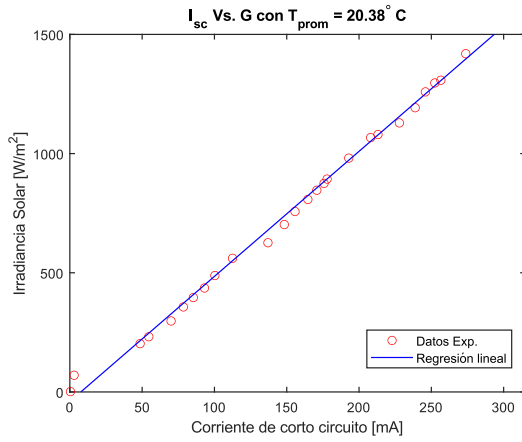
ANEXO I: DATOS (VOC, G) Y PROCESO EMPLEADO PARA HALLAR EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON.

18-22 grados C					
n	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	1,19	1,3	1,4161	1,69	1,547
2	16,11	123,6	259,5321	15276,96	1991,196
3	18,49	157,7	341,8801	24869,29	2915,873
4	18,77	233,9	352,3129	54709,21	4390,303
5	19	333,1	361	110955,61	6328,9
6	19,28	401,4	371,7184	161121,96	7738,992
7	19,34	474,4	374,0356	225055,36	9174,896
8	19,45	544,6	378,3025	296589,16	10592,47
9	19,53	552,2	381,4209	304924,84	10784,466
10	19,63	656,4	385,3369	430860,96	12885,132
11	19,68	761,9	387,3024	580491,61	14994,192
12	19,71	790,6	388,4841	625048,36	15582,726
13	19,83	881,1	393,2289	776337,21	17472,213
14	19,92	1048	396,8064	1098304	20876,16
15	19,94	1079,6	397,6036	1165536,16	21527,224
16	19,95	1095,3	398,0025	1199682,09	21851,235
17	19,97	1116,29	398,8009	1246103,36	22292,3113
18	20,02	1253,1	400,8004	1570259,61	25087,062
19	20,05	1277,9	402,0025	1633028,41	25621,895
20	20,06	1334	402,4036	1779556	26760,04
21	20,09	1418	403,6081	2010724	28487,62
22	20,12	1492,9	404,8144	2228750,41	30037,148
23	20,13	1528,9	405,2169	2337535,21	30776,757
24	20,14	1548,8	405,6196	2398781,44	31192,832
25	20,15	1616,6	406,0225	2613395,56	32574,49
Sum	470,55	21721,59	9197,6723	24887898,5	431937,68
Prom	18,822	868,8636	367,906892	995515,939	17277,5072

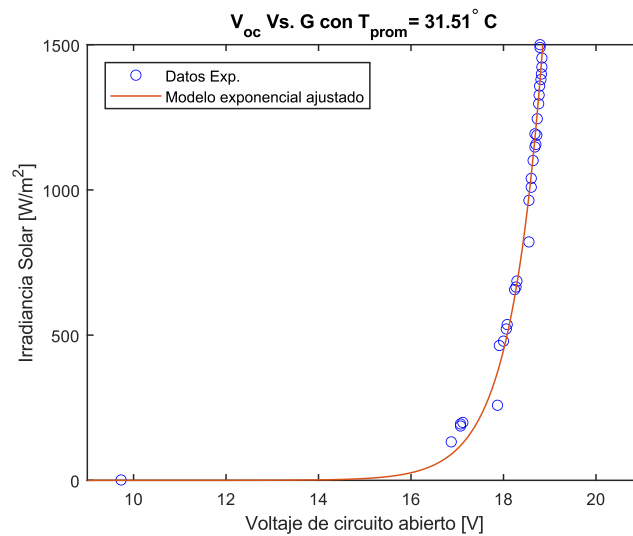
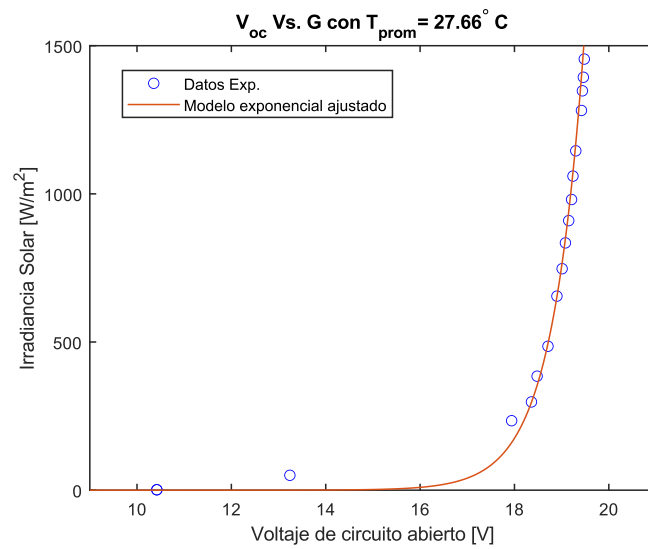
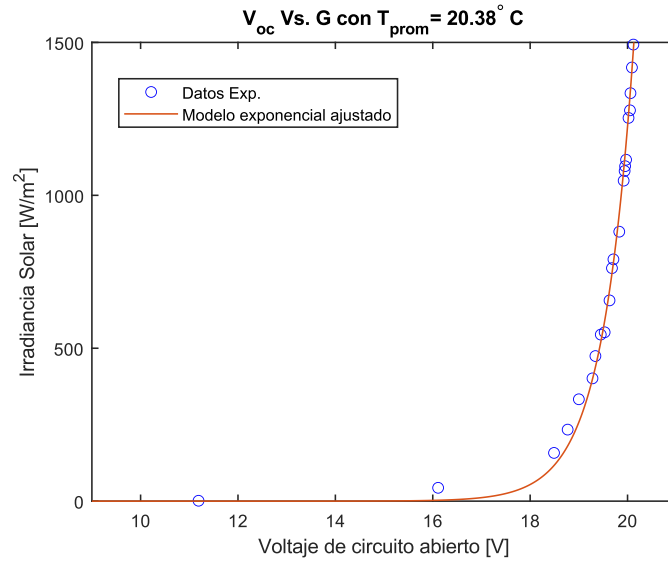
22-33 grados C					
n	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	1,42	1,3	2,0164	1,69	1,846
2	10,42	1,4	108,5764	1,96	14,588
3	13,24	50,2	175,2976	2520,04	664,648
4	17,94	234,4	321,8436	54943,36	4205,136
5	18,36	297,8	337,0896	88684,84	5467,608
6	18,48	384,7	341,5104	147994,09	7109,256
7	18,71	485,7	350,0641	235904,49	9087,447
8	18,9	654,8	357,21	428763,04	12375,72
9	19,01	747,4	361,3801	558606,76	14208,074
10	19,08	834,5	364,0464	696390,25	15922,26
11	19,15	909,7	366,7225	827554,09	17420,755
12	19,21	980,9	369,0241	962164,81	18843,089
13	19,24	1059,9	370,1776	1123388,01	20392,476
14	19,3	1145,2	372,49	1311483,04	22102,36
15	19,42	1281,4	377,1364	1641985,96	24884,788
16	19,44	1347,7	377,9136	1816295,29	26199,288
17	19,46	1393,5	378,6916	1941842,25	27117,51
18	19,48	1454,9	379,4704	2116734,01	28341,452
19	19,5	1518,9	380,25	2307057,21	29618,55
20	19,52	1554,8	381,0304	2417403,04	30349,696
21	19,53	1578,6	381,4209	2491977,96	30830,058
22	19,52	1581,9	381,0304	2502407,61	30878,688
23	19,51	1575,2	380,6401	2481255,04	30732,152
24	19,49	1575,7	379,8601	2482830,49	30710,393
25	19,49	1581,2	379,8601	2500193,44	30817,588
26	19,47	1600,4	379,0809	2561280,16	31159,788
27	19,47	1603,8	379,0809	2572174,44	31225,986
28	19,47	1608,8	379,0809	2588237,44	31323,336
29	19,46	1612,2	378,6916	2599188,84	31373,412
Sum	524,69	30656,9	9890,6871	41459263,7	593377,948
Prom	18,0927586	1057,13448	341,058176	1429629,78	20461,3086

33-37 grados C					
n	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	1,73	1,3	2,9929	1,69	2,249
2	16,87	132,4	284,5969	17529,76	2233,588
3	17,07	187	291,3849	34969	3192,09
4	17,07	194,1	291,3849	37674,81	3313,287
5	17,12	199,2	293,0944	39680,64	3410,304
6	17,87	258,5	319,3369	66822,25	4619,395
7	17,91	464,2	320,7681	215481,64	8313,822
8	18	479,3	324	229728,49	8627,4
9	18,06	521,1	326,1636	271545,21	9411,066
10	18,08	536,4	326,8864	287724,96	9698,112
11	18,24	656,7	332,6976	431254,89	11978,208
12	18,27	665,5	333,7929	442890,25	12158,685
13	18,29	686,3	334,5241	471007,69	12552,427
14	18,55	820,9	344,1025	673876,81	15227,695
15	18,55	963,9	344,1025	929103,21	17880,345
16	18,6	1009,3	345,96	1018686,49	18772,98
17	18,6	1039,7	345,96	1080976,09	19338,42
18	18,64	1101,2	347,4496	1212641,44	20526,368
19	18,68	1147,9	348,9424	1317674,41	21442,772
20	18,7	1156,7	349,69	1337954,89	21630,29
21	18,72	1188,4	350,4384	1412294,56	22246,848
22	18,68	1193,2	348,9424	1423726,24	22288,976
23	18,73	1245	350,8129	1550025	23318,85
24	18,76	1296,6	351,9376	1681171,56	24324,216
25	18,77	1326,6	352,3129	1759867,56	24900,282
26	18,78	1357,6	352,6884	1843077,76	25495,728
27	18,81	1380,2	353,8161	1904952,04	25961,562
28	18,82	1399	354,1924	1957201	26329,18
29	18,83	1423	354,5689	2024929	26795,09
30	18,83	1454,2	354,5689	2114697,64	27382,586
31	18,79	1490,5	353,0641	2221590,25	28006,495
32	18,79	1500	353,0641	2250000	28185
33	18,83	1557,4	354,5689	2425494,76	29325,842
34	18,87	1573,4	356,0769	2475587,56	29690,058
35	18,87	1612,9	356,0769	2601446,41	30435,423
Sum	626,78	33219,6	11504,9604	39763286	619015,639
Prom	17,908	949,131429	328,713154	1136093,88	17686,1611

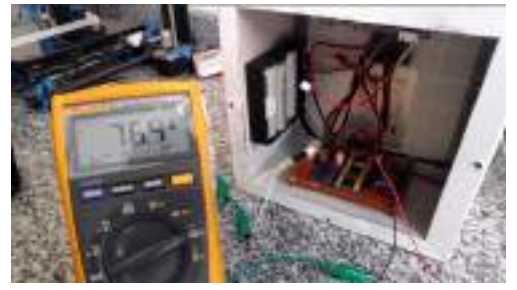
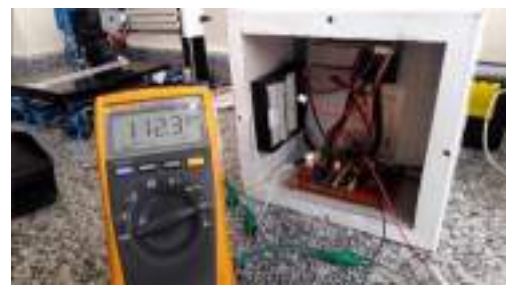
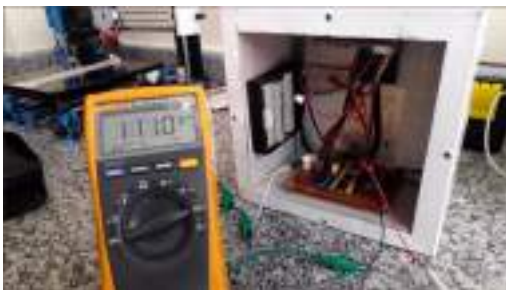
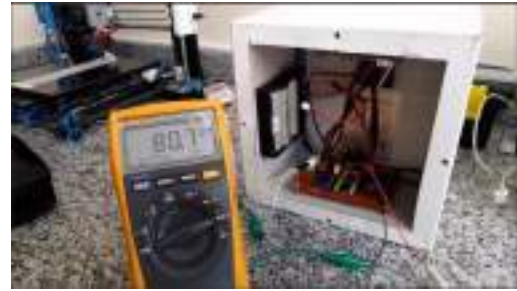
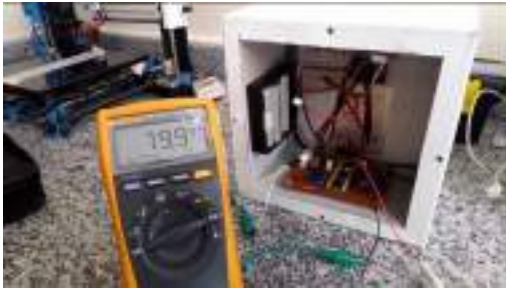
ANEXO J: MODELOS DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO VS. IRRADIANCIA A DIFERENTES NIVELES DE TEMPERATURA

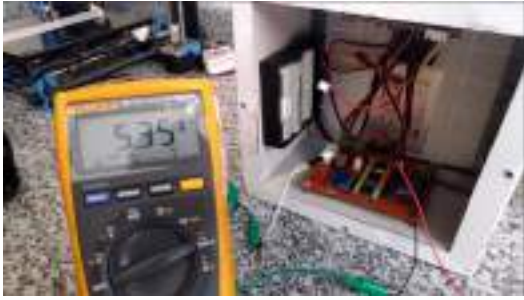


ANEXO K: MODELOS DE VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO VS. IRRADIANCIA A DIFERENTES NIVELES DE TEMPERATURA.

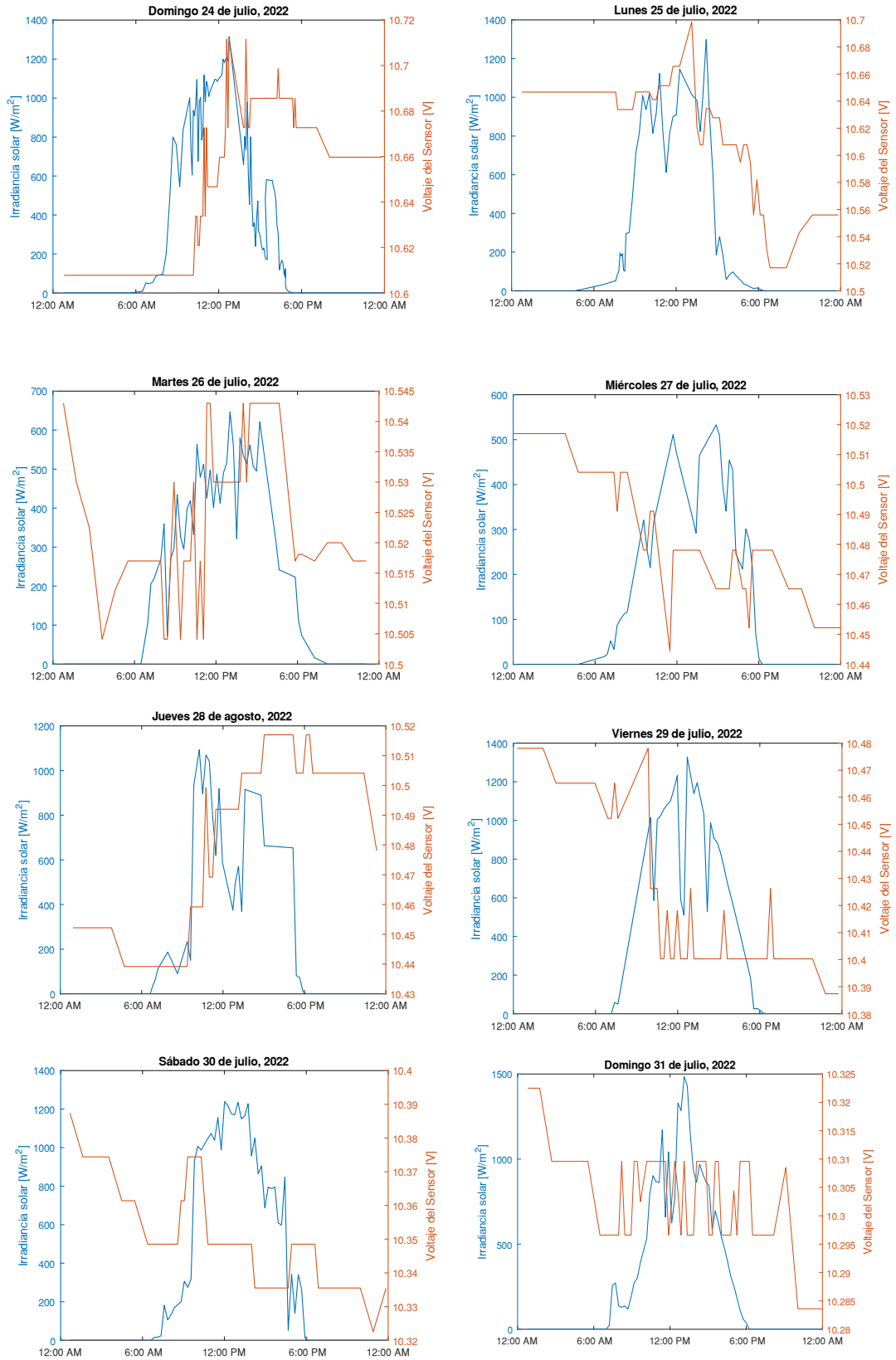


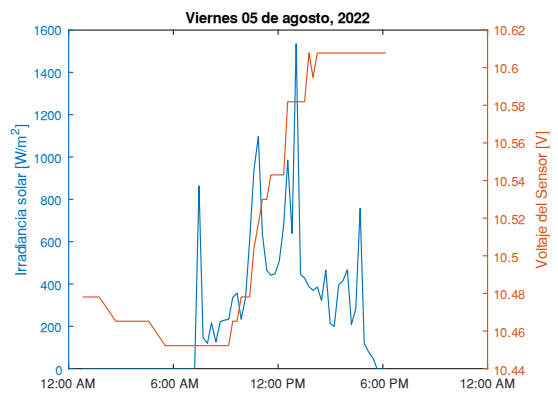
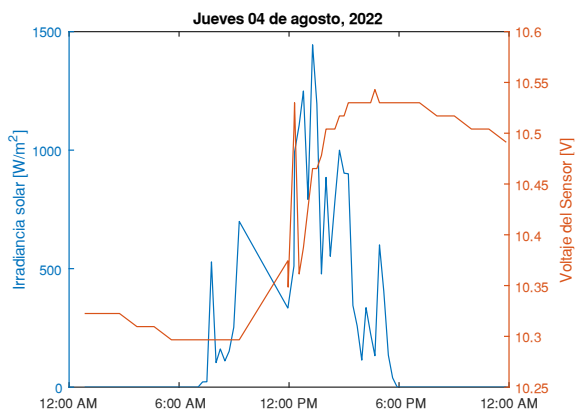
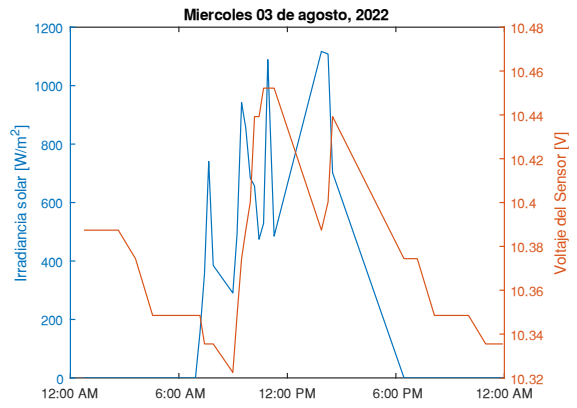
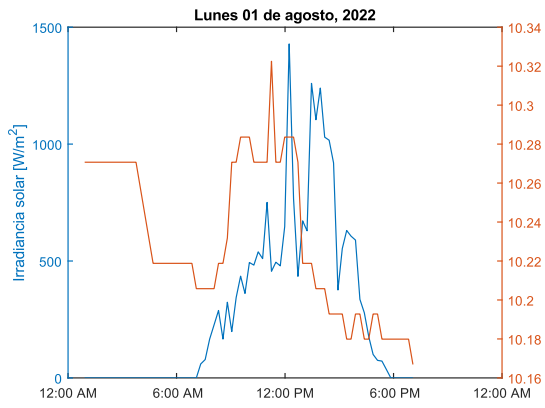
ANEXO L: EVIDENCIAS DE LA PRUEBA DE CONSUMO DE CORRIENTE



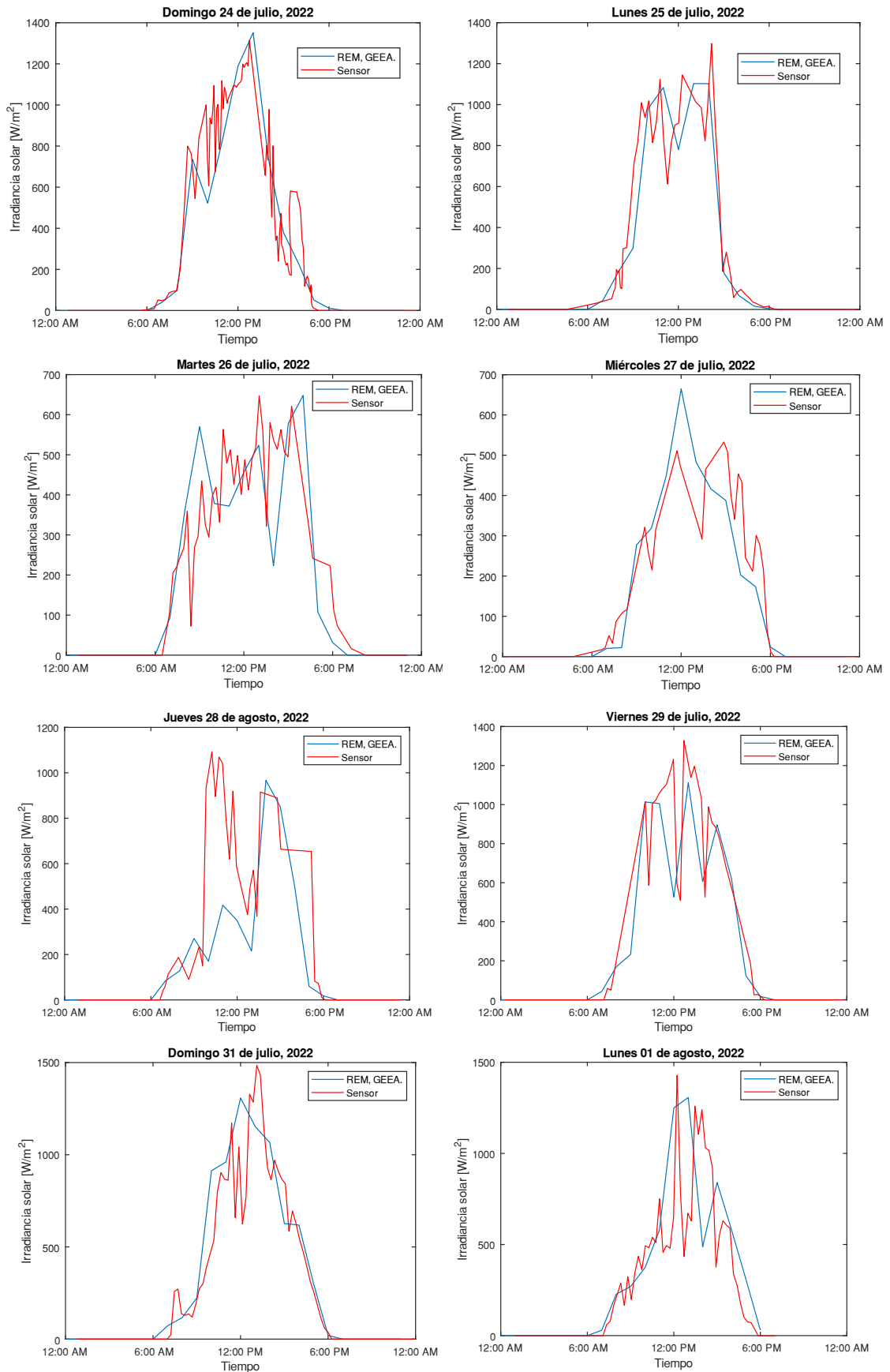


ANEXO M: GRÁFICAS DE IRRADIACIÓN SOLAR Y VOLTAJE DE BATERÍAS A LO LARGO DE LOS DÍAS DE PRUEBA.






ANEXO N: RADIACIÓN SOLAR PARA CADA DÍA DE PRUEBA CON RELACIÓN A LOS DATOS DE LA REM, GEAA.



ANEXO O: CERTIFICADO DE LOS DATOS PROVENIENTES DE LA RED DE ESTACIONES METEREOLÓGICAS, GEAA.



ESPOCH
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
DENOMINADO MONITOREO DE PRECIPITACIÓN HÍDRICA DE
LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO
DOCTOR ARQUIMIDES XAVIER HARO VELASTEGUI,
SUSCRIBE**

Por la presente notifica a usted, que el proyecto de investigación **"Monitoreo de Precipitación Hídrica de la Provincia de Chimborazo"** entregó **datos de radiación solar global del mes de julio de 2022** proveniente de la estación meteorológica de la **ESPOCH** que es una de las 11 estaciones meteorológicas automáticas vaisala del proyecto.

Se extiende el presente documento a solicitud del interesado, para los fines que estime convenientes.

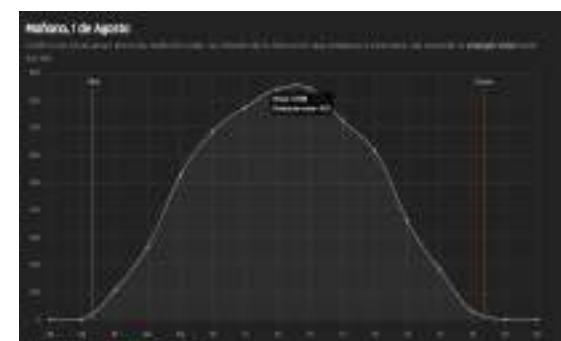
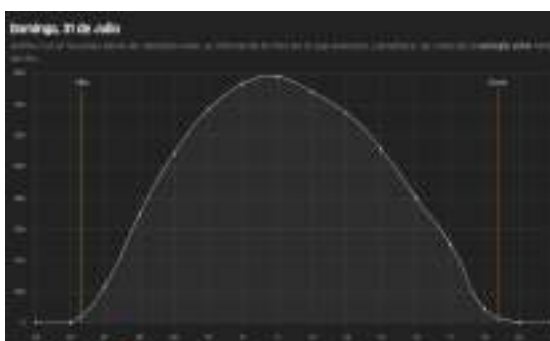
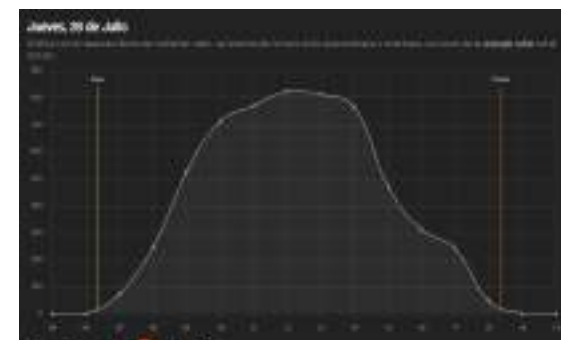
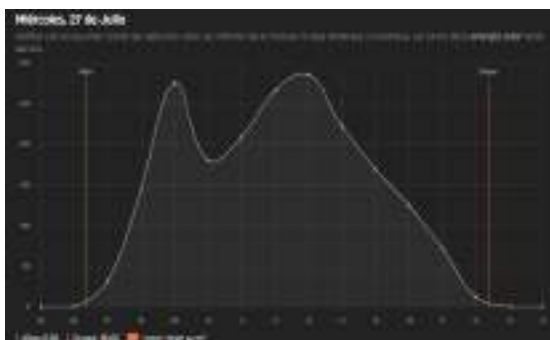
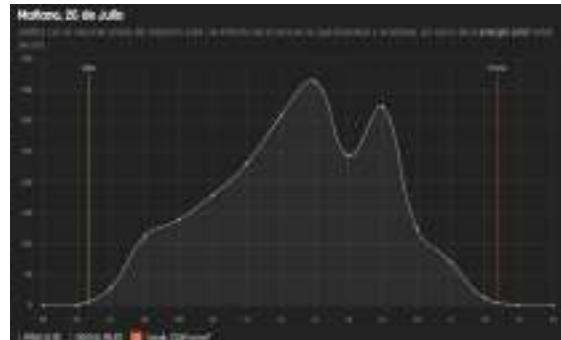
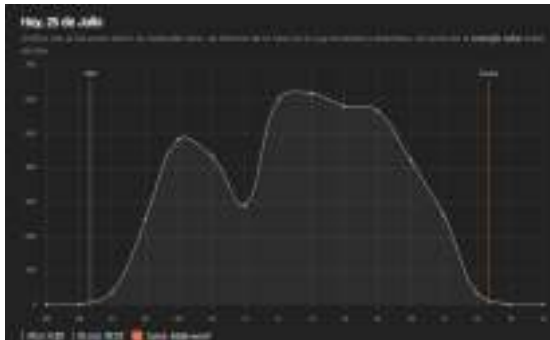
Riobamba, 05 de agosto del 2022

ARQUIMIDES XAVIER HARO VELASTEGUI
Formado digitalmente por ARQUIMIDES XAVIER HARO VELASTEGUI
Fecha: 2022.08.07 20:28:09 -0500

Dr. Arquimides Haro Velastegui
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
DOCENTE DE LA FACULTAD DE CIENCIAS - ESPOCH

Dirección: Panamericana sur km. 1 % Teléfono: 298220 Extensiones: Director 1077 - Secretaria 1078- Investigadores 1079
idi@esPOCH.edu.ec
Riobamba-Ecuador

ANEXO P: DATOS EMPLEADOS EN EL ANÁLISIS COMPARATIVO PROVENIENTES DE RADIACIÓN SOLAR.ES



ANEXO Q: DATOS EMPLEADOS DE LA RADIACIÓN DIARIA PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ERROR POR HORA.

24/07/2022	Radiación Solar [Wm-2]	
Hora	Sensor	REM, GEEA
7:00:00	47,8700	40,2470
8:00:00	95,9800	98,0440
9:00:00	761,0000	736,0000
10:00:00	540,1389	522,2780
11:00:00	885,6146	837,6580
12:00:00	1105,3561	1189,0740
13:00:00	1278,0237	1352,0770
14:00:00	722,6068	738,9390
15:00:00	345,3564	378,6610
16:00:00	112,0311	227,3450
17:00:00	49,0123	50,3770
18:00:00	9,2455	10,8450

25/07/2022	Radiación Solar [Wm-2]		
Hora	Sensor	REM, GEEA	RS.es
7:00:00	31,0943	43,3360	38
8:00:00	191,5679	178,9190	250
9:00:00	312,9370	299,5410	485
10:00:00	1018,2434	980,5450	434
11:00:00	921,8345	1083,3470	290
12:00:00	809,1430	780,7010	602
13:00:00	1114,1200	1102,5520	620
14:00:00	1108,1330	1102,2410	580
15:00:00	185,5070	178,7250	567
16:00:00	84,3980	67,7680	422
17:00:00	36,1240	16,3260	262
18:00:00	2,1320	3,7320	36

26/07/2022	Radiación Solar [Wm-2]		
Hora	Sensor	REM, GEEA	RS.es
7:00:00	103,1930	93,1390	29
8:00:00	267,3500	359,6470	113
9:00:00	434,8730	569,9200	139
10:00:00	398,5070	378,4980	180
11:00:00	629,2570	371,7920	230
12:00:00	466,5070	456,7950	309
13:00:00	647,0070	523,7840	365
14:00:00	235,7450	223,1770	243
15:00:00	495,0500	578,2950	323
16:00:00	614,9520	647,9250	125
17:00:00	141,7870	107,2250	71
18:00:00	30,1323	31,3890	12

27/07/2022	Radiación Solar [Wm-2]		
Hora	Sensor	REM, GEEA	RS.es
7:00:00	21,9813	20,3150	32
8:00:00	111,2432	22,0960	145
9:00:00	321,1323	277,1610	276
10:00:00	215,0154	318,9990	181
11:00:00	478,1300	449,6070	209
12:00:00	472,0988	664,7880	267
13:00:00	324,2517	483,4470	286
14:00:00	465,0744	416,3200	223
15:00:00	509,1300	387,8690	170
16:00:00	433,4880	202,4390	125
17:00:00	301,0398	173,5860	72
18:00:00	12,1340	23,7500	12

28/07/2022	Radiación Solar [Wm-2]		
Hora	Sensor	REM, GEEA	RS.es
7:00:00	112,3500	83,1050	74
8:00:00	187,2430	128,5270	247
9:00:00	234,2243	270,5550	525
10:00:00	234,2310	170,6350	714
11:00:00	573,3534	417,2340	770
12:00:00	388,1970	349,3300	825
13:00:00	268,8960	215,2600	812
14:00:00	889,1700	966,8870	765
15:00:00	863,2090	850,6410	471
16:00:00	553,7090	500,2860	311
17:00:00	50,3430	59,7610	242
18:00:00	18,0123	17,9900	47

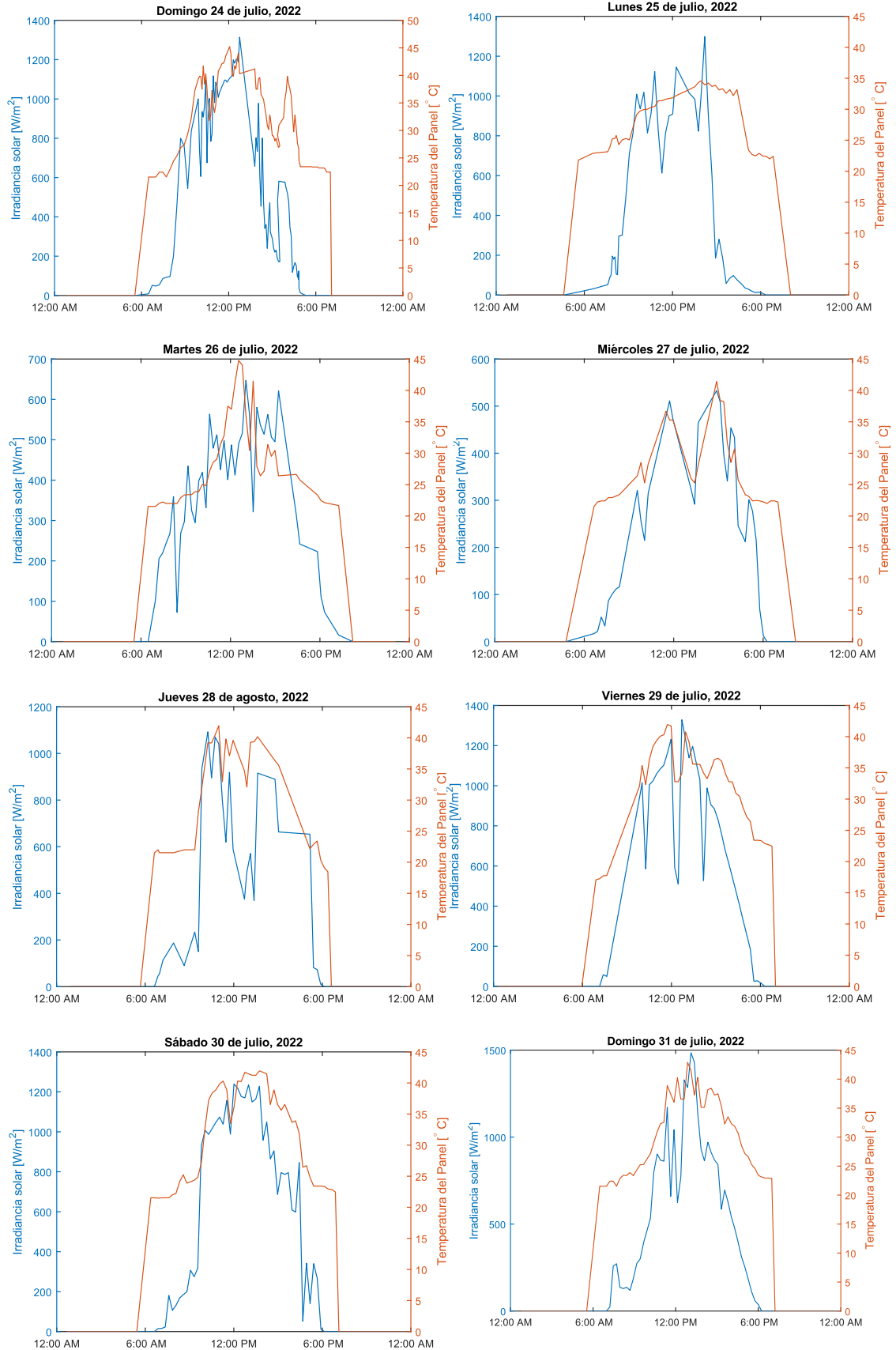
29/07/2022	Radiación Solar [Wm-2]		
Hora	Sensor	REM, GEEA	RS.es
7:00:00	78,4300	168,7310	351
8:00:00	201,3430	232,6580	558
9:00:00	1014,9200	1013,6380	725
10:00:00	1058,7000	1005,1470	834
11:00:00	592,3800	526,3920	864
12:00:00	1138,7300	1112,1970	826
13:00:00	526,9230	605,7030	778
14:00:00	884,9550	896,2510	674
15:00:00	612,3710	619,6430	492
16:00:00	328,1590	123,6230	276
17:00:00	15,9000	17,5940	43
18:00:00	0,0000	0,0000	0

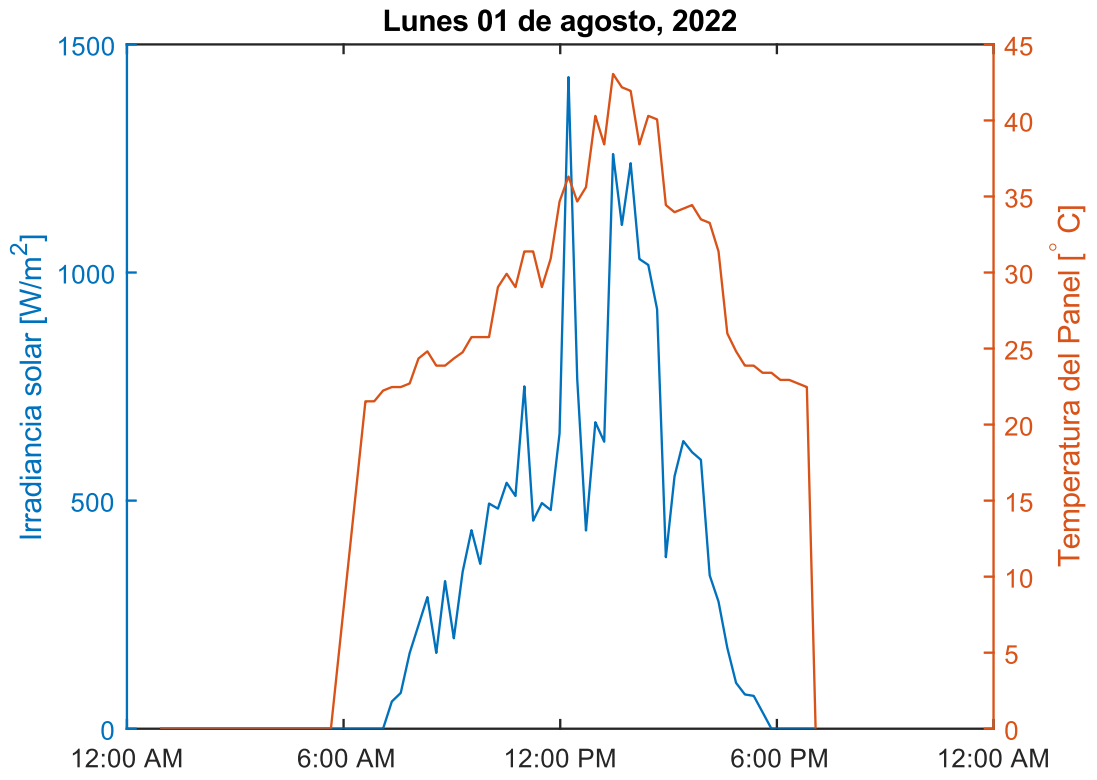
30/07/2022	Radiación Solar [Wm-2]		
Hora	Sensor	REM, GEEA	RS.es
7:00:00	15,9000	25,4970	54
8:00:00	231,5020	239,7610	218
9:00:00	506,9540	616,8600	409
10:00:00	900,7740	852,7820	600
11:00:00	1073,4000	943,0900	687
12:00:00	1139,0200	1142,2840	723
13:00:00	1135,1800	1092,7590	707
14:00:00	958,1460	1085,8170	665
15:00:00	686,5880	612,6850	571
16:00:00	608,9510	591,3190	430
17:00:00	342,5230	261,4880	262
18:00:00	31,9520	43,8140	46

31/07/2022	Radiación Solar [Wm-2]		
Hora	Sensor	REM, GEEA	RS.es
7:00:00	23,4260	72,2440	118
8:00:00	136,6320	116,7870	349
9:00:00	225,7654	223,4630	545
10:00:00	832,6820	913,2150	686
11:00:00	903,0820	960,7890	769
12:00:00	1142,6200	1308,2040	791
13:00:00	1285,1100	1153,2110	742
14:00:00	929,5270	1066,0740	674
15:00:00	642,8880	626,5620	560
16:00:00	626,3940	618,7870	403
17:00:00	312,7680	302,2790	254
18:00:00	37,1950	19,6280	45

01/08/2022	Radiación Solar [Wm-2]		
Hora	Sensor	REM, GEEA	RS.es
7:00:00	59,6794	29,6750	111
8:00:00	226,9230	227,0230	267
9:00:00	198,1940	269,6220	527
10:00:00	493,6930	372,7790	687
11:00:00	750,5440	579,1900	775
12:00:00	1428,4100	1249,8560	843
13:00:00	671,8810	1307,0860	845
14:00:00	1239,6200	487,3970	726
15:00:00	376,0410	840,8430	618
16:00:00	589,5460	580,6230	363
17:00:00	176,9900	308,7070	183
18:00:00	0,0000	29,6790	35

ANEXO R: IRRADIANCIA SOLAR VS. TEMPERATURA DEL MÓDULO SOLAR POR DÍA DURANTE EL PERÍODO DE PRUEBA.







ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
,CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 17 / 10 / 2022

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES
Nombres – Apellidos: Kevin Lenin Alarcón Maza
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Facultad de Informática y Electrónica
Carrera: Electrónica y Automatización
Título a optar: Ingeniero en Electrónica y Automatización
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Fernanda Arévalo

