

**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PROTOTIPO BASADO EN  
TECNOLOGÍA MICROCONTROLADOR PARA MONITOREO DE  
FUNCIONAMIENTO Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS DE UN GENERADOR  
FOTOVOLTAICO**

**Tesis presentada por:**

**Bach. Zea Vizcarra, Luigi Raniero**

**para optar el título profesional de:**

**Ingeniero electrónico**

**Asesor de tesis:**

**Ing. Sulla Torres, Raúl**

**Arequipa – Perú**

**2018**

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA  
URB. SAN JOSÉ S/N - UMACOLLO



**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**INFORME DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS**

Los que suscriben:

PEDRO RODRIGUEZ GONZALES

RAUL SULLA TORRES.

Dictaminadores del Borrador de Tesis titulado:

Diseño e implementación de un sistema prototipo  
basado en tecnología microcontrolador para  
monitoreo de funcionamiento y diagnóstico de  
fallas de un generador fotovoltaico.

Nombrados con Decreto Nro.: 008. DEPIE - 2018, de fecha: 28 de Noviembre 2018.

Presentado por el (la) los Bachiller (es):

3. LUIGI RANIERO ZEA VIZCARRA.

4. \_\_\_\_\_

Cumplen con emitir su Dictamen:

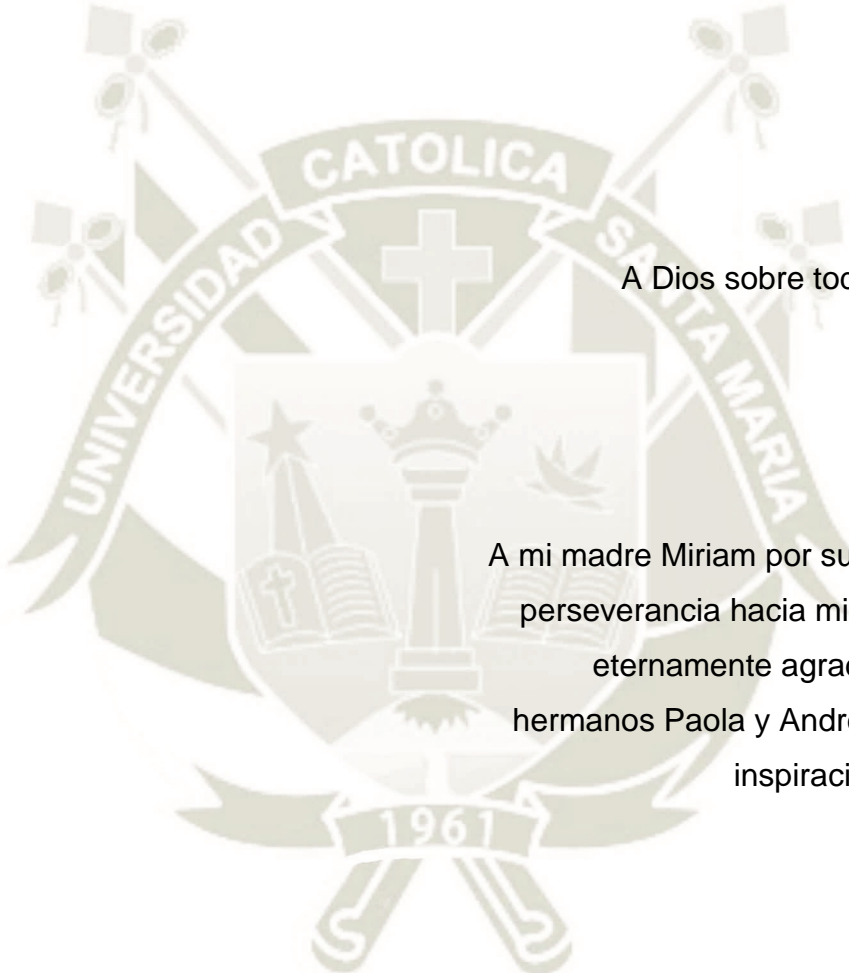
- No registra observaciones, es **procedente**  (X)
- Registra observaciones que deben ser subsanadas (ver hoja adjunta)  ( )

Arequipa, 08/11/2018

[Firma]  
Dr. Pedro Rodríguez G.  
Código Nro.: 1547

[Firma]  
Ing. Raul Silla Torres  
Código Nro.: 7767

## Dedicatoria



A Dios sobre todas las cosas

A mi madre Miriam por su gran amor y perseverancia hacia mi persona, a ti eternamente agradecido, a mis hermanos Paola y Andree por ser mi inspiración y mi todo.

## Agradecimientos

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mi madre, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ti he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y un privilegio ser tu hijo.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

## Tabla de Contenidos

RESUMEN.....	.....
ABSTRACT.....	.....
INTRODUCCIÓN.....	.....
Capítulo I PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	1
1.1 Identificación del problema.....	1
1.2 Descripción del problema.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo principal.....	2
1.3.2 Objetivos secundarios.....	2
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Alcance.....	3
Capítulo II MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Principios físicos de la energía solar fotovoltaica.....	4
2.1.1 Radiación e irradiación solar.....	4
2.1.2 Factores astronómicos.....	4
2.1.3 Factores atmosféricos.....	8
2.1.4 Irradiancia útil.....	13
2.1.5 Conclusión.....	16
2.2 Componentes de los sistemas de generación.....	17
2.2.1 Paneles solares.....	17
2.2.1.1 Celdas solares.....	17
2.2.1.2 Tipos de celdas solares.....	18
2.2.1.3 Construcción de los módulos solares.....	19
2.2.1.4 Características eléctricas de los módulos solares.....	21
2.2.1.5 Curvas características i-v.....	23
2.2.1.6 Efectos de la radiación y la temperatura.....	26
2.2.1.7 Efectos del sombreado en la salida del módulo.....	28
2.2.2 Baterías.....	29
2.2.2.1 Capacidad de la batería.....	31
2.2.2.2 Constante de carga descarga c.....	32
2.2.2.3 Estado de carga descarga (soc).....	33
2.2.2.4 Profundidad de descarga (dod).....	35
2.2.2.5 Autodescarga.....	37
2.2.2.6 Efectos de la temperatura en la batería.....	37

2.2.3 Controlador de carga.....	38
2.2.3.1 Controladores on/off y pwm.....	39
2.2.3.2 Controladores mppt.....	40
Capítulo III DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	42
3.1 Descripción general.....	42
3.2 Sistema fotovoltaico.....	44
3.2.1 Componentes del sistema fotovoltaico.....	44
a Panel solar.....	44
b Batería vrla.....	45
c. Controlador de carga.....	46
3.2.2 Conexión del sistema fotovoltaico.....	47
3.3 Implementación del hardware.....	47
3.3.1 Selección de componentes y sensores principales.....	51
a Microcontrolador.....	51
b. Leds de estado.....	52
c Pulsadores de control.....	52
d. Módulo GSM/GPS.....	52
e. Integrado sensor de radiación ultravioleta e infrarroja.....	53
f. Módulo (Shield) Ethernet para Arduino R3.....	54
g. Conector y circuito de alimentación.....	55
h. Entradas acondicionadores de canales análogos de corriente.....	55
i. Entradas acondicionadores de canales análogos de corriente.....	55
3.3.3 Esquemático y circuito impreso.....	55
a. Etapa de alimentación. Reguladores de tensión.....	55
b. Acondicionadores de Señal.....	57
c. Conversor de niveles lógicos.....	61
d. Interface hacia el GPS y al sensor UV.....	62
e. RTC (Real time clock) Reloj en tiempo real.....	64
f. Microcontrolador e interfaz de campo.....	66
3.3.4 Diseño del circuito impreso.....	67
3.4 Diseño del sistema experto.....	70
3.4.1 Fallas presentes en un sistema fotovoltaico.....	70
3.4.2 Experimentos y toma de datos.....	71
3.4.2.1 Línea de base.....	71
3.4.2.2 Experimentos con polvo.....	76
3.4.2.3 Experimentos de ensombrecimiento.....	80
3.4.2.4 Días soleados.....	85
3.4.2.5 Días nublados.....	91
3.4.2.6 Evaluación de datos.....	101
3.4.3 Desarrollo de algoritmos de diagnóstico.....	102
3.4.3.1 Detección de falla de panel y día nublado.....	102
3.4.3.2 Detección de paneles y baterías defectuosos.....	104
3.4.3.3 Detección de paneles mal orientados.....	105
3.5 Implementación de software.....	105

3.5.1 IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE EMBEBIDO.....	105
Capítulo IV.....	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
Bibliografía.....	109
Anexos.....	110
Anexo 1 esquemático del sistema.....	110
Anexo 2 circuito impreso.....	111
Capa superior.....	112
Capa inferior.....	112
Anexo 3 hojas de datos.....	114
Anexo 4 datos de salida y puesta de sol (arequipa, fechas investigadas).....	115



## Lista de figuras

Ilustración 1 Geometría Tierra-Sol a lo largo del año.....	5
Ilustración 2 Analema. ....	6
Ilustración 3 Fotografía secuencial de la posición del sol a lo largo del año en una ubicación del hemisferio sur. ....	7
Ilustración 4 Análema típico del hemisferio sur.....	7
Ilustración 5 Espectro de irradiación solar extraterrestre. ....	9
Ilustración 6 Espectros de radiación terrestre para el estándar AM15 global y directo.....	10
Ilustración 7 Geometría de la superficie terrestre, su atmósfera y la posición del sol. ....	10
Ilustración 8 Tipos de irradiación que llegan al dispositivo. ....	12
Ilustración 9 Geometría de un panel solar respecto al sol. ....	15
Ilustración 10 Estructura de una celda fotovoltaica ( <a href="http://www.engineering.com/SustainableEngineering/RenewableEnergyEngineering/SolarEnergyEngineering/Photovoltaics/tabid/3890/Default.aspx">http://www.engineering.com/SustainableEngineering/RenewableEnergyEngineering/SolarEnergyEngineering/Photovoltaics/tabid/3890/Default.aspx</a> ) ..	18
Ilustración 11 Estructura cristalina de los diversos tipos de celda fotovoltaica ( <a href="http://photonicswiki.org">http://photonicswiki.org</a> , s.f.) ..	19
Ilustración 12 Celdas solares en serie y en paralelo (science direct, s.f.).....	20
Ilustración 13 Estructura de un panel solar típico (TRITEC, s.f.) ..	21
Ilustración 14 Curva V-I Típica de un sistema fotovoltaico. (tutorials, s.f.).....	24
Ilustración 15 Curvas V-I de dos paneles en serie y en paralelo. (tutorials, s.f.).....	26
Ilustración 16 Efecto de la irradiación solar en el punto de máxima potencia. ....	27
Ilustración 17 Efecto de la temperature en el punto de máxima potencia.....	27
Ilustración 18 Efecto de ensombrecimiento. ....	29
Ilustración 19 Arreglo de baterías en conexión serie-paralelo ..	31
Ilustración 20 Arreglo de baterías en conexión serie. ( <a href="https://mozaw.com/best-solar-batteries/">https://mozaw.com/best-solar-batteries/</a> ).....	32
Ilustración 21 Estado de carga y descarga de las baterías.....	34

Ilustración 22 Profundidad de descarga versus ciclos de descarga esperados (Civic Solar, s.f.) .....	36
Ilustración 23 Curva de carga de un controlador PWM.....	40
Ilustración 24 Procedimiento descrito. ....	42
Ilustración 25 Esquema básico del sistema de registro de datos.....	43
Ilustración 26 Sistema implementado para registro de datos .....	43
Ilustración 27 Placa de panel solar .....	45
Ilustración 28 Especificaciones de batería.....	46
Ilustración 29 Conexión del controlador de carga.....	47
Ilustración 30 Esquema general de hardware.....	50
Ilustración 31 Placa de microcontrolador Arduino Mega.....	52
Ilustración 32 Conexión Módulo U-blox 6. ....	53
Ilustración 33 Asignación de pines del IC SILICON LABS SI1147 .....	54
Ilustración 34 Placa para conexión del circuito integrado sensor IR-UV .....	54
Ilustración 35 Etapa de alimentación. ....	56
Ilustración 36 Etapa de acondicionamiento de señal.....	58
Ilustración 37 Detalle de un canal de acondicionamiento. ....	59
Ilustración 38 Divisor de Voltaje.....	60
Ilustración 39 Conversor de niveles lógicos.....	61
Ilustración 40 Conexión a modulo GPS .....	64
Ilustración 41 Conexión RTC .....	66
Ilustración 42 Conexión microcontrolador/interface. ....	67
Ilustración 43 Distribución de componentes en la placa PCB.....	68
Ilustración 44 Foto de placa PCB.....	69
Ilustración 45 Disposición del Sistema de pruebas.....	71
Ilustración 46 Medida inicial del panel empolvado. Medición en el multímetro 20.27 Voltios. ....	72
Ilustración 47 Datos del día 14 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaico. En Azul el voltaje de las baterías.....	73

Ilustración 48 Datos del día 14 de setiembre a la izquierda la radiación Infrarroja a la derecha la radiación ultravioleta. ....	74
Ilustración 49 Datos del día 8 de Octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicoa. En Azul el voltaje de las baterías.....	74
Ilustración 50 Datos del día 8 de Octubre a la izquierda la radiación Infrarroja a la derecha la radiación ultravioleta. ....	75
Ilustración 51 Datos del día 9 de Octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicoa. En Azul el voltaje de las baterías.....	75
Ilustración 52 Datos del día 9 de Octubre a la izquierda la radiación Infrarroja a la derecha la radiación ultravioleta. ....	76
Ilustración 53 Medida inicial del panel empolvado. Medición en el multímetro 1.7 Voltios.....	77
Ilustración 54 Medida inicial del panel empolvado. Medición en el multímetro 16.96 Voltios.....	78
Ilustración 55 Medida inicial del panel empolvado. Medición en el multímetro 16.96 Voltios.....	79
Ilustración 56 11 DE SETIEMBRE. Efecto del polvo en el panel. ....	80
Ilustración 57 Mitad de panel ensombrecido. Lectura de voltaje 15.53.....	81
Ilustración 58 Panel ensombrecido por barras verticales. Lectura de voltaje 18.55 .....	82
Ilustración 59 Datos del día 12 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. Experimento de ensombrecimiento. ....	84
Ilustración 60 Datos del día 14 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.....	86
Ilustración 61 Datos del día 6 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.....	86

Ilustración 62 Datos del día 9 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos.  
En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.  
.....87

Ilustración 63 Datos del día 10 de octubre en rojo el voltaje del panel  
fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la  
irradiación en azul.....88

Ilustración 64 Datos del día 11 de octubre en rojo el voltaje del panel  
fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la  
irradiación en azul.....89

Ilustración 65 Datos del día 12 de octubre en rojo el voltaje del panel  
fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la  
irradiación en azul.....90

Ilustración 66 Datos del día 15 de setiembre en rojo el voltaje del panel  
fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la  
irradiación en azul.....92

Ilustración 67 Datos del día 16 de setiembre en rojo el voltaje del panel  
fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la  
irradiación en azul.....94

Ilustración 68 Datos del día 25 de setiembre en rojo el voltaje del panel  
fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la  
irradiación en azul.....95

Ilustración 69 Datos del día 4 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos.  
En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul  
.....96

Ilustración 70 Datos del día 5 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos.  
En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul  
.....97

Ilustración 71 Datos del día 6 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos.  
En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul  
.....98

Ilustración 72 Datos del día 7 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul .....	99
Ilustración 73 Datos del día 6 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul .....	100
Ilustración 74 Algoritmo de detección de falla de panel. ....	103
Ilustración 75 Diagrama básico del sistema embebido. ....	106



## RESUMEN

*El diagnóstico de fallas en sistemas de generación fotovoltaicos es de suma importancia para garantizar la continuidad de operación, índice de disponibilidad y economía de uso de los equipos alimentados por dichos sistemas. Esto es particularmente cierto en aquellos sistemas no conectados a la red, aquellos ubicados en zonas remotas o de difícil acceso o que alimentan a equipos críticos para las operaciones. Por lo tanto se hace necesario que los sistemas de generación fotovoltaica cuenten con la capacidad de diagnosticar certeramente los principales tipos de fallas que puedan afectar el sistema y comunicarlos a los operadores del mismo para efectuar una atención de las fallas efectiva y eficiente. La presente tesis expone el desarrollo e implementación de un prototipo sistema de diagnóstico como el indicado, poniendo especial atención en distinguir entre condiciones normales de operación y fallas del sistema. Se han investigado cuales son las principales fallas que afectan la operación de los sistemas fotovoltaicos y sus efectos en los parámetros eléctricos, se propone e implementa una estrategia de diagnóstico y se exponen los resultados de las pruebas en el prototipo implementado.*

*Palabras clave: Energía, Fotovoltaica, Diagnóstico.*

## ABSTRACT

*Fault diagnostics in photovoltaic generation systems is of utmost importance to guarantee the continuity of operation, availability index and economy of use of the equipment fed by said systems. This is particularly true in off-grid, those located in remote or difficult access areas or those feeding critical equipment. Therefore, it is necessary for photovoltaic generation systems to have the ability to accurately diagnose the main types of faults that may affect the system and communicate them to the operators to carry out an effective and efficient attention of the faults. This thesis exposes the development and implementation of a prototype diagnostic system as indicated, paying special attention to distinguish between normal operating conditions and system failures. Research was made on which are the main faults that affect the operation of photovoltaic systems and their effects on its electrical parameters, a diagnostic strategy is proposed and implemented and the results obtained during the the tests performed in the implemented prototype are exposed.*

*Keywords: Energy, photovoltaic, diagnostics.*

## INTRODUCCIÓN

*La problemática actual de acceso a energía limpia y libre es enfrentada por ciertas tecnologías claves como la energía fotovoltaica y eólica. Estas tecnologías todavía están en desarrollo y no pueden competir con las energías convencionales, especialmente las térmicas. Sin embargo este tipo de sistemas son especialmente apreciados y utilizados en aplicaciones rurales o alejadas de las líneas de tensión con el fin de disminuir los costos de extensión de cableado. Uno de los problemas de operar este tipo de sistemas es el monitoreo remoto de los mismos ya que una falta de aviso de fallas puede generar tiempos de baja y demoras en la atención. El presente trabajo pretende atender esta necesidad mediante el uso de tecnologías de comunicaciones y diagnóstico inteligentes.*

## Capítulo I

### PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

#### 1.1 Identificación del problema

Las fallas de origen no determinado en el funcionamiento de los generadores fotovoltaicos, son uno de los principales problemas que afectan la eficiencia de y la disponibilidad tanto del generador como de los equipos que alimentan. Estos problemas se ven agravados si el sistema está ubicado en un área remota o difícilmente accesible y si el equipo alimentado es un equipo crítico o un equipo de telecomunicaciones.

Si las fallas mencionadas no son anticipadas o se desconocen su naturaleza los equipos de mantenimiento u operaciones tienen que realizar varias visitas sucesivas para corregirlas lo cual implica mayores costos y tiempos de respuesta perjudicando la eficiencia económica del sistema haciendo necesario un sobredimensionamiento del mismo.

#### 1.2 Descripción del problema

Los sistemas de generación fotovoltaica, convierten la energía solar en energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos, almacenan dicha energía en un sistema de baterías electroquímicas y la proveen a los equipos pertinentes mediante un controlador de carga, el cual a su vez administra como los paneles cargan a las baterías.

Generalmente las fallas en un generador fotovoltaico se deben al polvo que puede adherirse a los paneles, el shadowing que es el efecto de las sombras en un panel, roturas de materiales, orientación de los paneles, defectos en las baterías, en el controlador de carga u otros componentes. También tiene cierto grado de importancia la presencia de nubes, orientación del panel y la temporada del año.

Los generadores fotovoltaicos usualmente no cuentan con un sistema de monitoreo capaz de informar al encargado de mantenimiento qué tipo de intervención tiene que hacer al generador en caso de fallas (cambio de baterías, cambio de paneles, limpieza, otras fallas). El sistema no puede predecir con anticipación qué tipo de dificultad podría tener.

En el caso de sistemas de comunicaciones ubicados en áreas remotas alimentados por estos generadores fotovoltaicos, el problema es más perjudicial, ya que al recibir la alerta de falla puede ser demasiado tarde y el sistema de comunicaciones puede caer antes de que los operadores tengan tiempo para intervenir, lo que ocasiona problemas en las operaciones, como consecuencia genera posibles visitas repetitivas e innecesarias sin información certera de la falla.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL**

Diseñar e implementar un sistema prototipo para monitoreo de funcionamiento, basado en tecnología microcontrolador, que permita el diagnóstico de fallas de un generador fotovoltaico y su comunicación adecuada a los encargados de su operación o mantenimiento.

#### **1.3.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS**

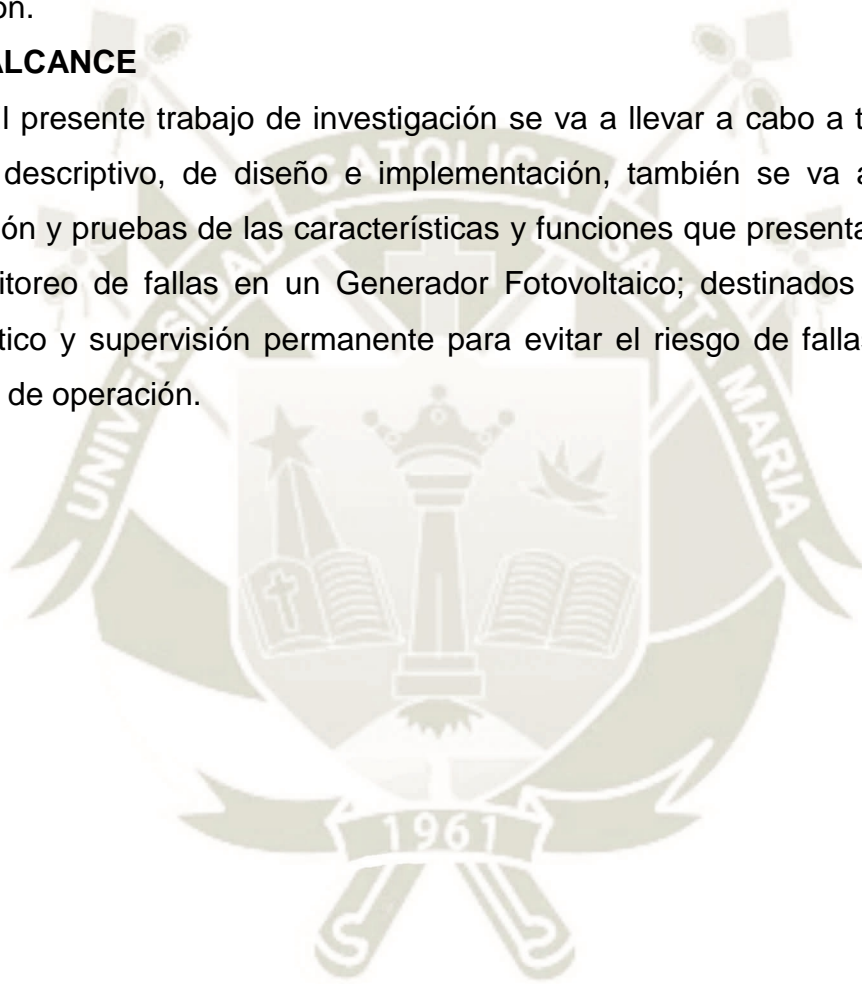
- Diseñar e implementar un sistema prototipo, que permita el monitoreo del estado de un generador fotovoltaico.
- Analizar el funcionamiento de un generador fotovoltaico, para determinar los efectos de las fallas en los valores monitoreados
- Implementar un sistema que permita el diagnóstico continuo del funcionamiento de un generador fotovoltaico, para poder comunicarlo adecuadamente a los encargados de su operación o mantenimiento.

#### **1.4 HIPÓTESIS**

Mediante el desarrollo de un sistema prototipo de monitoreo y diagnóstico, es posible la supervisión de las características y el diagnóstico de las fallas de un sistema de generación solar para evitar interrupciones en su funcionamiento y operación.

#### **1.5 ALCANCE**

El presente trabajo de investigación se va a llevar a cabo a través de un estudio descriptivo, de diseño e implementación, también se va a realizar la simulación y pruebas de las características y funciones que presenta un sistema de monitoreo de fallas en un Generador Fotovoltaico; destinados a lograr un diagnóstico y supervisión permanente para evitar el riesgo de fallas durante el proceso de operación.



## Capítulo II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

##### 2.1.1 RADIACIÓN E IRRADIACIÓN SOLAR

El Sol produce radiación convirtiendo la masa en energía a través de la reacción de elementos más pequeños (Hidrógeno) para crear elementos más pesados, en otras palabras ocurre una fusión nuclear la cual produce la radiación solar. El Sol se puede considerar como un radiador de cuerpo negro, lo que significa absorberá toda la energía que le llegue, sin embargo, irradia energía característica de sus propios procesos internos solo. Como tal, irradia una espectro de energías que dependen solo de una temperatura característica que para el Sol es 5793 K. Solo una fracción de la energía irradiada por el sol es recibida, cerca de 20 millonésimas partes. El rango de energía es  $\Delta E = 7.956 \times 10^{-21}$  J. Este es un gran número de fotones que golpean la atmósfera de la Tierra en un segundo para un rango de energía muy pequeño, explicando por qué el Sol puede suplir las necesidades energéticas anuales del mundo en una hora.

El sol irradia una potencia de 63 MW / m<sup>2</sup> en su superficie (Frank Vignola, 2012), equivalente a una pequeña planta de energía eléctrica en un metro cuadrado. Sin embargo, al borde de la atmósfera de la Tierra, la potencia es mucho menor e igual a 1366 W / m<sup>2</sup>. Esta es la constante solar y representa la irradiación, o energía por unidad de tiempo por unidad de área, que llega a la Tierra. Uno debe recordar que este es el poder extraterrestre y una cantidad significativa de la radiación es absorbida o dispersada por la atmósfera disminuyendo la irradiación aún más antes de llegar a la superficie.

##### 2.1.2 FACTORES ASTRONÓMICOS

Para entender cuánta radiación extraterrestre nos alcanza en la superficie de la Tierra, debemos considerar la relación geométrica de la Tierra con el Sol. La

declinación es realmente bastante grande de  $23^{\circ}$  o  $27^{\circ}$  grados haciendo que el Sol cambie su posición en el cielo por el doble de esta cantidad en un año tal como se muestra en la Figura 1.

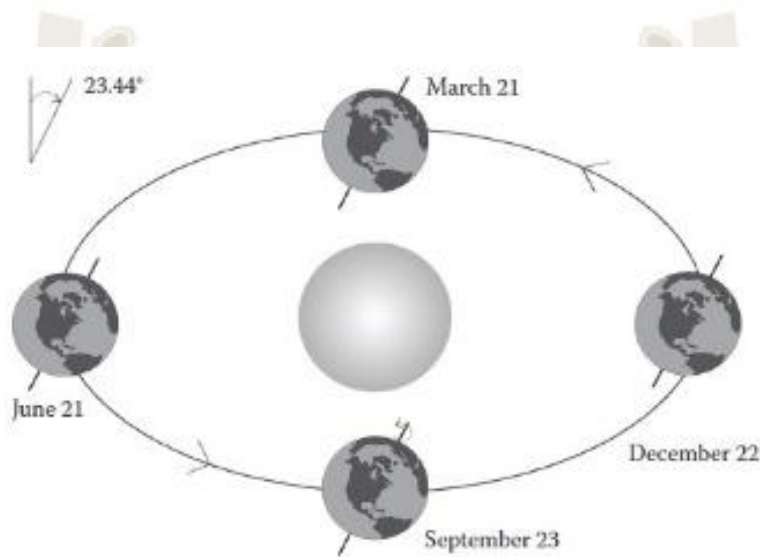


Ilustración 1 *Geometría Tierra-Sol a lo largo del año*

Los equinoccios son dos fechas en el año en las cuales la duración del día y de la noche son iguales si estuviéramos en el ecuador, el Sol estaría directamente sobre la cabeza a  $90^{\circ}$  grados en estos días para el mediodía solar. Los solsticios son dos fechas en el año en las cuales la diferencia de duración entre el día y la noche es máxima. Estas fechas determinan las estaciones del año tanto para el hemisferio norte como para el hemisferio sur. Recuerde que la diferencia de este rango de estas fechas es de seis meses entre los hemisferios norte y sur.

Si queremos conocer cuánta radiación extraterrestre nos alcanza en un punto de la superficie de la Tierra debemos conocer la altitud angular del Sol al mediodía solar que es el momento en que el sol está más alto en el cielo sobre el horizonte. Esta altitud angular varía a lo largo del año dependiendo, además de la fecha, de la latitud  $L$  en la que se encuentre el observador en la superficie terrestre.

El gráfico de la figura 2 muestra la declinación solar como una función del tiempo en una forma conocida como el analema.

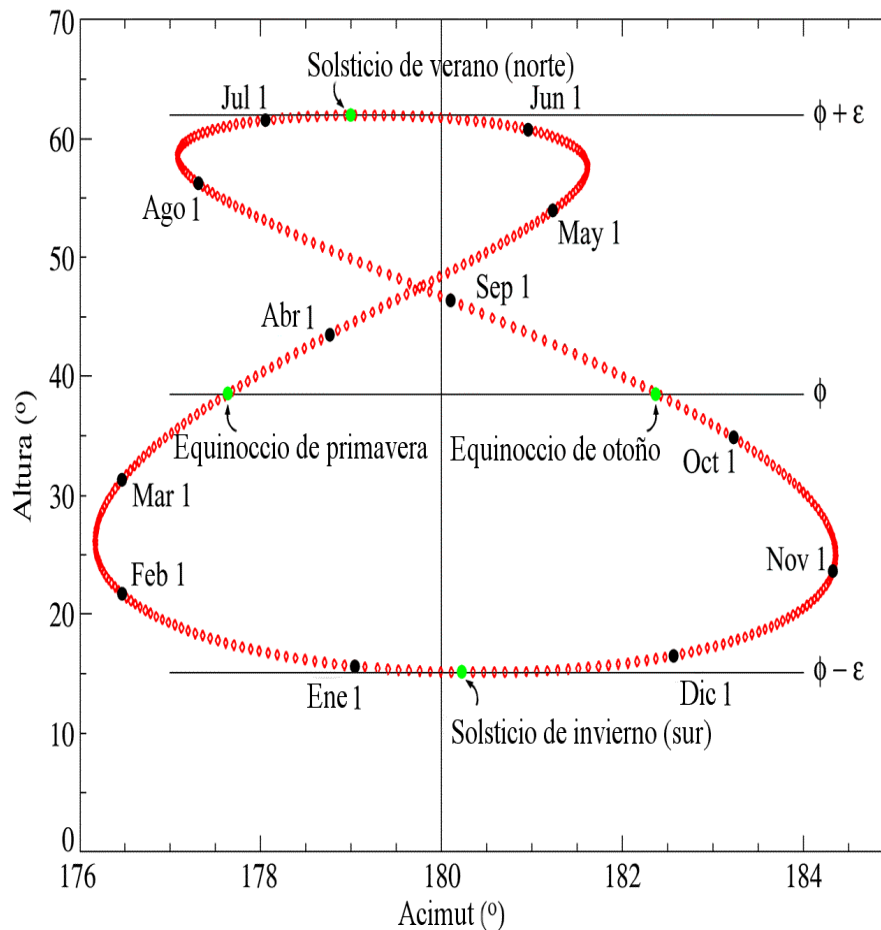


Ilustración 2 *Analema*.

Esta figura es útil para estimar el ángulo de declinación y proporciona una referencia rápida en cuanto a cuando ocurren los solsticios y equinoccios. Además, si uno fuera para enfocar una cámara en un lugar determinado en el cielo y tomar una foto el primer día de cada mes, el sol traza el patrón analémico durante el año.

como el mostrado en la figura 3. La figura 4 muestra un analema del hemisferio sur.



Ilustración 3 Fotografía secuencial de la posición del sol a lo largo del año en una ubicación del hemisferio sur.

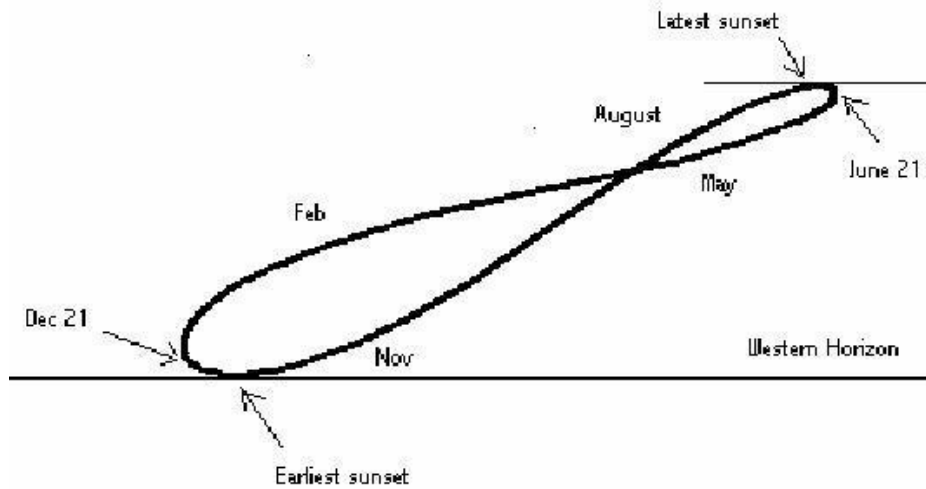


Ilustración 4 *Análema típico del hemisferio sur.*

Está claro que la altitud solar depende fuertemente del tiempo de año, así como su posición en la Tierra. En tres meses puede cambiar por 30 grados que es un valor bastante grande. Durante otros tiempos del año el cambio es mucho menor, por ejemplo, en el invierno y el verano. Este ángulo es importante para las instalaciones de sistemas fotovoltaicos ya que determinan el ángulo más óptimo en el cual disponer los paneles. Adicionalmente, el cambio en la altitud solar sobre el horizonte a lo largo del año afecta el número de horas entre el amanecer y la puesta del sol que se encuentra a partir de estas relaciones geométricas. Las horas equinociales de la luz solar en un día es 12, mientras que, si uno se encuentra a  $40^\circ$  por encima del ecuador, el día varía de 9 a 15 horas para el solsticio de invierno y de verano, respectivamente. Es este factor el cálculo más importante a realizar para el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos ya que determina la cantidad de energía que puede ser recolectada en un día y que es necesario almacenar.

### **2.1.3 FACTORES ATMOSFÉRICOS**

La radiación extraterrestre sufre la absorción atmosférica y dispersión al alcanzar la atmósfera terrestre. El espectro de radiación extraterrestre se muestra en la ilustración 5 con su poco aproximadamente en la longitud de onda 500 nm. Un espectro de radiación terrestre se muestra en la figura y se pueden apreciar las muchas caídas causadas por el agua y otros químicos presente en la atmósfera absorbiendo la radiación. Para fines de simulación y prueba la comunidad científica ha establecido un estándar el espectro terrestre que y se denota como AM1.5 como se muestra en la figura x.

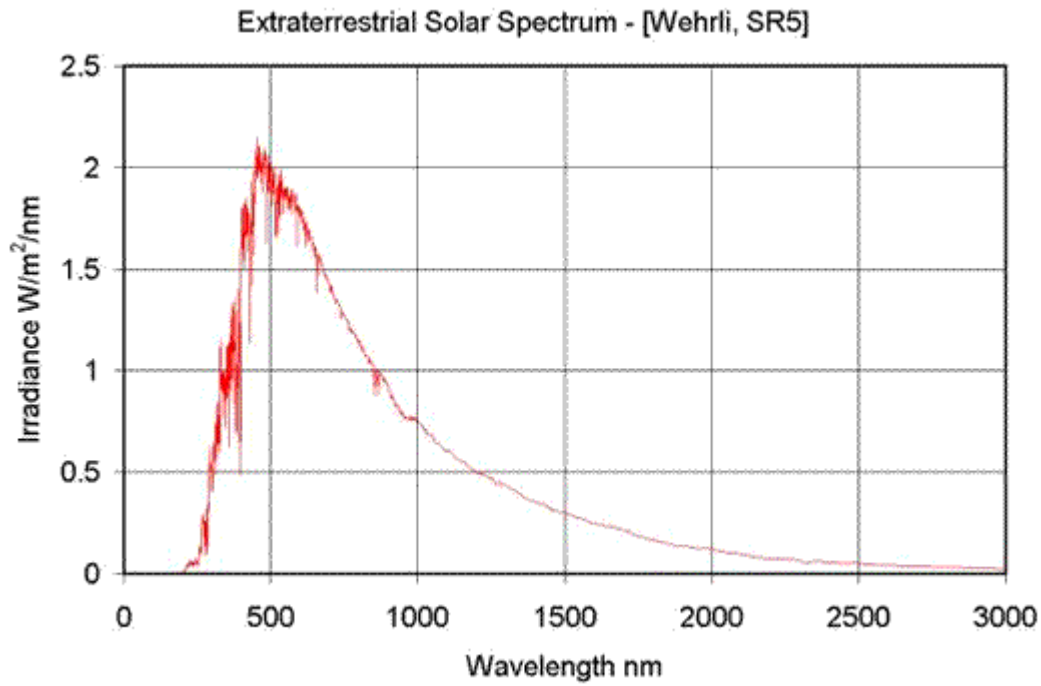


Ilustración 5 Espectro de irradiación solar extraterreste.

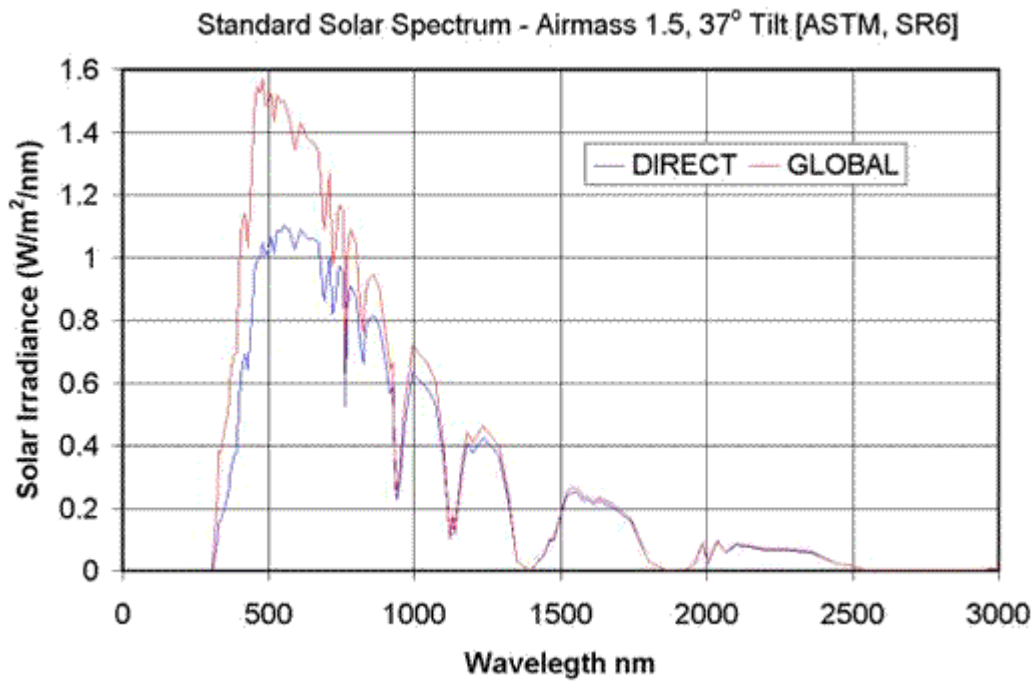


Ilustración 6 Espectros de radiación terrestre para el estándar AM15 global y directo.

El número 1.5 se refiere a una masa de aire 1,5 veces el espesor atmosférico ( $\approx 6380$  km) por encima del observador. Corresponde a la distancia que debe recorrer la luz a través de la atmósfera para alcanzar al observador. La figura X se usa para mostrar que la distancia  $x$  relativa a la distancia  $h$  representa el índice de masa de aire ( $AM \equiv x/h$ ).

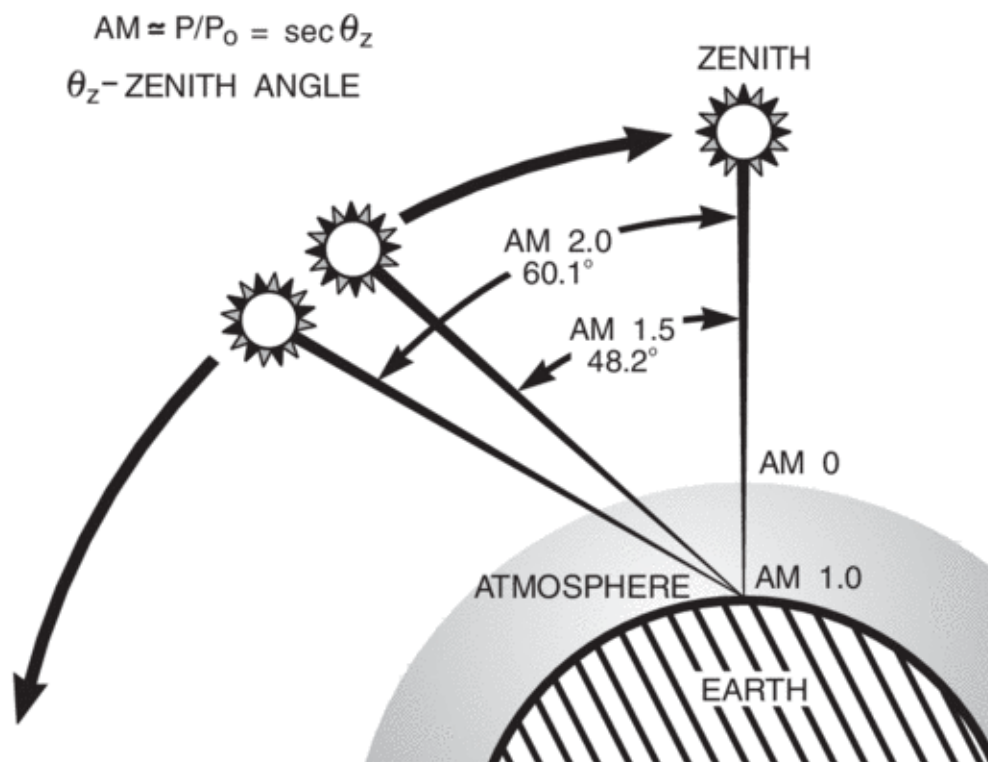


Ilustración 7 Geometría de la superficie terrestre, su atmósfera y la posición del sol.

Entonces, si el Sol está directamente sobre el observador se considera  $AM=1.0$ , o un índice de masa de aire de uno. Este índice se puede calcular fácilmente para otros ángulos con la siguiente ecuación.

Ecuación 1

$$AM \approx \frac{1}{\cos(\theta)}$$

El estándar AM1.5 tiene un ángulo de  $48.2^\circ$  desde la vertical o el cenit, sin embargo, se consideran otras variables en esta atmósfera estándar. En este estándar también se incluye que la superficie de recepción está en un ángulo de  $37^\circ$  desde la horizontal y también posicionado hacia el sur, orientado directamente hacia el ecuador (considerándose el observador en el hemisferio norte).

El espectro AM1.5 se deriva de otros espectros más antiguos desarrollados porque aproximadamente la mitad de la producción de energía solar ocurre arriba de AM1.5 y la mitad abajo. Las concentraciones estándar de agua y ozono también se consideran así como otras condiciones atmosféricas. Dado esto y usando el estándar AM1.5, la irradiación total terrestre ( $I_{ter}$ ) se determina como  $967 \text{ W / m}^2$  (Ecuación 1) al integrar gráficamente el espectro.

Esta condición estándar se corrigió arbitrariamente para dar una irradiación total de  $1000 \text{ W / m}^2$ , al multiplicarse la irradiancia energética o irradiancia espectral con un común factor de escala de  $1000/967 = 1.034$ . Esta última corrección es la razón por la cual las pruebas de los paneles solares se utilizan fuentes de irradiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  como veremos en la sección 3. Aunque arbitrario, el espectro AM1.5G es una herramienta extremadamente útil para estandarizar simulaciones y dispositivos de caracterización, así como aproximación racional a la energía solar terrestre disponible.

La letra G en AM1.5G significa Global. Esto está relacionado con el tipo de radiación solar que alcanza el dispositivo, el espectro puede incluir radiación directa, dispersada o reflejada. La cantidad de radiación que realmente llega a la superficie de la Tierra depende en varios factores, como se muestra en la figura 8, y esto define el espectro.

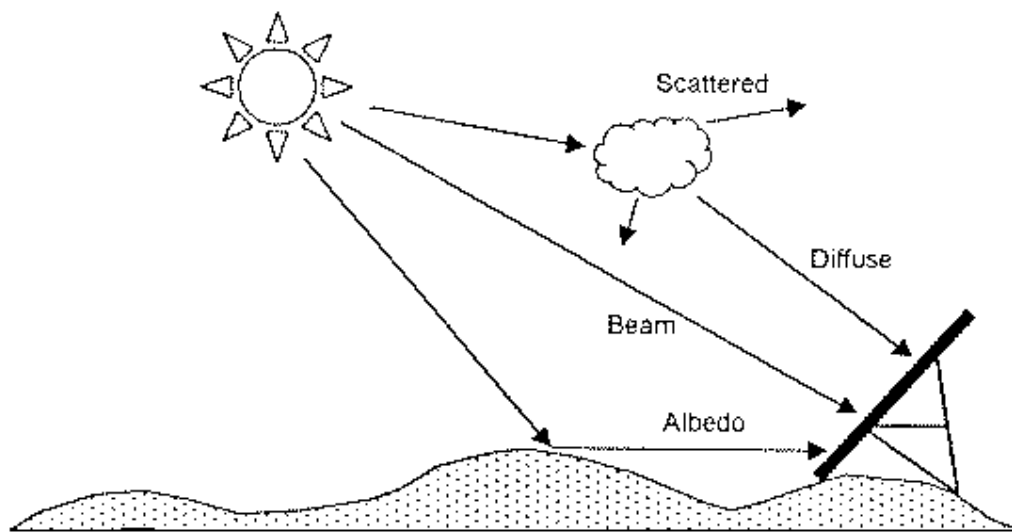


Ilustración 8 Tipos de irradiación que llegan al dispositivo.

Varios componentes contribuyen siendo el más importante el haz o irradiación solar directa ( $I_{dir}$ ), que es la radiación que llega a un dispositivo directamente del Sol. Parte de la radiación solar será absorbido por moléculas y objetos, lo que explica porque la irradiación extraterrestre  $I_{ext}$  se ve reducida a  $I_{ter}$ . Los fotones dispersados por componentes atmosféricos contribuyen al componente difuso. Finalmente, el último componente se refleja en el entorno para alcanzar el dispositivo y se llama albedo.

Dado que el espectro estándar AM1.5G representa la irradiación global este incluye los componentes directos y los componentes difusos, ambos

contribuyendo a  $I_{ter}$ . Tanto los paneles y termas solares pueden usar este tipo de radiación, por eso es este el espectro que se debe usar para simular su rendimiento.

La intensidad de radiación que llega del Sol al observador directamente es una función de muchas variables: cobertura de nubes, nivel de contaminación, ozono concentración, concentración de agua, etc. y existen muchos modelos para describirlo. Para nuestra investigación el componente directo está descrito de la forma más simple posible según la ecuación 2

Ecuación 2

$$I_{dir} = \tau \times I_{ext}$$

Donde  $\tau$  es un coeficiente de transmisión total para la propagación de la radiación a través de la atmósfera. Mientras que  $I_{dir}$  es la cantidad de radiación que se propaga directamente desde el Sol a un punto en la Tierra,  $I_{ter}$  es la radiación total en ese punto que puede incluir también el componente difuso. En general,  $\tau$  será el producto de la absorción  $\tau_{abs}$  ( $\approx 0.8$ ), la dispersión  $\tau_{disp}$  ( $\approx 0.95$ ), producida por moléculas químicas, polvo y gotitas de agua (como en las nubes), y la reflexión de la atmósfera,  $\tau_{refl}$  ( $\approx 0.8$ ) matemáticamente expresado por:

Ecuación 3

$$\tau = \tau_{abs} \times \tau_{disp} \times \tau_{refl}$$

Por lo que  $\tau$  es aproximadamente 0.608.

#### 2.1.4 IRRADIANCIA ÚTIL

$I_{dir}$  es la cantidad de radiación que llegue al observador en un punto o área muy pequeña como si estuviera mirando directamente al Sol. Dado que la mayoría de los dispositivos que funcionan con energía solar son bastante grandes y rara vez se encuentran planos en el suelo, se debe tener consideraciones adicionales para calcular cuanta irradiancia puede ser aprovechada por el dispositivo.

Adicionalmente se debe considerar que el Sol casi siempre forma un ángulo con respecto a la vertical.

Básicamente, un dispositivo que forma un ángulo con una fuente de radiación presentará menos área a esa fuente y el desafío es encontrar ese ángulo para un tiempo y fecha determinados. En muy raras ocasiones, los dispositivos solares se ubican horizontalmente en una superficie y generalmente están inclinados para maximizar la cantidad de radiación que cae sobre ellos. Una regla general es inclinarlos en un ángulo  $\beta = SLS + 10^\circ$  en dirección hacia el ecuador, es decir al sur en el hemisferio norte y al norte en el hemisferio sur. Esto puede aumentar PD ( $\beta$ ) por orden del 50%, que es bastante sustancial. Un dispositivo inclinado recibirá el haz directo y los componentes difusos así como el albedo. El componente del haz se puede decir que es

Ecuación 4

$$I(\beta) = I_{ter} \cos(\theta_s)$$

donde  $\theta_s$  es el ángulo que forman la normal del dispositivo genera con el radiación de haz directo del Sol como se muestra en la Fig 9.

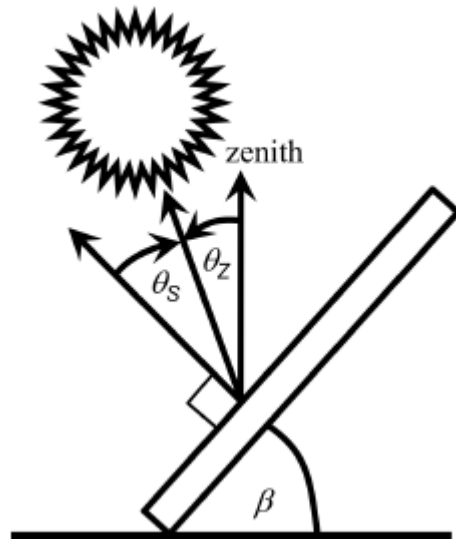


Ilustración 9 Geometría de un panel solar respecto al sol.

El autor (Keane, Pico-solar Electric Systems, 2010) muestra que  $\theta_s$  se puede definir con la siguiente ecuación:

Ecuación 5

$$\cos(\theta_s) = \cos(\theta_z) \cos(\beta) + \sin(\theta_z) \sin(\beta) \cos(\omega)$$

Entonces, cuando  $\beta = 0$  uno encuentra que  $\theta_s = \theta_z$ . De la Fig. 9 se desprende que:

Ecuación 6

$$\beta = \theta_z + \theta_z$$

$$\omega = 0$$

El mediodía solar se da cuando  $\omega = 0$ . Las ecuaciones anteriores permiten determinar  $B$  ( $\beta$ ), que como hemos señalado es el contribuyente principal de la energía que recibe un panel solar.

Si el componente difuso y la reflectancia del albedo son insignificantes, entonces uno encuentra que el dispositivo debe ser directamente perpendicular al componente del haz para generar la mayor cantidad de potencia. Esta condición

debería mantenerse para la mayoría de las condiciones en la Tierra dado que el componente directo es la fuente de poder más grande. Sólo cuando los componentes difusos y albedo se vuelven más significativos es el óptimo ángulo diferente a  $\theta_Z$ .

Si el cielo está muy nublado y no hay ningún componente de viga, entonces el ángulo óptimo es  $0^\circ$ . Esto se debe a que el componente de radiación difusa y el albedo se suponen isotrópicos y al estar el dispositivo plano en el suelo se puede coleccionar la radiación difusa de la totalidad del cielo arriba. Si el observador está en un lugar que está muy nublado la mayor parte del año entonces el ángulo  $\beta$  óptimo puede ser cero. Los casos intermedios ocurren dependiendo de la magnitud de los diversos componentes y el ángulo  $\beta$  óptimo tomará valores entre 0 y  $\theta_Z$ .

### 2.1.5 CONCLUSIÓN

La radiación solar o la insolación se produce por una serie de reacciones en el núcleo del sol. Esta reacción de fusión produce una energía muy grande que encuentra su camino hacia la superficie de la Tierra. Se puede modelar adecuadamente la distribución de energía de la radiación (espectro estándar AM15G) y se encontró que a través de la geometría Tierra-Sol y la atenuación de la irradiación por la atmósfera, la magnitud de la radiación efectiva que alcanza la superficie terrestre se reduce significativamente.

Los dispositivos con energía solar pueden usar esta radiación, sin embargo, se necesitan encontrar más relaciones geométricas para encontrar el área del dispositivo que coincide con el componente de irradiación directa. Inclinar el dispositivo desde la horizontal generalmente aumenta la potencia que se puede generar y esto puede ser significativo. Finalmente, un dispositivo con energía solar, en general, no puede absorber radiación en todos los niveles de energía y

se presentó como esta determinación es resuelta en la práctica por los fabricantes de paneles solares.

## **2.2 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS. (Commision, 2001)**

Los sistemas de generación fotovoltaicos convierten la luz del sol en electricidad y la almacenan para su uso posterior. Sus principales componentes son los paneles solares, las baterías de almacenamiento y el controlador de carga. Adicionalmente y dependiendo del tipo y tamaño de la instalación se deben considerar el cableado e interconexiones, inversor, entre otros componentes.

### **2.2.1 PANELES SOLARES.**

Los paneles solares comerciales son un conjunto ordenado de celdas solares.

#### **2.2.1.1 CELDAS SOLARES.**

La unidad básica de producción de energía solar es la celda solar. La mayoría de las células solares no se agotan o dañan mientras generando energía eléctrica. Su vida está limitada solo por ruptura o por largo plazo exposición a los elementos. Si un módulo de célula solar de alta calidad está bien protegido, debería durar más de 25 años.

Las células solares dependen de las propiedades eléctricas especiales del silicio (y otros semiconductores) que le permiten actuar como un aislante y un conductor. Dos obleas de silicio especialmente tratadas (tipo N la superior y tipo P la inferior) se unen para producir una corriente eléctrica. La radiación solar está compuesta de partículas subatómicas de alta energía llamadas fotones. Cada fotón lleva una cantidad de energía (de acuerdo con su longitud de onda); algunos fotones tienen más energía que otros. Cuando un fotón de suficiente energía golpea un átomo de silicio en una célula solar, "golpea" el electrón de silicio más externo de su

órbita alrededor del núcleo, liberándolo para moverse a través del campo eléctrico de la célula, también llamada la unión p-n (positiva-negativa). Una vez que los electrones cruzan el campo, no puedes retroceder. Como muchos electrones cruzan el campo de la celda, la parte posterior de la celda desarrolla una carga negativa. Si hay una carga conectada entre los lados negativo y positivo de la celda, los electrones fluyen como una corriente. Por lo tanto, la energía solar (en forma de fotones) continuamente desaloja los electrones de silicio de sus orbitales y crea un voltaje que 'Empuja' electrones a través de cables como corriente eléctrica. Este proceso se ilustra en la figura ccc.

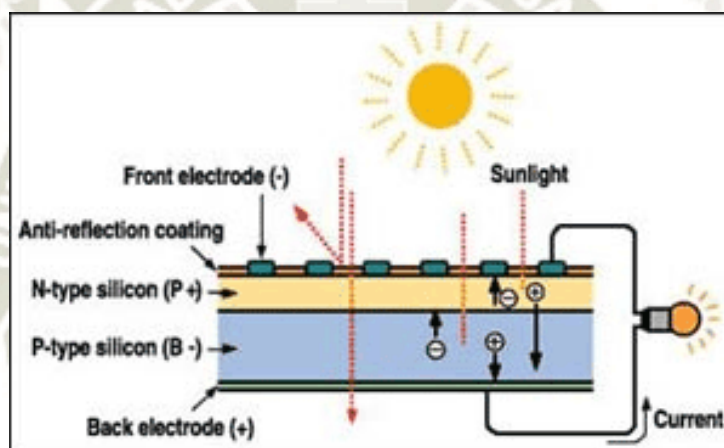


Ilustración 10 Estructura de una celda fotovoltaica (Enginnering.com, 2018)

Una luz solar más intensa da una corriente más fuerte. Si la luz deja de golpear la celda, la corriente deja de fluir de inmediato.

### 2.2.1.2 TIPOS DE CELDAS SOLARES.

Los distintos tipos de celdas solares se clasifican por el orden de su estructura cristalina calificándose como monocristalinas, policristalinas y amorfas en orden descendente de uniformidad de su estructura cristalina como se observa en la figura 11

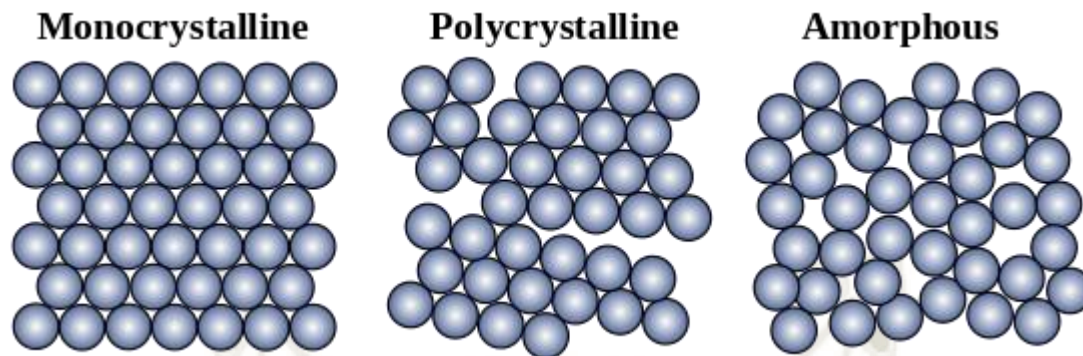


Ilustración 11 Estructura cristalina de los diversos tipos de celda fotovoltaica (WIKI, 2018)

Las características de cada tipo de celda se resumen a continuación:

Monocrystalinas: Son más caras y difíciles de fabricar con eficiencias entre 15% y 18%.

Policristalinas: Son más económicas que las monocrystalinas pero menos eficientes (de 13% a 15%).

Amorfas: Aún más económicas y mucho menos eficientes (de 6% a 8%) y durables. En general ya no son usadas ni producidas comercialmente. (Keane, Pico-solar Electric Systems )

### 2.2.1.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS MÓDULOS SOLARES.

La cantidad de corriente producida por una célula solar depende de su tamaño y tipo. Las células solares de tipo silicio generan una diferencia de potencial (voltaje) de entre 0.4 y 0.5 V en operación normal. Las celdas solares deben estar conectadas en serie para aumentar la tensión a un nivel útil y la conexión en paralelo aumenta la corriente como se puede ver en la Figura 12.

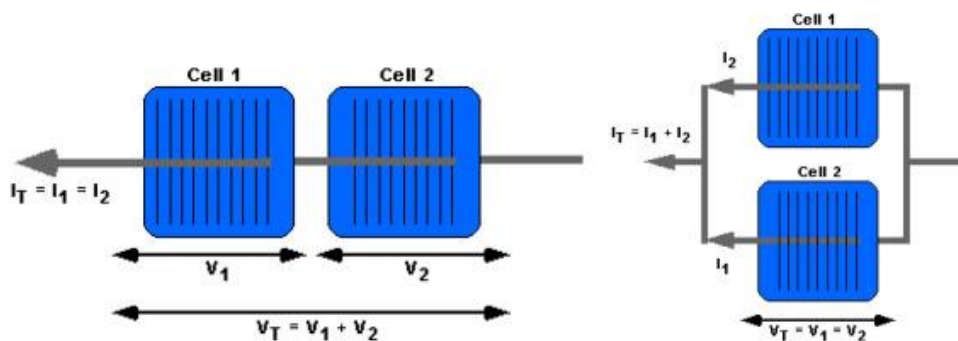


Ilustración 12 Celdas solares en serie y en paralelo (Direct, 2018)

Para la mayoría de las tareas, no es conveniente usar células solares individuales porque su salida no coincide con la demanda de carga. Cinco celdas en serie son suficientes para alimentar una calculadora de 2 V y 18 celdas normalmente se requieren para cargar una batería de 6 V. Por lo tanto, las células solares están dispuestas en serie para aumentar la tensión, y el número total de celdas depende de la aplicación.

Además, las obleas de células solares cristalinas son frágiles, por lo que deben estar protegidas de rotura y corrosión. Por estas razones, las células solares están conectadas eléctricamente en serie, luego empacados y enmarcados en dispositivos llamados módulos o paneles fotovoltaicos. El panel típico posee un marco de aluminio para asegurar la rigidez de las células y sus interconexiones y cubierto por vidrio templado para protegerlas de los elementos.

El proceso de fabricación de módulos de células solares a partir de celdas solares monocristalinos y policristalinos implica varios pasos. Una vez preparado y tratado adecuadamente con revestimientos antirreflectantes, las células solares se sueldan juntas en serie y paralelo y luego se monta entre vidrio y plástico. El proceso por el cual las células se sellan entre el vidrio y el plástico se denomina 'encapsulación'.

Durante la encapsulación, las células se sellan a alta temperatura entre las capas de plástico (un tipo especial llamado plástico EVA) y vidrio de tal manera que el aire o el agua no puede entrar y corroer las conexiones eléctricas entre las celdas. Los módulos se encuadran en marcos de metal o plástico para proteger sus bordes y evitar su torsión. El marco puede tener agujeros perforados para facilitar puntos de montaje y conexión para cables de tierra / tierra. Contactos eléctricos positivos y negativos de las celdas, cualquiera de los tornillos terminales o cables, están fijos en la parte posterior del módulo. La estructura constructiva del módulo se muestra en la figura 13.

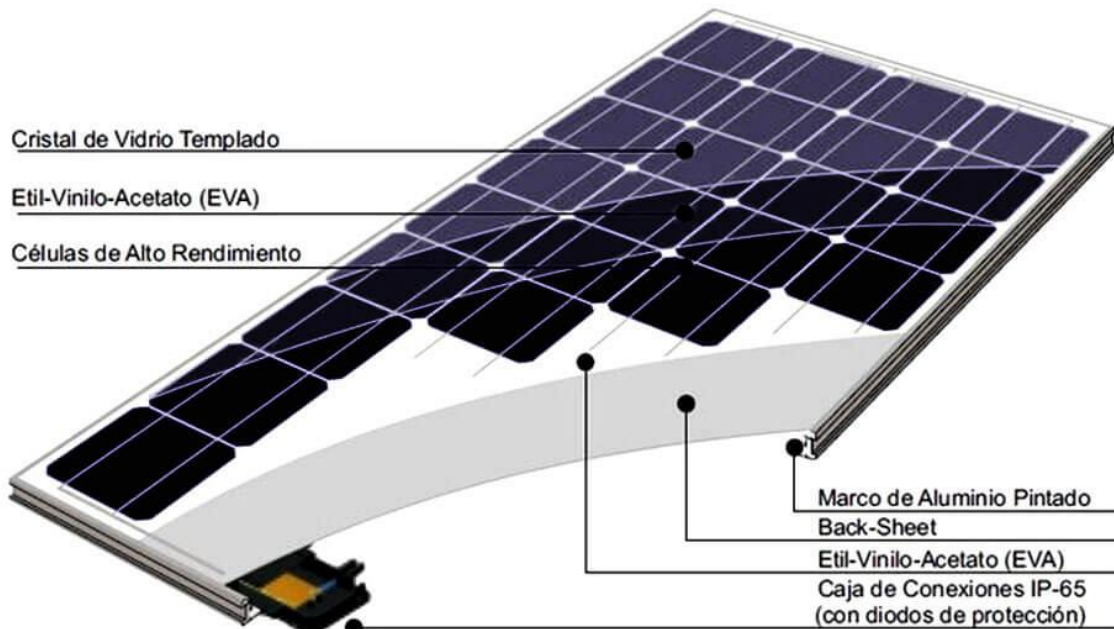


Ilustración 13 Estructura de un panel solar típico (INC., 2018)

#### 2.2.1.4 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS MÓDULOS SOLARES.

Todos los módulos de células solares se clasifican de acuerdo a su salida máxima, o 'potencia pico' también denominada potencia nominal. La potencia máxima, abreviado  $W_{mp}$  (watt-peak), se define como la cantidad de energía que se espera entregue un módulo de celdas solar entregue bajo condiciones estándar de

prueba. La prueba estándar se realiza bajo condiciones de irradiación de 1000 W/m<sup>2</sup> a 25°C como se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Condiciones y medidas de prueba estándar. permite a fabricantes y consumidores comparar cómo los diferentes dispositivos PV funcionan bajo las mismas condiciones

<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Irradiación solar:	1000	W / m <sup>2</sup>
Temperatura:	25	° C
Masa de aire:	1.5	

Los módulos casi siempre producen menos potencia que su potencia máxima nominal en condiciones de campo. El módulo debería también muestran una certificación internacional aceptable como IEC 61215 (para módulos cristalinos) o IEC 61646 (para módulos de película delgada).

Durante las pruebas de los módulos también se determinan las siguientes características:

- Voltaje y corriente pico (V<sub>mp</sub> e I<sub>mp</sub>): Los valores de voltaje y corriente para la potencia máxima en condiciones estándar de prueba.
- Voltaje de circuito abierto (VOC): Este es el voltaje máximo que proporciona la matriz cuando los terminales no están conectados a ninguna carga (una condición de circuito abierto). Este valor es mucho más alto que V<sub>mp</sub>. Este valor depende de la cantidad de paneles fotovoltaicos conectados en serie.

- Corriente de cortocircuito (ISC): La corriente máxima proporcionada por la matriz FV cuando los conectores de salida están en cortocircuito. Este valor es mucho mayor que  $I_{mp}$ .
- Punto de máxima potencia (MPP): Se refiere al punto donde la potencia suministrada por el panel (conectado a la carga) está en su valor máximo, donde  $MPP = I_{mp} \times V_{mp}$ . El punto de máxima potencia de una matriz fotovoltaica se mide en vatios (W) o vatios máximos ( $W_p$ ).
- Factor de llenado (FF): El factor de llenado es la relación entre la potencia máxima que la matriz puede proporcionar en condiciones normales de funcionamiento y el producto de la tensión de circuito abierto multiplicada por la corriente de cortocircuito ( $V_{oc} \times I_{sc}$ ). Este factor de llenado valor da una idea de la calidad de la matriz y cuanto más cerca está el factor de relleno a 1 (unidad), más poder puede proporcionar la matriz. Los valores típicos están entre 0.7 y 0.8.
- Eficiencia porcentual (% eff): La eficiencia de una matriz fotovoltaica es la relación entre la potencia eléctrica máxima que la matriz puede producir en comparación con la cantidad de radiación solar que llega a la matriz. La eficiencia de una matriz solar típica es normalmente baja varía entre 10-18%, dependiendo del tipo de células (amorfa, policristalina o monocristalina) que se utilice.

#### 2.2.1.5 CURVAS CARACTERÍSTICAS I-V.

Las Curvas características de la celda solar I-V muestran las características de corriente y voltaje (I-V) de una celda, módulo o conjunto fotovoltaico particular, dando una descripción detallada de su capacidad y eficiencia de conversión de energía solar. Conocer las características eléctricas I-V de una célula solar o panel es fundamental para determinar el rendimiento de salida del dispositivo y la eficiencia solar.

Las Curvas de Características de la Célula Solar I-V son básicamente una representación gráfica de la operación de una célula solar o módulo que resume la relación entre la corriente y la tensión en las condiciones existentes de irradiancia y temperatura. Las curvas I-V brindan la información necesaria para configurar un sistema solar de modo que pueda operar lo más cerca posible de su punto de máxima potencia pico (MPP). El gráfico 4 muestra las características de voltaje de corriente (I-V) de una célula fotovoltaica de silicio típica que funciona en condiciones normales.

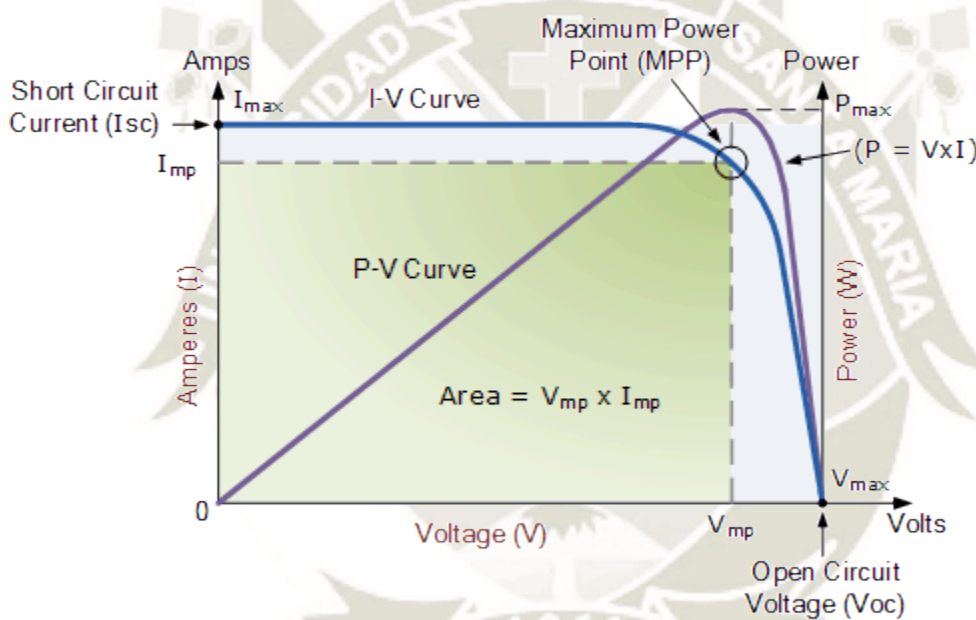


Ilustración 14 Curva V-I Típica de un sistema fotovoltaico. (Tutorials, Alternative Energy, 2018)

La potencia entregada por una célula solar es el producto de la corriente y el voltaje ( $I \times V$ ). Si se hace la multiplicación, punto por punto, para todos los voltajes de cortocircuito a condiciones de circuito abierto, la curva de potencia anterior se obtiene para un nivel de radiación dado. Con la célula solar en circuito abierto, que no está conectada a ninguna carga, la corriente estará en su mínimo (cero) y el voltaje a través de la celda alcanza su máximo, conocido como voltaje de

circuito abierto de las células solares, o Voc. En el otro extremo, cuando la célula solar está en cortocircuito, es decir, las derivaciones positiva y negativa conectadas entre sí, el voltaje en la celda está en su mínimo (cero) pero la corriente que sale de la celda alcanza su máximo, conocido como corriente de cortocircuito de células solares, o Isc.

Luego, el rango de la curva de características I-V de la celda solar varía desde la corriente de cortocircuito (Isc) a voltajes de salida cero, hasta la corriente cero en el voltaje de circuito abierto completo (Voc). En otras palabras, la tensión máxima disponible de una celda está en circuito abierto, y la corriente máxima en circuito cerrado. Por supuesto, ninguna de estas dos condiciones genera energía eléctrica, pero debe haber un punto intermedio en el que la célula solar genera la potencia máxima.

Los paneles fotovoltaicos se pueden conectar juntos o en combinaciones en serie o en paralelo para aumentar la capacidad de voltaje o corriente de la matriz solar. Si los paneles de la matriz se conectan juntos en una combinación en serie, entonces la tensión aumenta y si se conectan juntos en paralelo, entonces la corriente aumenta. La potencia eléctrica en vatios, generada por estas diferentes combinaciones fotovoltaicas seguirá siendo el producto del voltaje por la corriente ( $P = V \times I$ ). Sin embargo, los paneles solares están conectados entre sí, la esquina superior derecha siempre será el punto de máxima potencia (MPP) de la matriz. Este efecto de las conexiones serie y paralelo en las curvas I-V se muestran en la figura 15.

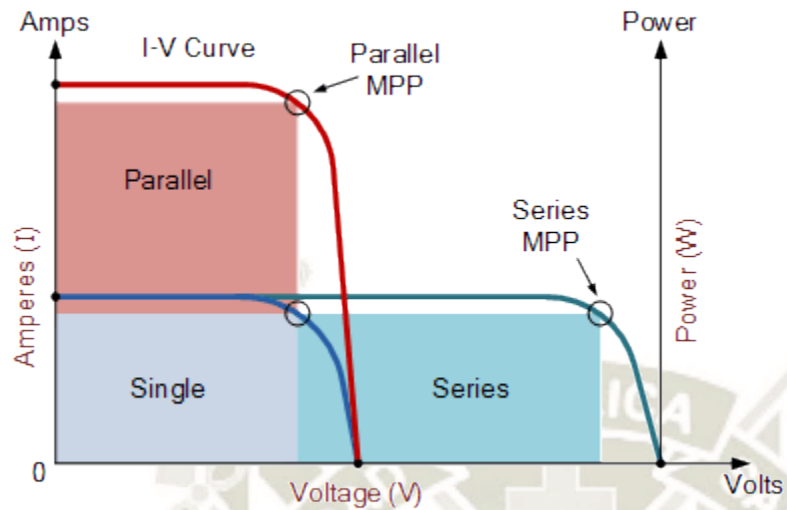
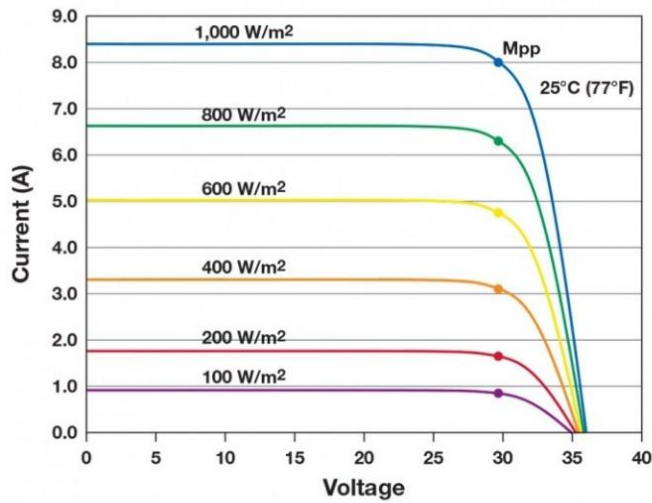


Ilustración 15 Curvas V-I de dos paneles en serie y en paralelo. (Tutorials, Alternative Energy, 2018)

### 2.2.1.6 EFECTOS DE LA RADIACIÓN Y LA TEMPERATURA.

Las curvas I-V sirven fundamentalmente para mostrar los efectos de la irradiación y la temperatura en la capacidad de generación de los paneles solares. Las características eléctricas de una matriz fotovoltaica se resumen en la relación entre la corriente de salida y la tensión. La cantidad e intensidad de la radiación solar (radiación solar) controla la cantidad de corriente de salida (I) y la temperatura de funcionamiento de las células solares afecta la tensión de salida (V) de la matriz FV. Las figuras 16 y 17 muestran el efecto de la temperatura y la irradiación en las curvas I-V

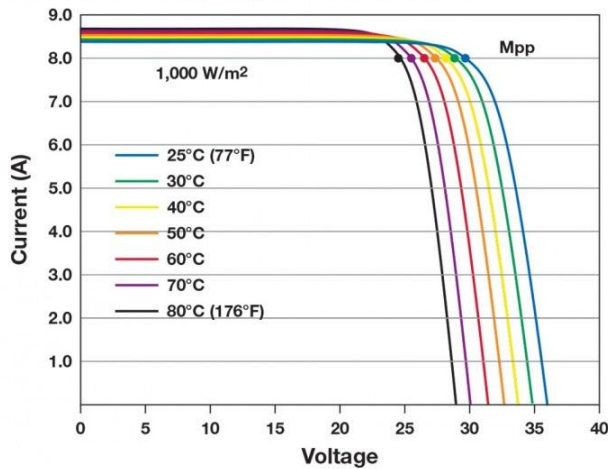
Insolation Effects on Maximum Power Point



Less sunlight on the module (due to clouds, shading, or dirt) reduces the amperage of the maximum power point (Mpp).

Ilustración 16 Efecto de la irradiación solar en el punto de máxima potencia.

Effect of Cell Temperature on MPP



Higher cell-operating temperatures reduce the voltage (V) of the maximum power point (Mpp).

Ilustración 17 Efecto de la temperatura en el punto de máxima potencia.

La salida del módulo solar está determinada principalmente por la intensidad de la radiación solar en un módulo. La figura 16 muestra que la salida del módulo es directamente proporcional a la irradiación solar. Reducir a la mitad la intensidad

de la radiación solar reduce la salida del módulo por la mitad. La radiación más baja también reduce el voltaje al que se produce la corriente. La cobertura de nubes reduce la potencia de salida de un módulo a un tercio o menos de su salida del tiempo soleado. Durante el tiempo nublado, el voltaje de un módulo también es reducido.

A diferencia de los dispositivos solares térmicos, la mayoría de los módulos fotovoltaicos solares producen menos energía a mayor sea la temperatura a la que operen. A medida que la temperatura aumenta, la potencia de salida de la energía solar en las células monocristalinas cae en un 0,5% por grado centígrado (esto se muestra por la curva I-V en Figura 16). Por lo tanto, un aumento de la temperatura de 5 ° C provocará una caída del 2.5 por ciento en la potencia salida. Cuando se montan al sol, los módulos de células solares suelen ser 20 ° C más cálidos que la temperatura del termómetro. Tenga en cuenta las diferencias en las curvas I-V en varios temperaturas.

#### **2.2.1.7 EFECTOS DEL SOMBREADO EN LA SALIDA DEL MÓDULO.**

Obviamente, si una sombra cae sobre la totalidad o parte de un módulo, su salida eléctrica será reducida. De hecho, incluso sombrear una sola celda puede reducir considerablemente a la salida del módulo y posiblemente dañarlo. El daño se produce porque las celdas de un módulo están conectadas en serie y cada una de ellas debe llevar la misma corriente. Cuando una celda (o más) está sombreada, deja de producir corriente y en su lugar consume actual, convirtiéndolo en calor. Este efecto es conocido como ensombrecimiento o "Shading". El gráfico18 muestra la naturaleza de este efecto.

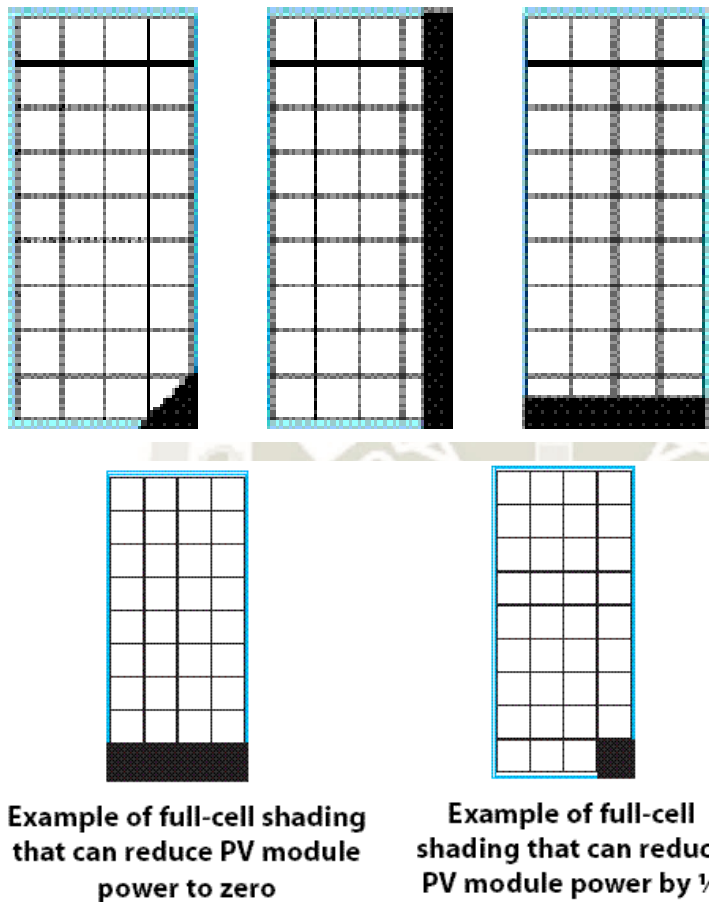


Ilustración 18 Efecto de ensombrecimiento.

Si una sola celda está sombreada por un tiempo prolongado, puede causar la falla de todo el módulo. Incluso una sola rama de árbol o un poste puede sombrear una celda y causar que la producción eléctrica caiga drásticamente.

### 2.2.2 BATERÍAS.

Las baterías en un sistema fotovoltaico tienen el propósito de almacenar electricidad para que pueda ser utilizada cuando sea necesario, particularmente de noche, para luego ser recargadas al día siguiente. Una recarga se llama ciclo de recarga. La mayor parte de baterías se puede recargar miles de veces, es decir

que tienen miles de ciclos de recarga. La cantidad de veces que una batería recargable puede cargarse y descargarse varía según el tipo de batería, la química que se utiliza y la forma en que la batería se recarga y descarga. En un sistema fotovoltaico, las baterías recargables están conectadas al módulo o arreglo fotovoltaico a través de un controlador de carga solar usado para recargar la batería. Mientras que las baterías recargables vienen en una amplia gama de formas, tamaños y tipos químicos, todas operan de acuerdo con los mismos principios generales. Están diseñadas para ser recargadas por el flujo de corriente eléctrica, almacenar la energía como energía química y luego liberar la energía necesaria para alimentar los equipos conectados al sistema, todo el tiempo protegidas contra sobrecarga y descarga por el controlador de carga. Las baterías recargables son esencialmente como depósitos de energía que pueden ser recargadas cuando los niveles de energía caen.

Los tipos de baterías más comunes para su uso en aplicaciones solares son las batería libres de mantenimiento particularmente las baterías batería de ácido-plomo regulada por válvula o VRLA por sus siglas en inglés (Valve-regulated lead-acid battery) y las de separador de vidrio absorbente o AGM por sus siglas en inglés (Absorbed Glass Mat) las cuales tienen las siguientes ventajas:

- Pueden ser montadas en cualquier sentido.
- Necesitan mantenimiento mínimo.
- Reduce riesgo de derrames.
- Permiten tamaños pequeños.

Dependiendo de la aplicación el banco de baterías debe proporcionar una autonomía entre 2 y 5 días. Por ejemplo para aplicaciones domésticas lo usual son autonomías de 3 a 5 días. Mientras sistemas de sensores o telecomunicaciones rurales suelen tener autonomías entre 2 a 3 días. A mayor

sea la autonomía menor es la necesidad de recarga y por lo tanto las baterías demoran más en consumir sus ciclos de carga y deteriorarse.

### 2.2.2.1 CAPACIDAD DE LA BATERÍA.

Capacidad de la batería La cantidad de energía que se puede almacenar en cualquier batería se conoce como la capacidad de la batería. Hay dos formas de medir la capacidad de una batería: Amperios-hora (Ah), que se refiere a la corriente que se puede suministrar en una hora o Vatios-hora (Wh), que es el contenido de energía real de la batería (Ah por el voltaje) que es menos preciso que medir la capacidad en Ah. La cantidad de corriente que una batería puede entregar varía dependiendo de la tasa de carga o descarga.

Cuando las baterías se conectan en serie aumentan su voltaje y mantienen constante su capacidad. Cuando las baterías se conectan en paralelo mantienen su voltaje y aumentan su capacidad. La figura 19 muestra esta característica de las baterías.

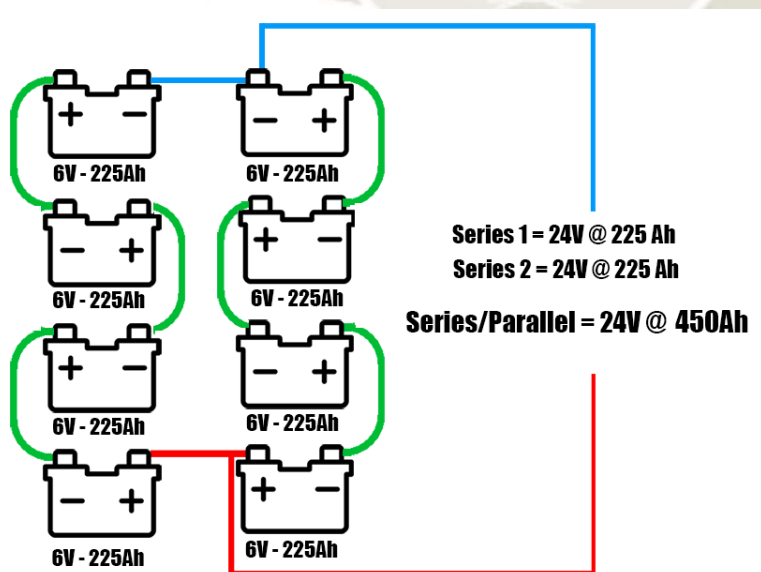


Ilustración 19 Arreglo de baterías en conexión serie-paralelo

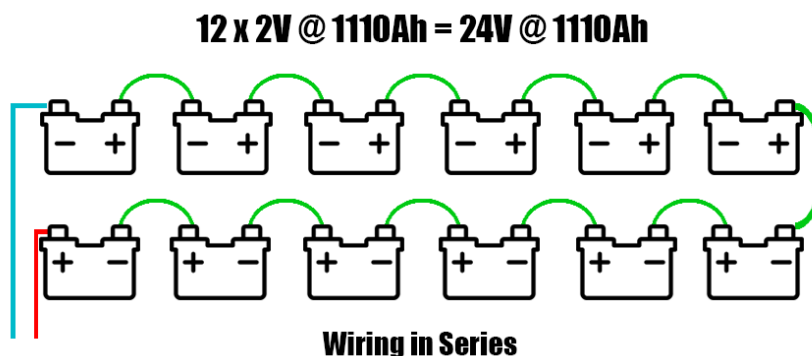


Ilustración 20 Arreglo de baterías en conexión serie. (<https://mozaw.com/best-solar-batteries/>)

#### 2.2.2.2 CONSTANTE DE CARGA DESCARGA C.

La capacidad de una batería (la cantidad de energía que puede almacenar una batería) es normalmente especificada en amperios-hora (Ah) o miliamperios-hora (mAh) Esta cifra indica la cantidad de energía que se puede extraer de la batería. En teoría, una batería con una capacidad de 250 Ah, por ejemplo, es capaz de entregar una corriente de 250 Amperios por 1 hora, 25 Amperios por 10 horas, 50 Amperios por 20 horas, y así sucesivamente. En la práctica, sin embargo, la velocidad a la cual la batería se descarga afecta la capacidad de la batería. Como la tasa de la descarga aumenta (corrientes más altas), las pérdidas también aumentan, lo que significa que la batería es capaz de entregar menos energía en general. Del mismo modo, cuanto menor sea la tasa de descarga, se pierde menos energía, aumentando efectivamente la cantidad de energía una batería puede entregar. La tabla 2 muestra las capacidades de una batería conforme se varía su velocidad de descarga.

<b>Clasificación</b>	<b>Tiempo de descarga (horas)</b>	<b>Capacidad de la batería. (Ah)</b>	<b>Carga (Amps)</b>	<b>Energía disponible (KWH)</b>
----------------------	---	--	-------------------------	-------------------------------------

C5	5	303	60.6	1.82
C10	10	340	34	2.04
C20	20	370	18.5	2.22
C100	100	411	4.11	2.47

Tabla 2 Capacidades de una batería conforme se varía su velocidad de descarga. En las hojas de datos de las baterías, la tasa de descarga se indica como C-rate. Una constante de C1 se refiere al flujo de corriente necesario para descargar la batería por completo en 1 hora. Del mismo modo, una constante de C10 se refiere al flujo de corriente necesaria para descargar una batería completamente en 10 horas, y así sucesivamente. Los sistemas están diseñados considerando su velocidad de descarga más cercana a la aplicación a usar, por ejemplo C20 para una aplicación que se recarga diariamente o C10 para una aplicación de iluminación nocturna.

### 2.2.2.3 ESTADO DE CARGA DESCARGA (SoC)

El SoC (por sus siglas en inglés State of Charge) de una batería indica el nivel de energía restante en la batería. La Figura 21 muestra cómo sube y baja el SoC a medida que la energía entra y sale de la batería.

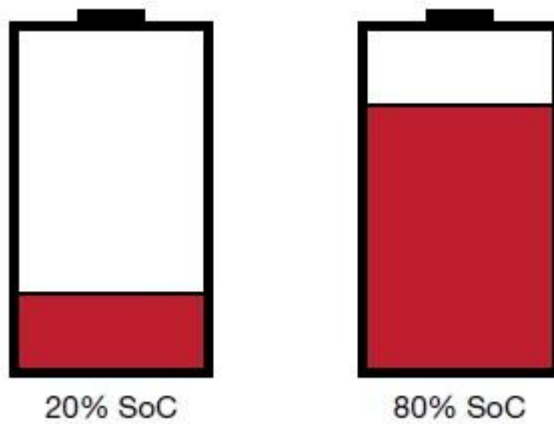


Ilustración 21 Estado de carga y descarga de las baterías.

El voltaje de una batería varía en diferentes estados de carga. La tabla 4 muestra cómo el voltaje de las baterías con una tensión nominal de 6 V y 3.7 V, respectivamente, varía de acuerdo a diferentes SoC.

Tabla 3 Este ejemplo muestra cómo el voltaje de baterías con una tensión nominal de 6 V y 3.7 V respectivamente, varían según diferentes SoC. Pico-solar Electric Systems John Keane

<i><b>Voltaje Nominal = 6 V</b></i>	<i><b>Voltaje Nominal = 3.7 V</b></i>	<i><b>SoC</b></i>
6.4	4.1	100%
6.25	3.95	80%
6.1	3.85	60%

6	3.7	40%
5.85	3.4	20%

---

Tabla 3 Voltajes Nominales vs Estado de Carga en una batería típica

#### 2.2.2.4 PROFUNDIDAD DE DESCARGA (DoD)

La profundidad de descarga DoD (por sus siglas en inglés Depth of Discharge) se puede definir como el grado en que una batería se descarga de energía antes de que se vuelva a recarga. Es esencialmente medido de la misma manera que el SoC. Un SoC del 30 por ciento significa que la batería ha alcanzado un DoD del 70 por ciento. Como regla, cuanto menos batería se descargue una batería cada día, mayor será su vida útil general. La figura 22 muestra cómo la cantidad de ciclos de carga de una batería se ven afectados por niveles de DoD menores al 100%.

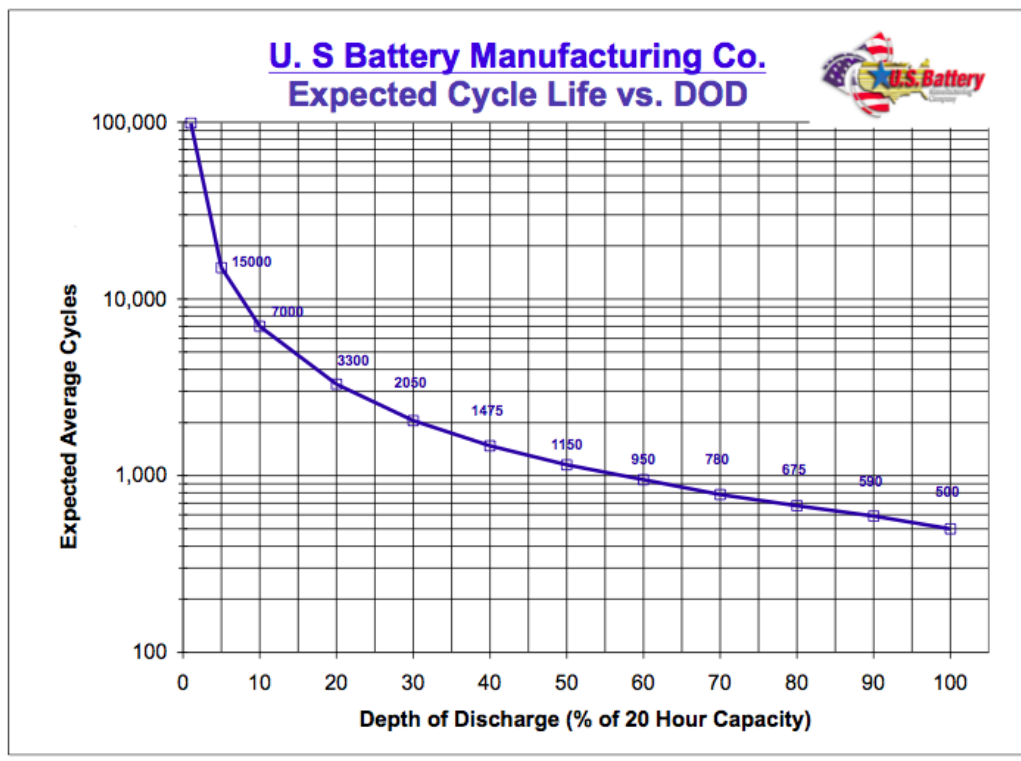


Ilustración 22 Profundidad de descarga versus ciclos de descarga esperados (INC, 2018)

Cuanto menos profundamente se descargue una batería, más larga es su vida útil y el número de ciclos de recarga. La figura antes presentada representa la relación entre DoD y ciclo de vida para una batería en especial. El dato para una batería específica se puede encontrar en su hoja de datos.

Quizás la diferencia clave entre las baterías de plomo tradicionales y las más nuevas tecnologías es el grado en que se pueden descargar. Las baterías de plomo usadas en los sistemas solares generalmente muestran un DoD de 50%-80%, lo que significa que solo es posible usar del 50 al 80 por ciento de la capacidad real batería antes de que deba recargarse nuevamente. Descargar la batería más allá del DoD recomendado para cualquier batería en particular, dañará la batería y reducirá su vida útil.

Los sistemas fotovoltaicos tienen un controlador de carga solar, integrado en los circuitos del producto o como una unidad separada, diseñada para proteger la batería de sobrecarga (demasiada electricidad) e incluye una función de desconexión de bajo voltaje que está diseñado para proteger la batería de la descarga más allá de niveles seguros. La manera en que funciona la desconexión de bajo voltaje es que la batería se desconecta automáticamente cuando la tensión cae a un cierto nivel a medida que disminuye su SoC, protegiendo así la batería de niveles de descarga que pueden causar daños.

#### **2.2.2.5 AUTODESCARGA**

Todas las baterías pierden carga cuando no se usan por largos períodos. La velocidad a la cual las baterías pierden su carga varía dependiendo del tipo de batería, cómo se almacenan y a qué temperatura. Si se deja en un SoC bajo durante largos períodos, existe el riesgo de baterías dañadas permanentemente, reduciendo su rendimiento y capacidad de funcionamiento. Esto es particularmente un problema para las baterías de plomo-ácido.

#### **2.2.2.6 EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA BATERÍA.**

Las baterías contienen productos químicos que almacenan energía y, como todos los productos químicos, son impactados por los cambios en la temperatura. Exponer las baterías a temperaturas cálidas en la mayoría de los casos, provocará un aumento de la corrosión, pero es más probable que una batería llegará al final de su vida antes de que se termine por la corrosión causada por exposición al calor.

La temperatura sin embargo también tiene un efecto en la capacidad de la batería. En general a mayor temperatura mayor es la capacidad de la batería. La tabla 4 muestra el efecto de distintas temperaturas en la capacidad de una batería.

Este ejemplo muestra cómo la capacidad de una batería varía según diferentes temperaturas ambientales. (Keane, Pico-solar Electric Systems, 2010)

Tabla 4 Efectos de la temperatura en la capacidad nominal de la batería.

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>% Capacidad Nominal</i>
40 °C	102%
25 °C	100%
0 °C	85%
-15 °C	65%

### 2.2.3 CONTROLADOR DE CARGA.

Los controladores de carga solares tienen como función limitar la velocidad a la que la corriente eléctrica se agrega o se extrae de las baterías teniendo en cuenta los siguientes objetivos:

- Prevenir la sobrecarga y proteger contra sobretensiones, que pueden reducir el rendimiento de la batería o su tiempo de vida además de suponer un riesgo de seguridad.
- Prevenir por completo el drenaje (descarga profunda) de una batería, o realizar descargas controladas, dependiendo de la tecnología de las baterías, para proteger la vida de la batería.

### 2.2.3.1 CONTROLADORES ON/OFF Y PWM.

Los controladores de carga más simples (denominados ON/OFF) simplemente desconectan o desvían la batería solar cuando el voltaje de la batería alcanza aproximadamente 14,4 V (para la batería de almacenamiento con tensión nominal de 12 V). Cuando el voltaje cae a 12.5-13V, se reconectan los paneles y las baterías para cargarlas de nuevo. Dicho algoritmo permite cargar las baterías al 60-70%. Si esto sucede con regularidad se produce sulfatación y la duración de la batería se reduce.

Controladores más avanzados mantienen la carga de las baterías después de que se alcanza el umbral de 14,4 V. Este tipo de controladores usan la técnica denominada modulación de ancho de pulso de corriente de carga. Esto permite cargar la batería al 100%. En esencia, este tipo de controlador de carga actúa reduciendo la corriente de la fuente de energía de acuerdo a la condición de la batería y los requisitos de recarga, que está en contraste con los controladores on / off que cortan de repente la transferencia de potencia para minimizar la sobrecarga de la batería. El controlador de carga PWM hace esto mediante la comprobación del estado de la batería para determinar cuan anchos deben ser los pulsos, así como su frecuencia. El controlador usa esta capacidad de regular la corriente para mantener la carga de la batería en una de las etapas mostradas en la figura 23 dependiendo de los niveles de energía producidas por los paneles y la corriente almacenada en la batería.

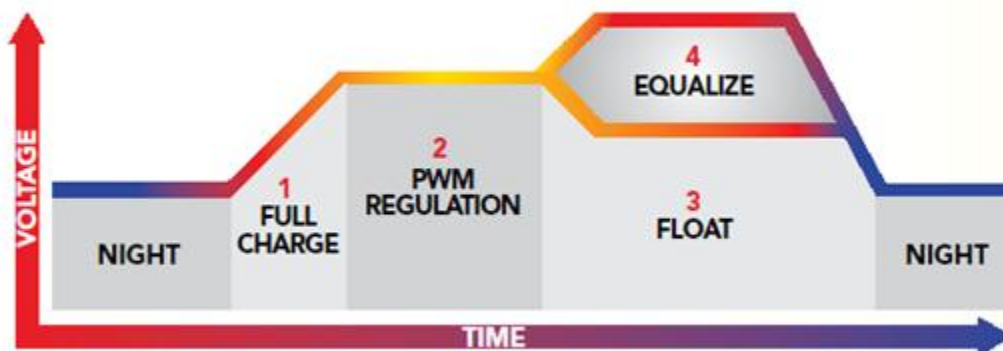


Ilustración 23 Curva de carga de un controlador PWM.

Se trata esencialmente de un encendido y apagado rápido. Cuando la batería está casi descargada, los pulsos pueden ser largos y continuos, y ya que se carga, los pulsos se acortan. Este modo de carga se llama de “float” y es importante para que los sistemas pueden salir de días o semanas con exceso de energía durante los períodos en que se consume muy poco de la energía solar. Este tipo de controlador de carga es específico para los sistemas fotovoltaicos, donde el exceso de energía es una ocurrencia regular, y proporcionan varias ventajas importantes: una mayor eficiencia de carga, recarga rápida, y baterías que operan a plena capacidad y duran más.

### 2.2.3.2 CONTROLADORES MPPT.

El rastreador de puntos de máxima potencia (MPPT) usa componentes electrónicos para que la matriz fotovoltaica funcione de manera que produzca la máxima cantidad de potencia posible. El MPPT no es un sistema de seguimiento mecánico, sino un sistema electrónico que puede variar el punto de funcionamiento eléctrico de los módulos para garantizar un rendimiento óptimo y por lo tanto, salida máxima. El punto de máxima potencia se puede obtener a partir de los gráficos I-V (vistos en la sección 2.2.1.5) como se ven en la figura 14. La figura muestra junto a la curva I-V la curva de potencia superpuesta.

Como se puede ver en la figura el punto de máxima potencia ocurren en un punto de la curva I-V comúnmente llamado la “rodilla” de la curva. Este es el punto en el cual el sistema funciona con máxima eficiencia. Como también vimos en la sección 2.2.1.5 las curvas V-I varían de acuerdo a la irradiación y a la temperatura por lo que el controlador MPPT necesita rastrear el punto de máxima potencia (Pmp) de la matriz a intervalos regulares durante todo el día debido a las diferentes condiciones de irradiación o sombreado. Algunos modelos de controlador MPPT también miden la temperatura de las baterías y paneles para mejorar su eficiencia.

La ventaja original prevista de un controlador de carga MPPT es que rinde entre un 5 y un 25% más de potencia, dependiendo del clima y la temperatura, en comparación con un controlador PWM tradicional. Un efecto secundario que podemos aprovechar es la regulación de voltaje. A un controlador MPPT no le importa cuál es el voltaje de la matriz entrante (dentro de algunos límites). Simplemente quiere saber cuál debería ser el voltaje de salida al banco de baterías. Por lo tanto, si se utiliza un controlador MPPT, un solo panel a 29 voltios puede cargar correctamente un banco de baterías de 12 voltios, obteniendo el uso completo de la potencia disponible. Se pueden conectar dos paneles en serie a 58 voltios para cargar un banco de baterías de 24 voltios (o un banco de 12 voltios), de esta manera se puede tener un mayor margen para que las baterías entren en estado de carga sobre todo en horas de la mañana.

### Capítulo III DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

#### 3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.

Para la realización del presente diseño fue necesaria la implementación de una plataforma de prueba consistente en un sistema de generación fotovoltaico compuesto por un panel solar, una batería y un controlador de carga. Posteriormente se diseñó e implementó el hardware del monitor de estado y se programó el software necesario para el registro de los datos necesarios para las posteriores pruebas del sistema integrado. El diagrama mostrado en la ilustración 24 muestra el procedimiento descrito.

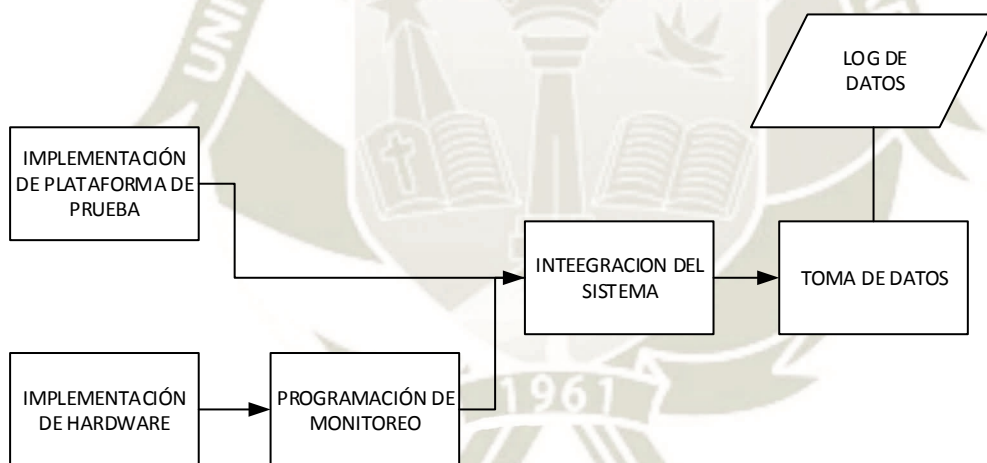


Ilustración 24 Procedimiento descrito.

El diagrama mostrado en la ilustración 24 muestra la implementación del sistema de pruebas. Una foto del sistema instalado se muestra en la ilustración 25.

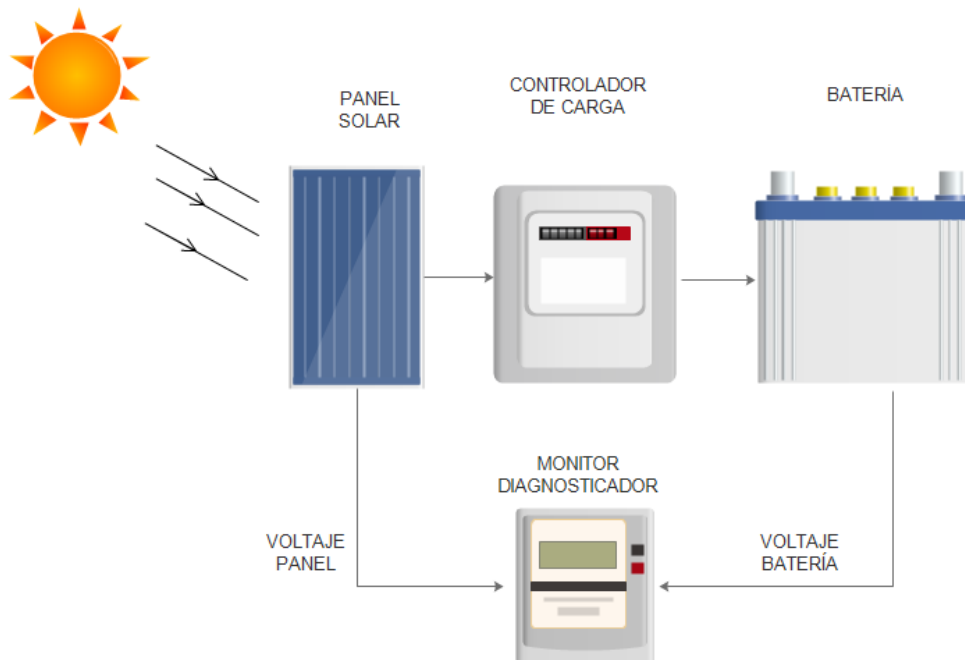


Ilustración 25 Esquema básico del sistema de registro de datos



Ilustración 26 Sistema implementado para registro de datos

### **3.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO.**

Para las pruebas del sistema se implementó un sistema de generación fotovoltaico compuesto por un panel solar, un controlador de carga tipo MPPT y una batería AGM de 12 Voltios y 26 Ah

#### **3.2.1 COMPONENTES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.**

El sistema fotovoltaico está conformado por los siguientes componentes.

##### **a. PANEL SOLAR.**

Se utilizó un panel solar con potencia nominal con las siguientes características:

Modelo: SY-30M

Potencia máxima nominal: 30 Watts

Voltaje a máxima potencia : 17.2 Voltios

Corriente a máxima potencia: 1.75 Amperios

Corriente de corto circuito: 1.92 Amperios

Voltaje de circuito abierto: 21.6 Voltios

Dimensiones: 450x540x25 mm

En condiciones estándar de prueba.

La ilustración 27 muestra la placa de características del panel:

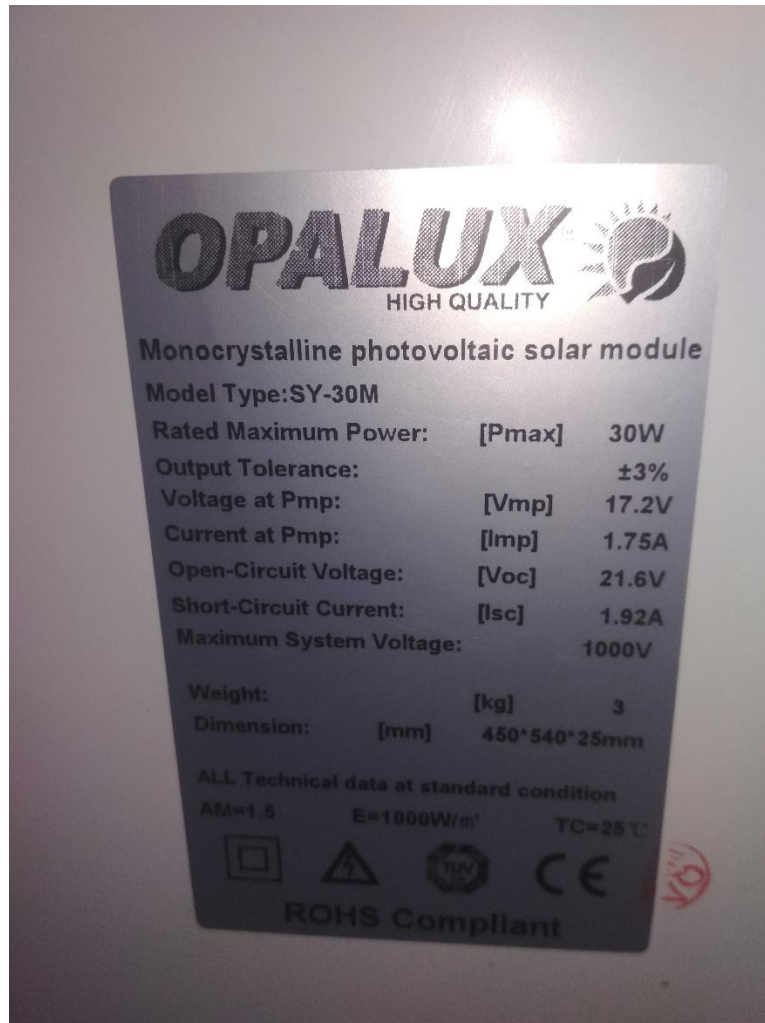


Ilustración 27 Placa de panel solar

#### b. BATERÍA VRLA.

Se utilizó un panel solar con potencia nominal con las siguientes características:

Modelo> DC-12-26

Capacidad: 26 Amperio Hora (C20)

Voltaje: 12 Voltios

La ilustración 28 muestra la placa de características de la batería:

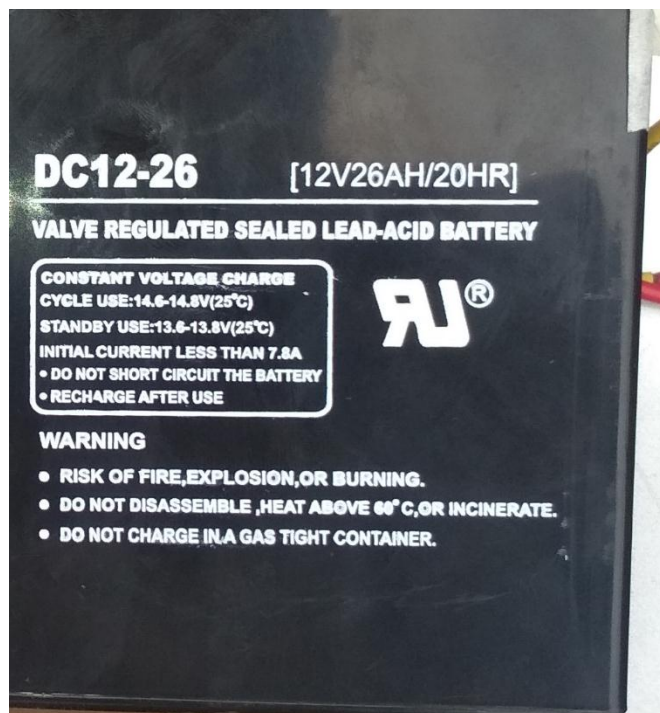


Ilustración 28 Especificaciones de batería.

**c. CONTROLADOR DE CARGA.**

Se utilizó un controlador de carga MPPT con las siguientes características:

Modelo: Phocos MPPT100/30

Voltaje del sistema: 12 o 24 Voltios con autoreconocimiento.

Corriente nominal de carga: 30 Amperios

### 3.2.2 CONEXIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

El sistema se conectó de acuerdo al manual del controlador de carga. La ilustración 29 muestra un diagrama de la conexión:

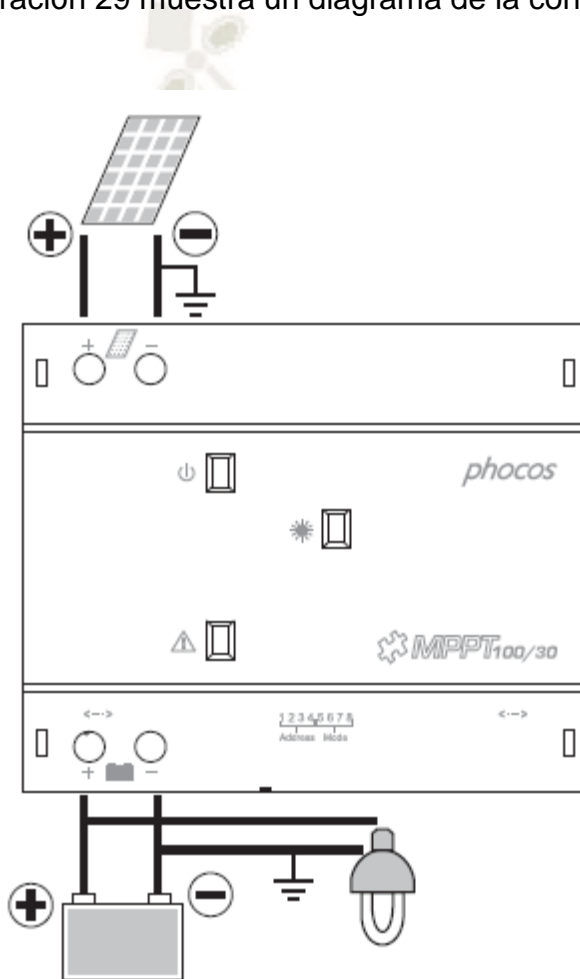


Ilustración 29 Conexión del controlador de carga.

### 3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE.

Para la implementación del hardware del diagnosticador/monitor se partió de los principios de diseño necesarios para cumplir con los objetivos de la presente investigación, a partir de esos principios de diseño se diagramo el sistema y se

desarrollo individualmente la electrónica necesaria para cada subsistema. Se decidió usar un solo diseño de hardware tanto para el diagnosticador/monitor para agilizar el desarrollo lo que requiere que el sistema sea altamente programa y por lo tanto basado en microcontrolador.

### 3.3.1 CRITERIO DE DISEÑO DE HARDWARE

Los objetivos de diseño de hardware se obtienen a partir de los objetivos de la investigación (sección 1.3) y del análisis realizado al marco teórico presentado.

Para poder diagnosticar y monitorear un sistema fotovoltaico según lo visto en el marco teórico se requiere conocer tanto características eléctricas del sistema en si como las condiciones ambientales existentes. Las características eléctricas necesarias vienen determinadas por la curva V-I del arreglo fotovoltaico, la carga conectada y la capacidad de la batería. Las magnitudes eléctricas que determinan dichas características son:

- Voltaje del panel fotovoltaico.
- Corriente del panel fotovoltaico.
- Voltaje de la batería.
- Corriente de la batería.

Estas son las magnitudes eléctricas que el sistema debe detectar. Adicionalmente se deben conocer las especificaciones eléctricas básicas del panel, baterías y controlador de carga (punto 3.2.2). Estas son integradas como datos en la programación del sistema.

El marco teórico también nos indica las condiciones ambientales que se necesitan conocer para poder realizar un diagnóstico. Como vimos en el punto 2.1 los

principales factores ambientales que influyen el desempeño de un sistema fotovoltaico son:

- La irradiación solar que determina la cantidad de potencia que el panel debe producir en condiciones normales de operación.
- Los factores geográficos (latitud y longitud) y temporales (fecha y hora) necesarios para determinar la duración del día para determinada fecha.

Adicionalmente debemos considerar la interface del sistema. Se debe tener una interfaz integrada en el hardware (para poder operar en campo sin necesidad de una PC) y una interfaz a la computadora para la recolección remota de datos.

Usando un enfoque de diseños sistémico podemos determinar las entradas y salidas de nuestro sistema:

Entradas:

- Voltaje de Panel.
- Voltaje de Batería
- Corriente de Panel.
- Corriente de batería.
- Latitud y longitud.
- Fecha y hora.
- Irradiación solar.

Salidas:

- Interfaz con usuario (HMI).
- Interfaz con PC.

Para obtener las señales de voltaje y corriente se utilizarán sensores de corriente y voltaje y circuitos electrónicos de adaptación de señal. La latid, longitud, fecha y hora serán obtenidas por un módulo GPS (Sistema de geoposicionamiento global) el cual proporciona toda esa información. Se seleccionará un sensor electrónico de radiación para obtener los datos de irradiación solar.

La interfaz de campo con el usuario será implementada con pulsadores (mando), leds (indicadores) y una pantalla alfanumérica.

La interfaz con PC utilizará una conexión Ethernet al ser esta la mas común para ser implementada en una red de comunicaciones.

Combinados con las necesidades de alimentación del sistema el esquema general del hardware monitor/diagnosticador se muestra en la ilustración 30.

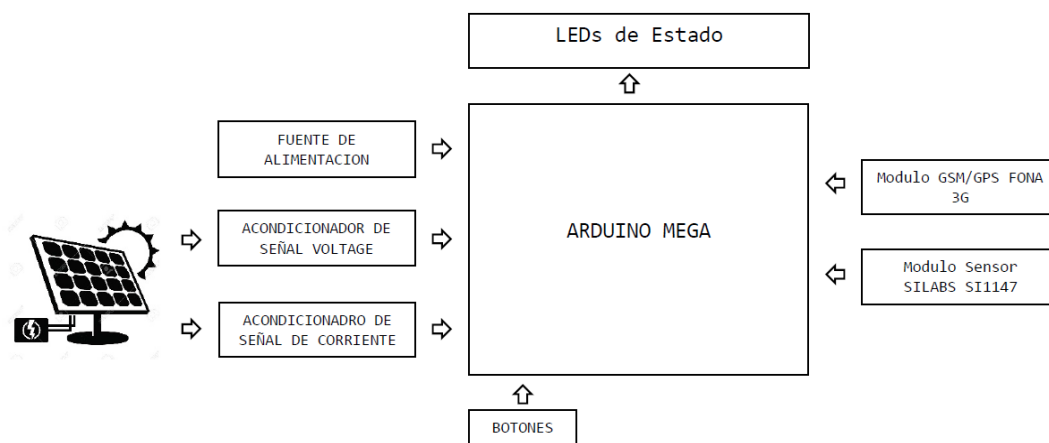


Ilustración 30 Esquema general de hardware

El cuál es el diseño básico a ser implementado. El sistema usará una placa PCB en donde serán integrados los componentes y sensores principales a ser usados.

### **3.3.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES Y SENSORES PRINCIPALES.**

#### **a. MICROCONTROLADOR.**

Se utiliza la placa Arduino Mega 2560 la cual cuenta con controlador incorporado ATMEGA 2560 el dispositivo tiene una velocidad de 8Mhz y ejecuta código de la IDE ARDUINO. La placa cuenta con 54 salidas y entradas digitales (necesarias para la interface de operación) 16 entradas análogas (para la adquisición de señales de voltaje y corriente) 4 puertos seriales UART (para conectarse a los sensores de irradiación). La placa tiene la flexibilidad de poder usar los shields (tarjetas adicionales) para arduino. La ilustración 31 muestra una foto de la placa de microcontrolador. En el anexo 3 se presenta la hoja de datos de este componente.



Ilustración 31 Placa de microcontrolador Arduino Mega

**b. LEDs de Estado**

Parte de la interfaz HMI de campo. Indicadores visuales que darán una referencia de los estados del sistema.

**c. Pulsadores de control.**

Parte de la interfaz HMI de campo. Pulsadores conectados a las entradas del Microcontrolador, usados para controlar y habilitar funciones del sistema.

**d. Módulo GSM/GPS**

Necesario para adquirir los datos de latitud, longitud, fecha y hora. Se usa el Módulo U-blox 6. La ilustración 3 muestra la conexión del módulo. La hoja de datos del módulo se presenta en el anexo 3.

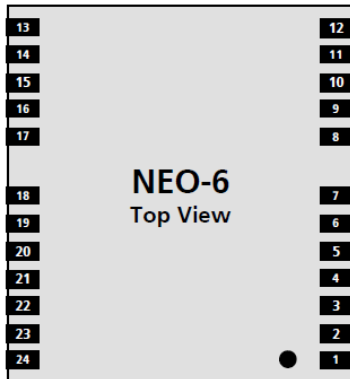


Figure 2 Pin Assignment

No	Module	Name	I/O	Description
1	All	Reserved	I	Reserved
2	All	SS_N	I	SPI Slave Select
3	All	TIMEPULSE	O	Timepulse (1PPS)
4	All	EXTINT0	I	External Interrupt Pin
5	All	USB_DM	I/O	USB Data
6	All	USB_DP	I/O	USB Data
7	All	VDDUSB	I	USB Supply
8	All	Reserved		See Hardware Integration Manual Pin 8 and 9 must be connected together.
9	All	VCC_RF	O	Output Voltage RF section Pin 8 and 9 must be connected together.
10	All	GND	I	Ground
11	All	RF_IN	I	GPS signal input
12	All	GND	I	Ground
13	All	GND	I	Ground
14	All	MOSI/CFG_COM0	O/I	SPI MOSI / Configuration Pin. Leave open if not used.
15	All	MISO/CFG_COM1	I	SPI MISO / Configuration Pin. Leave open if not used.
16	All	CFG_GPS0/SCK	I	Power Mode Configuration Pin / SPI Clock. Leave open if not used.
17	All	Reserved	I	Reserved
18	All	SDA2	I/O	DDC Data
19	All	SCL2	I/O	DDC Clock
20	All	TxD1	O	Serial Port 1
21	All	RxD1	I	Serial Port 1

Ilustración 32 Conexión Módulo U-blox 6.

### e. Integrado sensor de radiación ultravioleta e infrarroja

Circuito integrado de sensado de valores IR/UV de la marca SILICON LABS SI1147. La ilustración 23 muestra su diagrama de conexión. La ilustración 34 es una foto de la placa realizada para la interconexión al sistema.

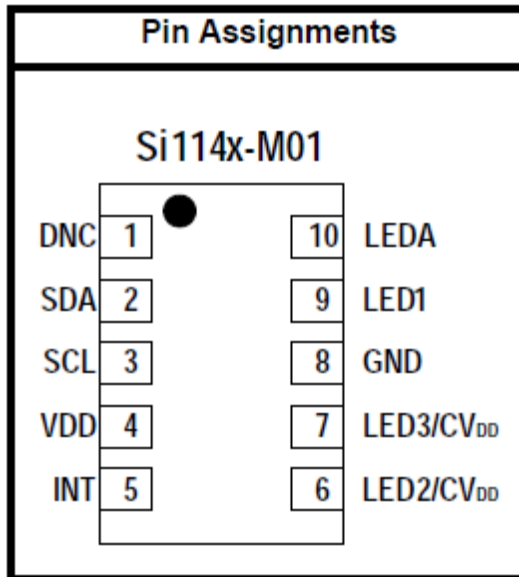


Ilustración 33 Asignación de pines del IC SILICON LABS SI1147

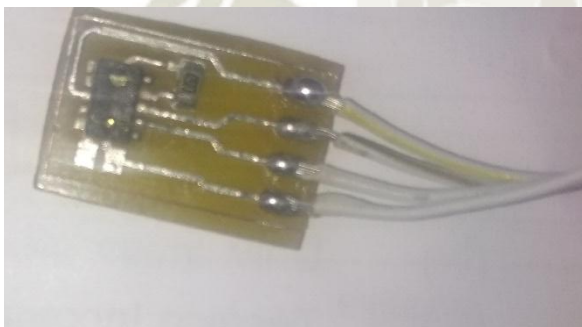


Ilustración 34 Placa para conexión del circuito integrado sensor IR-UV

#### f. Módulo (Shield) Ethernet para Arduino R3

Este módulo permite implementar la interface con una red ethernet. Adicionalmente el modelo seleccionado posee un conector que da la capacidad de conectar al sistema un dispositivo de memoria extraíble (SD CARD) usado para el almacenamiento de las lecturas análogas conectadas al sistema La hoja de datos del módulo se presenta en el anexo 3.

**g. Conector y circuito de alimentación.**

A través de este conector la placa es alimentada, y va directo a los reguladores de tensión. Estos reguladores serán los encargados de alimentar toda la circuitería de la placa, estos reguladores proveen 5VDC y 3.3VDC ambos a 500mA de corriente.

**h. Entradas acondicionadores de canales análogos de corriente**

Por medio de estas borneras el sistema recibe y acondiciona las corrientes que son evaluadas. El rango es de 0-30Amps.

**i. Entradas acondicionadores de canales análogos de corriente**

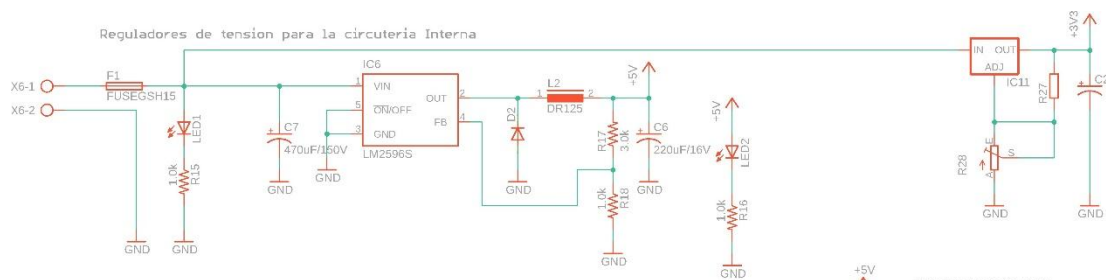
Por medio de estas borneras el sistema recibe y acondiciona las corrientes que son evaluadas. El rango es de 0 – 100Vdc.

**3.3.3 ESQUEMÁTICO Y CIRCUITO IMPRESO.**

El anexo I muestra el esquemático completo del sistema de monitoreo y diagnóstico. A continuación se muestran sus subsistemas principales.

**a. Etapa de alimentación. Reguladores de tensión.**

Esta etapa se utiliza para dar los valores de voltaje y corriente necesarios para el funcionamiento de los diversos componentes del sistema. La ilustración 35 muestra el esquemático de este subsistema.



## Ilustración 35 Etapa de alimentación.

Para la fuente de alimentación (ya que se necesitan fuentes de voltaje menores) se eligió el integrado LM2596 por ser un integrado regulador de voltaje step down fiable y económico que permite obtener la alimentación necesaria para los subsistemas (5 voltios) a partir de la entrada de batería de 12 Voltios. La alimentación del integrado proviene de los 12 voltios no regulados de la batería. Se disponen en la enteeda Vin un fusible de 3 Amperios para protección y una resistencia de 1 kohmio con su respectivo LED para indicación de alimentación.

Los condensadores C7 y C6 se escogen por recomendación del datasheet del integrado (Anexo 4). Del mismop datasheet se obtienen los tipos y valores para el diodo y bobina de para la salida y realimentación. Las entrada FB requiere ser de un 25% del valor de la salida por lo tanto las resistencias R17 y R18 necesarias para la realimentación se obtienen mediante la siguiente formula de divisor de voltaje:

$$V_{realim} = 0.25 * V_{out}$$

$$\frac{V_{realim}}{V_{out}} = 0.25$$

$$V_{realim} = \frac{R18}{(R18 + R17)} V_{out}$$

Usamos para R18 una resistencia de 1 Kohm

Reemplazando los valores en la formula obtenemos el valor de R17

$$0.25 = \frac{1 \text{ kohm}}{(1 \text{ kohm} + R17)}$$

$$R17 = \frac{1 \text{ Kohm}}{0.25} - 1 = 3 \text{ Kohm}$$

### b. Acondicionadores de Señal

Los acondicionadores de señal tienen como finalidad adaptar los valores de corriente y voltaje de los paneles y baterías solares de manera que puedan ser registrados por el micro controlador. La ilustración 36 muestra el esquemático completo para los acondicionadores de señal. En total son 4 canales de voltaje/corriente.

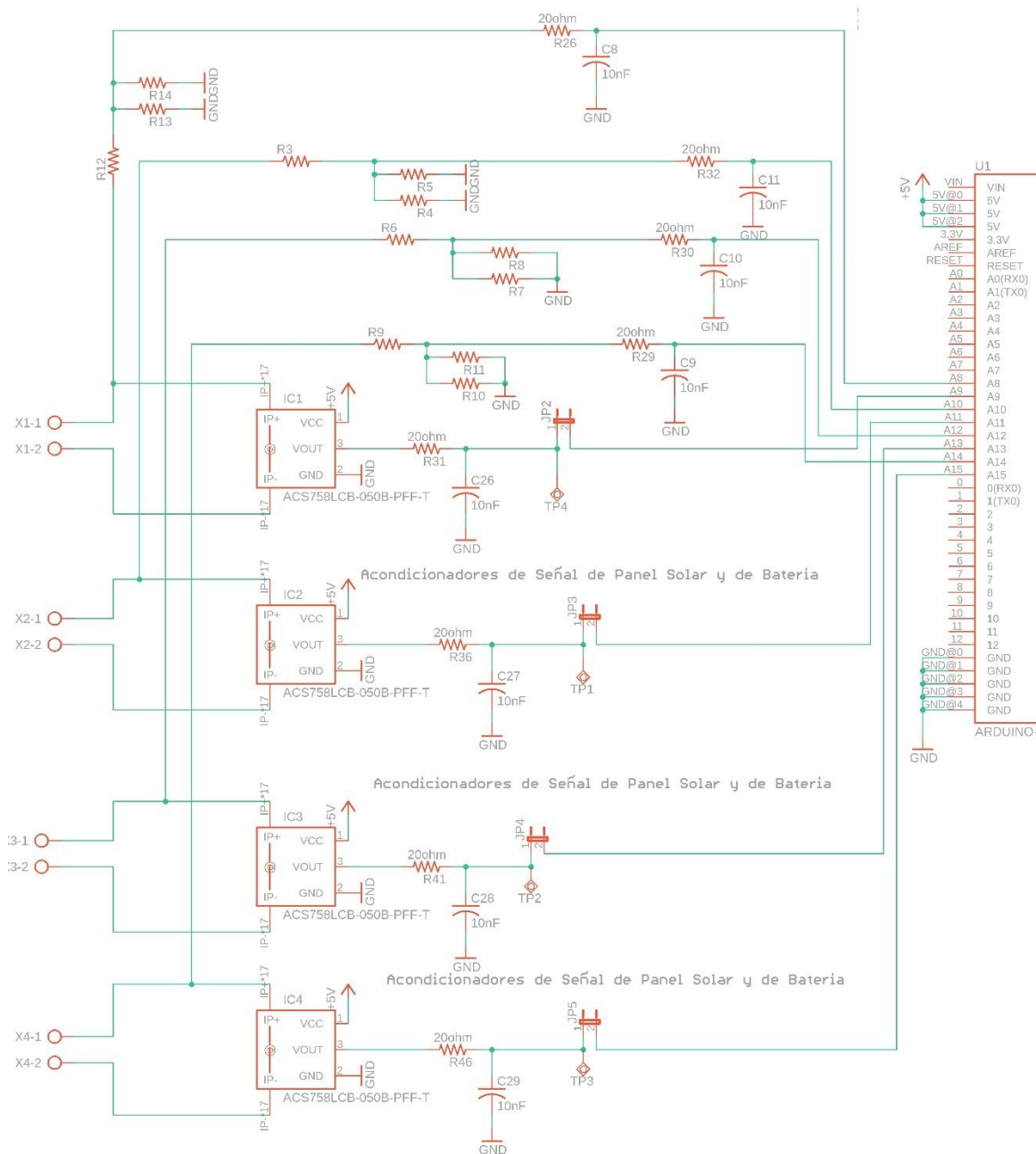


Ilustración 36 Etapa de acondicionamiento de señal

La ilustración 37 muestra un detalle de uno de los canales de acondicionamiento de señal.

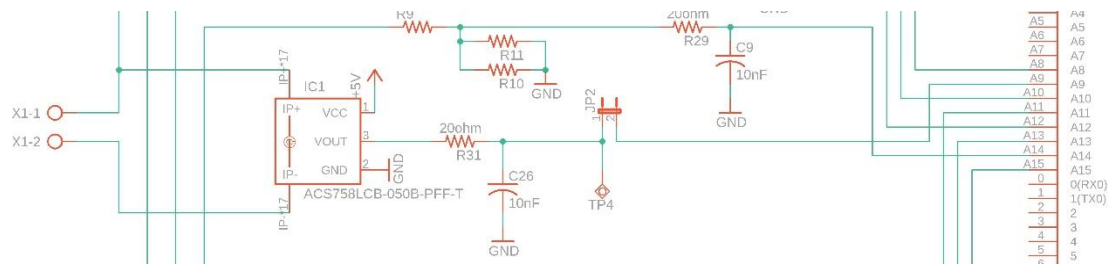


Ilustración 37 Detalle de un canal de acondicionamiento.

Un divisor de voltaje, es un arreglo de 2 impedancias, comúnmente resistencias que dividen el voltaje y la corriente de salida. La división es proporcional a las resistencias involucradas en el divisor. Un divisor de voltaje se configura para tener una salida de potencial determinada, esta se puede calcular con una simple ecuación o fórmula.

Ecuación 7

$$V_o = V_i \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

La salida en voltaje de un divisor sirve solamente como una referencia de voltaje. La resistencia que va a tierra forma un paralelo con la resistencia de carga lo cual modifica el voltaje de la entrada de la carga. Usualmente los divisores como fuentes se implementan en conjunto con diodos zener y/o amplificadores operacionales. Esto considerando aplicaciones básicas. La configuración básica de un divisor de voltaje es la siguiente, en donde por convención vamos a llamar R1 y R2 a las resistencias. R1 la que va a la fuente y R2 la que va a tierra. Vi es el voltaje de entrada y Vo es el de salida del divisor.

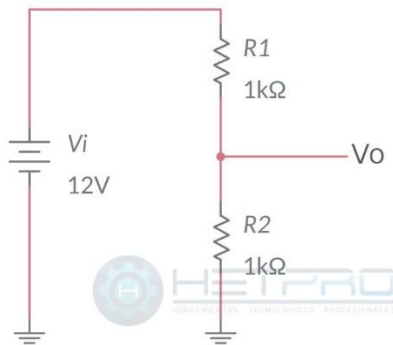


Ilustración 38 Divisor de Voltaje

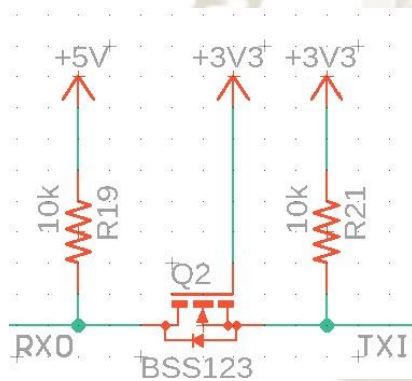
En particular este sistema hace uso del sensor de corriente ACS 712. El ACS712-50 Módulo sensor de corriente 50 A sensor es una solución económica para medir corriente, internamente trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula por la línea que se está midiendo. EL sensor nos entrega una salida de voltaje proporcional a la corriente, dependiendo la aplicación podemos usar el ACS712-50, para rangos de 50 amperios respectivamente. La hoja de datos del módulo se presenta en el anexo 3.

### c. Conversor de niveles lógicos

El conversor lógico de niveles BSS123 es un dispositivo pequeño que puede convertir en forma segura las señales de 5V en señales de 3.3V. Este conversor de niveles también funciona con dispositivos de 2.8V y de 1.8V.

Para poder funcionar el circuito necesita ser alimentada tanto del lado de alto voltaje como del lado de bajo voltaje. Una descripción del funcionamiento sería del siguiente modo, un nivel digital que entra al pin RXI del lado de 5V saldrá por el pin RXO del lado de 3.3V. Una señal que entra en el pin TXI del lado de 3.3V saldrá por el pin TXO del lado de 5V.

El circuito está diseñado para trabajar con señales serial, I2C y con cualquier otra señal digital. No funciona con señales analógicas.



Para el cálculo de las resistencias se usa la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V_f - 3.3}{I_f}$$

Según las especificaciones de la entrada del microcontrolador la corriente debe mantenerse a 0.2 mA y el voltaje a 5 voltios entonces la resistencia es aproximadamente 8.5 Kohm. Usamos un valor cercano.

Ilustración 39 Conversor de niveles lógicos

#### **d. Interface hacia el GPS y al sensor UV.**

GPS se refiere a las siglas Global positioning system o Sistema de posicionamiento global. Este sistema está conformado por muchos satélites que se encuentran a kilómetros fuera de la atmosfera terrestre y que continuamente están enviando señales a la Tierra por medio de radiofrecuencias. Nuestro modulo GPS es un receptor de GPS, la antena que tiene incluida recibe las señales de los satélites. Es necesario que al menos reciba señal de 4 satélites para dar un posicionamiento preciso. Ahora bien, los receptores también tienen incluidos algoritmos matemáticos que hacen los cálculos necesarios para restar la diferencia de tiempo que tarda la señal en llegar y calcular el tiempo y la distancia correcta en la que se encuentre el receptor GPS.

Para una mejor precisión en el posicionamiento, se suelen utilizar los llamadas segmentos de control que son estaciones en la tierra que se comunican con la red satelital. Nuestro modulo GPS utiliza el sistema de GPS asistido para mejorar la precisión. Este sistema utiliza a los segmentos de control para ayudar a los receptores de GPS a que consigan información más precisa y rápida del satélite proveendo al receptor de los datos apropiados y tiempo preciso o bien, utilizando su buena señal y alto poder de procesamiento para interpretar la información rota o fragmentada que le llega al receptor. El sistema de GPS asistido es el más utilizado en celulares o dispositivos móviles, y es por ello que tienden a tener una mejor señal de GPS que un sistema de GPS por sí solo.

#### **Modulo NEO-6M**

Este módulo de GPS ya viene incluido con su antena cerámica para conectarse directamente a la PCB. No necesitas de ningún accesorio extra para hacer funcionar este componente si deseas solamente transmitir las señales a tu microcontrolador. El modulo se basa en receptor Ublox NEO-6M el cual tiene una alta precisión en los datos y viene con una batería de respaldo que permite

conservar los datos recolectados si le deja de llegar alimentación por parte de la fuente de poder.

#### Características

- NEO-6M-C en la placa, con antena activa de alta ganancia.
- Interfaz IPX, para conectar diferentes antenas activas
- Batería de respaldo recargable, mantiene los datos recolectados cuando se apaga, admite arranques en caliente.

#### Especificaciones

- Nivel TTL, compatible con sistemas de 3.3V / 5V
- Velocidad de baudios solo 9600
- Voltaje de funcionamiento: 2.7V-5.0V (entrada de VCC)
- Corriente de funcionamiento: 35mA
- Impedancia TXD / RXD: 510 $\Omega$  Aplicaciones
- Navegador GPS

La ilustración 40 muestra el esquemático de la conexión del sistema al módulo NEO-6M.

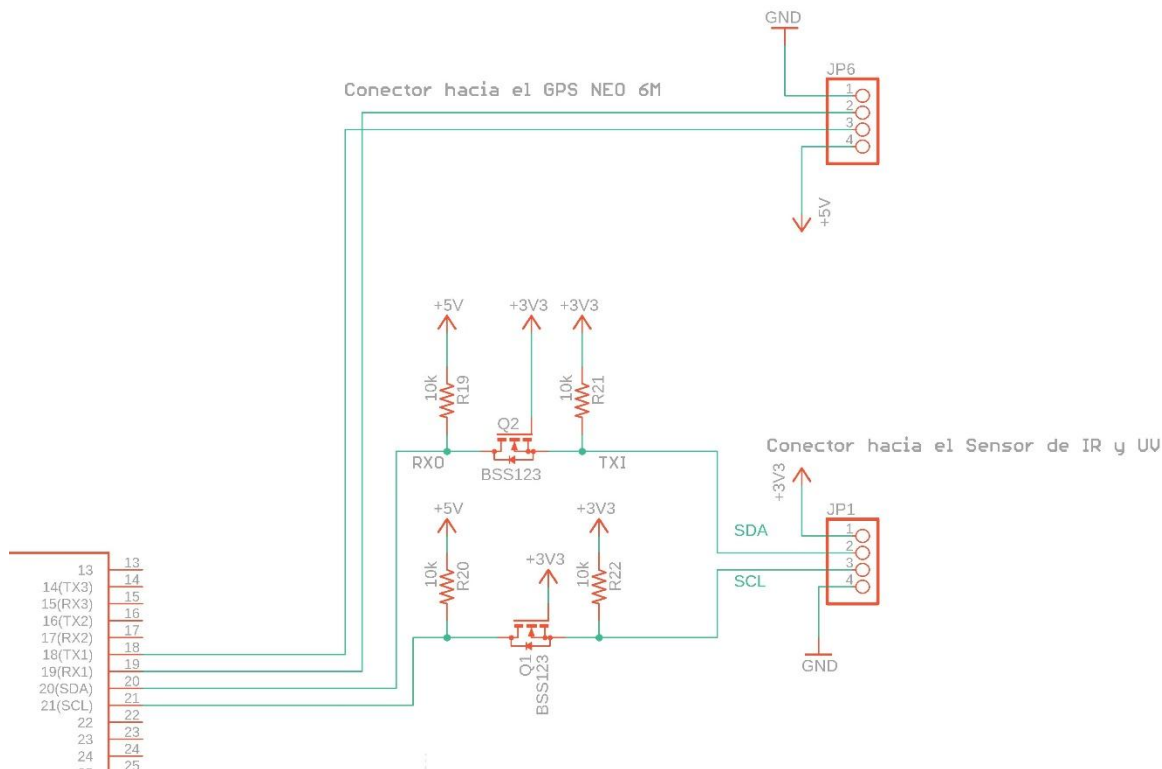


Ilustración 40 Conexión a modulo GPS

### e. RTC (Real time clock) Reloj en tiempo real.

Este es un reloj de tiempo real con batería de respaldo (RTC – Real Time Clock) que permite al microcontrolador mantener tiempo; hora y fecha, aún si el circuito electrónico en el que se encuentra se queda sin energía. Es perfecto para llevar registro de datos, reloj de capacidad, sellado de tiempo, temporizadores y alarmas, etc. Este RTC se usa en conjunto con un microcontrolador.

El DS1307 RTC es el más popular, y funciona mejor con los microcontroladores basados en 5V. Un reloj de tiempo real es básicamente un reloj que funciona con una batería y mantiene la hora, incluso cuando hay un corte de energía. El uso de un RTC, puede realizar un seguimiento de los plazos largos.

En conjunto se utiliza una pila de botón (batería de litio 3V CR2025 o CR2032), el DS1307 se activara lo largo de mucho tiempo, incluso cuando el sistema se apague o se re programe.

## DESCRIPCIÓN

El DS1307 Real-Time-Clock Serie, es un dispositivo de bajo consumo de energía, completo con código binario decimal (BCD), reloj/calendario más 56 bytes de NV SRAM. Dirección y datos son transferidos a través de 2 hilos serie, bus bi-direccional. El reloj/calendario provee información de, segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. El final de fecha de mes se ajusta automáticamente durante meses menores de 31 días, incluyendo correcciones para el año bisiesto. El reloj funciona en cualquiera formato de 24 horas o en 12 horas con indicador AM/PM. El DS1307 tiene incorporado un circuito de sensor de tensión que detecta fallas de energía y cambia automáticamente al suministro de batería de respaldo.

## CARACTERÍSTICAS

- Reloj en tiempo real (RTC) Cuenta segundos, Minutos, horas, fecha del mes, mes, día de la semana, y año con año bisiesto Compensación Válido hasta 2100.
- 56-Byte, con respaldo de batería, no volátil (NV) de RAM para almacenamiento de datos
- Interface Serie I2C.
- Onda-Cuadrada programable de la señal de salida.
- Detector Automático Fallo-Energía y Circuito Conmutación.
- Consume menos de 500nA en la batería -- Modo de copia de seguridad con el oscilador funcionando.
- Rango de temperatura Industrial Opcional: -40 ° C a +85 ° C ° Disponible en 8-Pin Plástico DIP o SO

- Reconocido Underwriters Laboratory (UL)

La ilustración 41 muestra la conexión del RTC. La hoja de datos del módulo se presenta en el anexo 3.

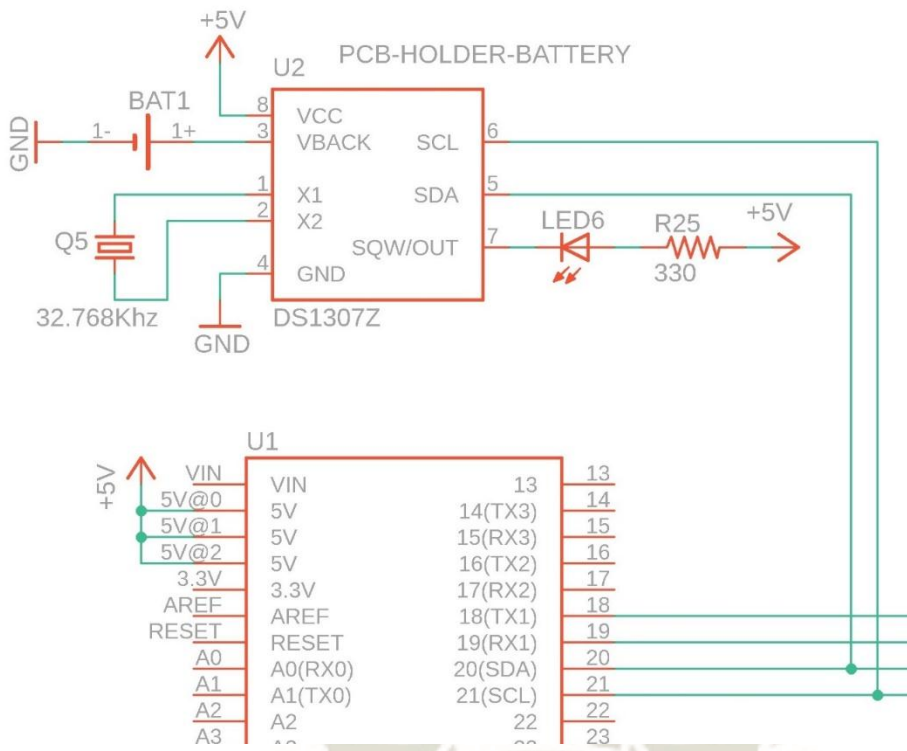


Ilustración 41 Conexión RTC

**f. Microcontrolador e interfaz de campo.**

Para la interfaz de campos se usan tres botones que permiten el uso de menús interactivos. Un botón UP, un botón DOWN y un botón SELECT. También utiliza 3 leds de indicación programables de color verde, rojo y ámbar.

La ilustración 42 muestra la conexión de la interfaz al microcontrolador a la interfaz de campo.

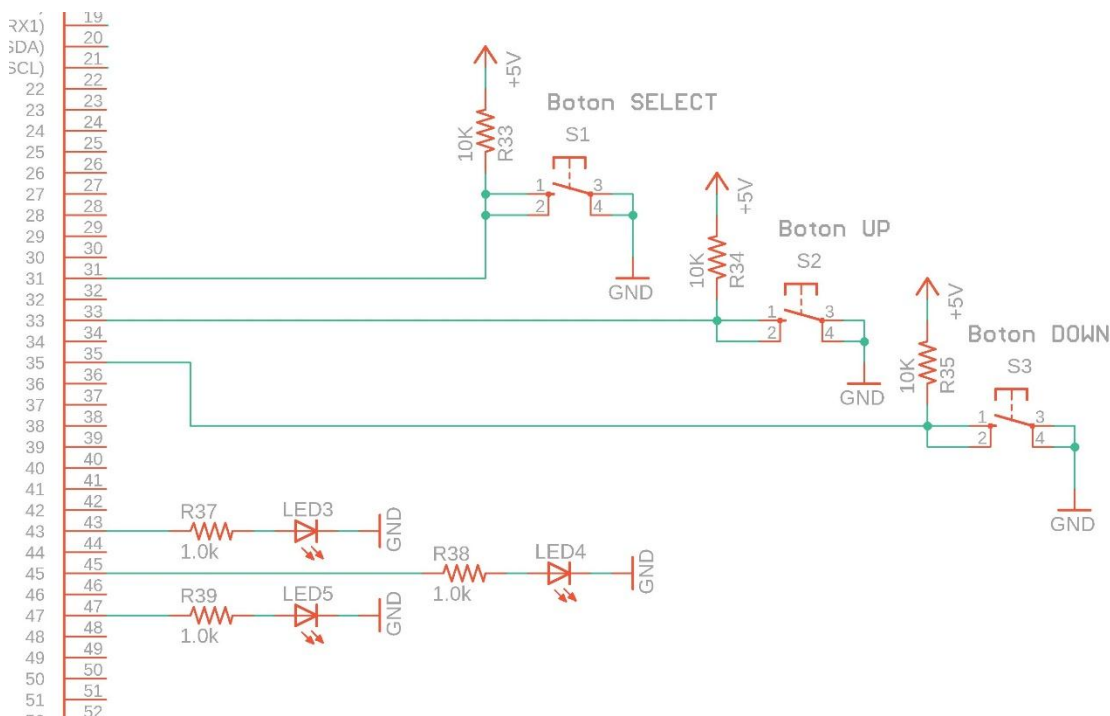


Ilustración 42 Conexión microcontrolador/interface.

### 3.3.4 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO.

Los componentes en la placa se distribuyeron de manera que uno de los lados largos de la placa contenga los conectores que permiten la conexión a los sensores y la fuente. La placa integra los circuitos de:

- Acondicionamiento de señal (4 canales).
- Fuente de potencia.
- Reloj de tiempo real.
- Interface de campo.

La tarjeta incluye también las conexiones para integrar

- Placa microcontroladora arduino mega.
- Circuito de GPS/GSM
- Placa del módulo (Shield) para interface a Ethernet.

La ilustración 43 muestra la disposición de los componentes en la placa.

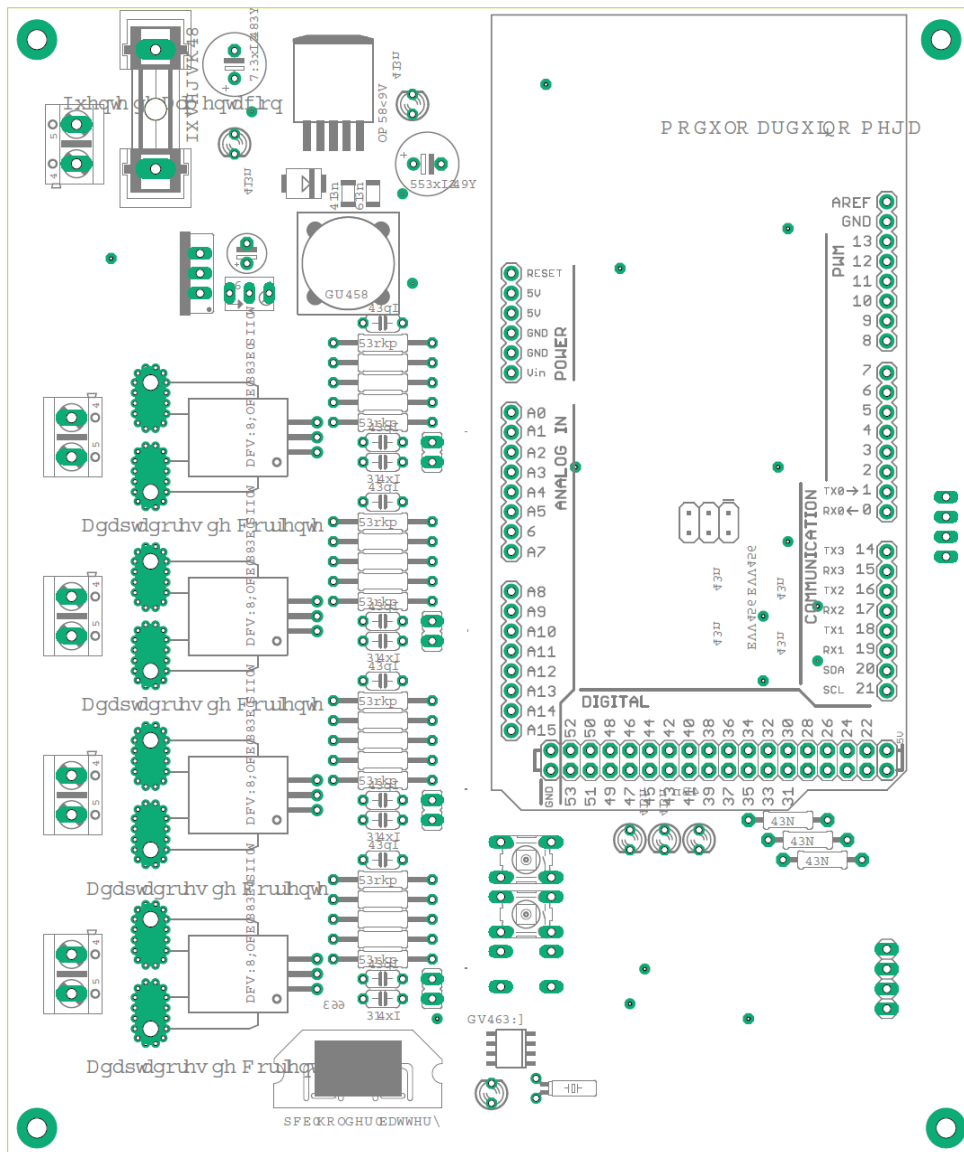


Ilustración 43 Distribución de componentes en la placa PCB.

La foto mostrada en la ilustración 44 muestra los componentes en el prototipo implementado:

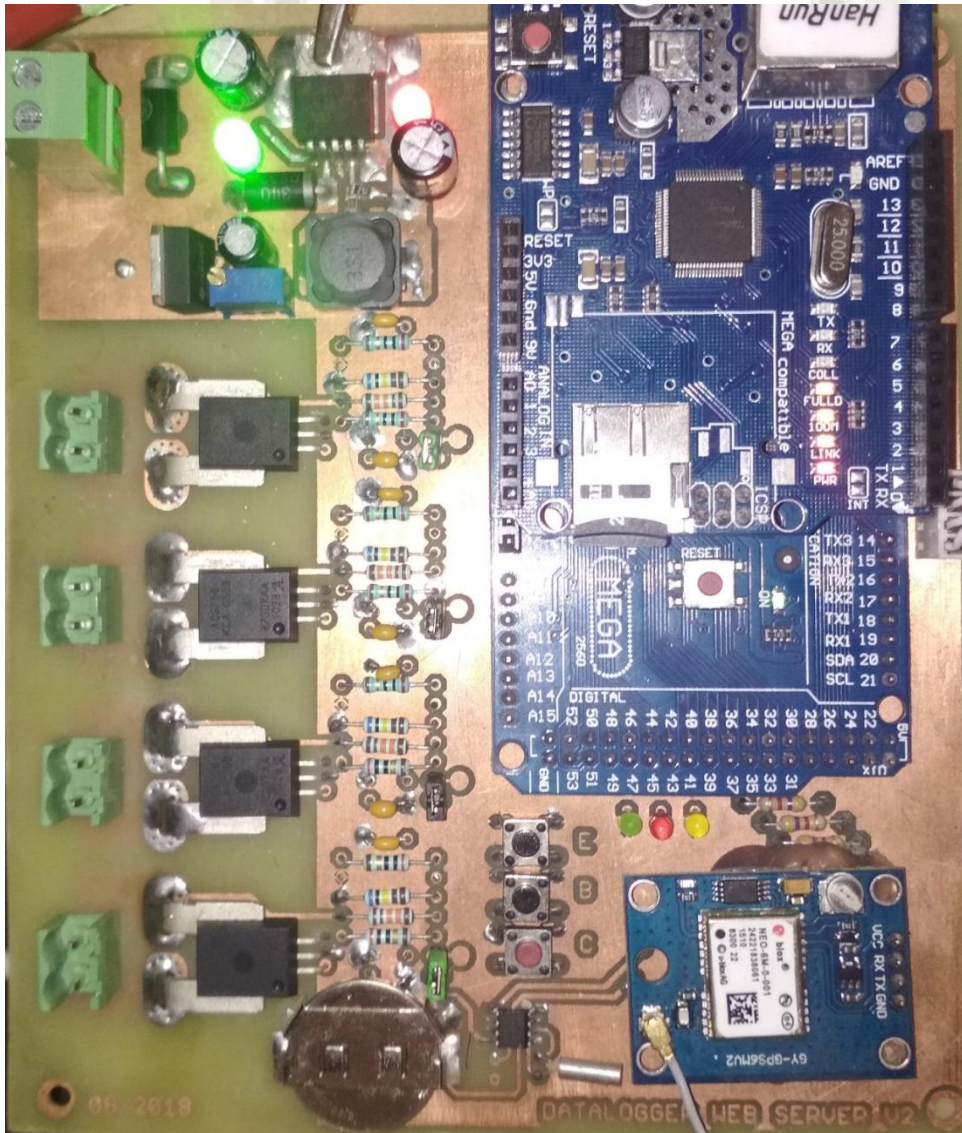


Ilustración 44 Foto de placa PCB.

El anexo 2 muestra las capas superior e inferior del circuito impreso.

### **3.4 DISEÑO DEL SISTEMA EXPERTO.**

Para el diseño del sistema experto se utiliza lo investigado en el marco teórico con el fin de cumplir los objetivos de la investigación. Para ello primero se determinó las fallas que deberían ser evaluadas. Posteriormente se hicieron experimentos para cada tipo de falla en días diferentes y se compararon con días sin las fallas y despejados que funcionan como línea base. También se esperó la presencia de días nublados con el fin de comparar el comportamiento del sistema en dicha condición.

#### **3.4.1 FALLAS PRESENTES EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.**

El presente trabajo investiga la capacidad de distinguir entre las siguientes posibles fallas presentes en un sistema fotovoltaico:

- Baterías defectuosa o al final de su vida útil.
- Paneles defectuosos o al final de su vida útil.
- Efecto de sombra (Shadowing) en los paneles.
- Panel fracturado.
- Paneles sucios o cubiertos.
- Paneles mal orientados.

Adicionalmente el sistema debe ser capaz de distinguir las siguientes condiciones naturales presentes, a saber:

- Día nublado.
- Duración del día / fotoperiodo.
- Ubicación. (Latitud/longitud)

### 3.4.2 EXPERIMENTOS Y TOMA DE DATOS.

Los datos fueron tomados durante un mes desde el 11 de setiembre al 11 de octubre. Los datos en duro se pueden ver en el anexo 4.

#### 3.4.2.1 LINEA DE BASE

El sistema se orientó horizontalmente a la superficie para obtener datos uniformes y reducir la influencia de la orientación. Se consideró como línea de base los datos obtenidos en aquellos días que no se realizaron experimentos particulares. La foto presentada en la ilustración 45 muestra la disposición del sistema:



Ilustración 45 Disposición del Sistema de pruebas.



Ilustración 46 Medida inicial del panel empolvado. Medición en el multímetro 20.27 Voltios.

a. Datos

Los días 14 de setiembre, 8 de octubre y 9 de octubre se consideraron como la línea de base ya que no se realizaron experimentos y fueron días completamente soleados. Los siguientes gráficos muestran los datos tomados para dichos días:



Ilustración 47 Datos del día 14 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaico. En Azul el voltaje de las baterías.

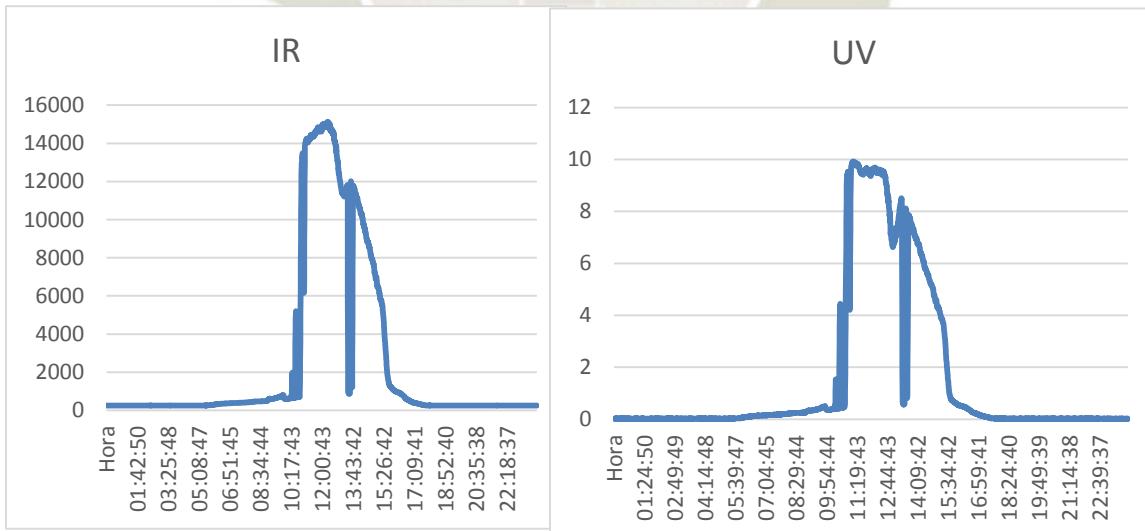


Ilustración 48 Datos del día 14 de setiembre a la izquierda la radiación Infrarroja a la derecha la radiación ultravioleta.



Ilustración 49 Datos del día 8 de Octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaico. En Azul el voltaje de las baterías.

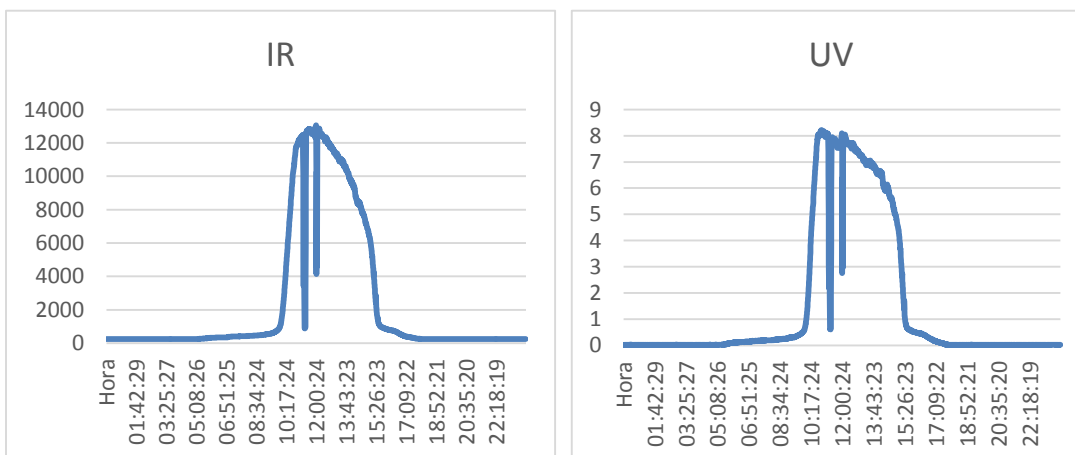


Ilustración 50 Datos del día 8 de Octubre a la izquierda la radiación Infrarroja a la derecha la radiación ultravioleta.

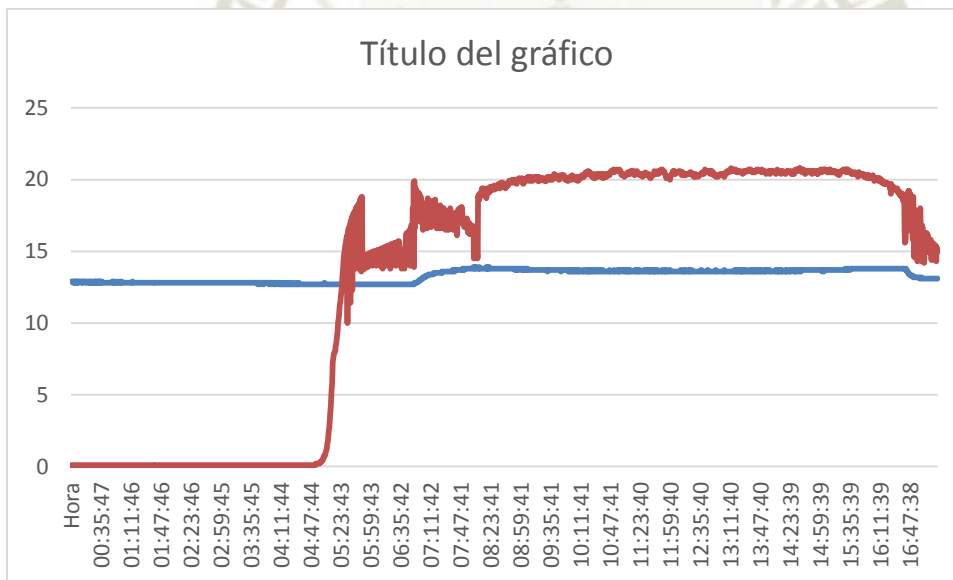


Ilustración 51 Datos del día 9 de Octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicoa. En Azul el voltaje de las baterías.

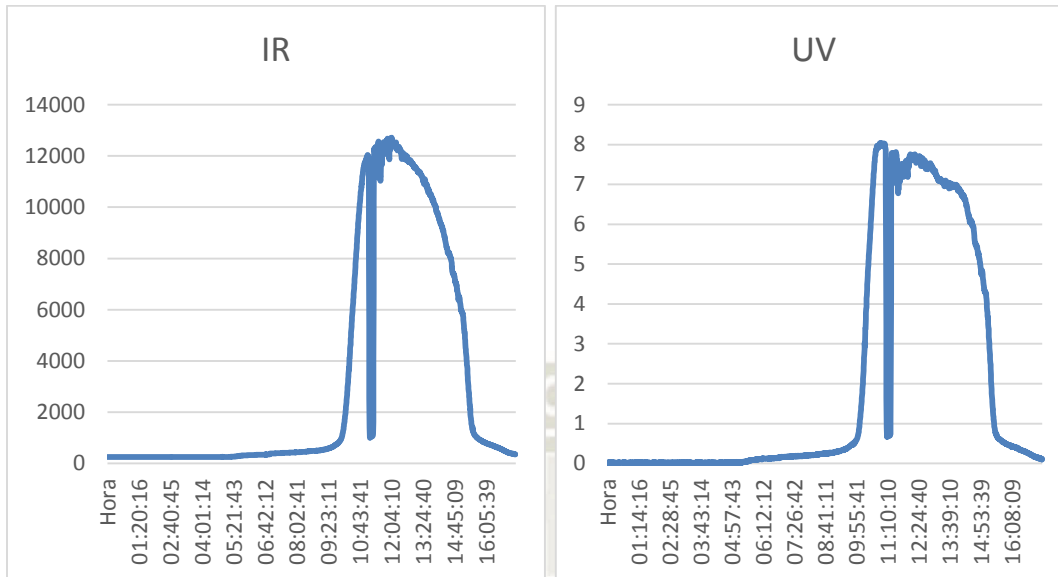


Ilustración 52 Datos del día 9 de Octubre a la izquierda la radiación Infrarroja a la derecha la radiación ultravioleta.

### 3.4.2.2 EXPERIMENTOS CON POLVO

Se realizaron cubriendo con polvo el panel y midiendo el voltaje obtenido. A la vez se dejó el sistema tomando datos y se regresó cada hora en la mañana para revisar el estado y realizar mediciones individuales.

#### a. Toma de datos

La fotografías muestran algunas de las medidas periódicas realizadas y la condición de empolvamiento del panel.

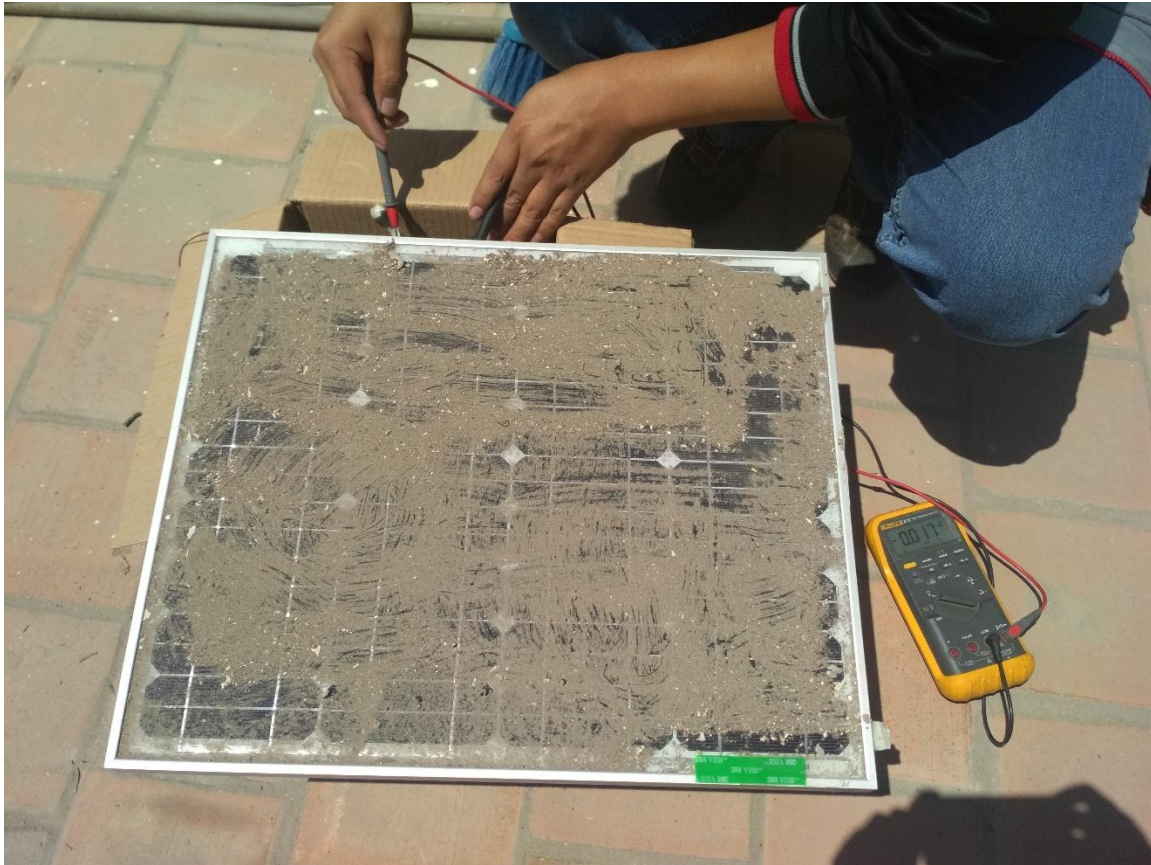


Ilustración 53 Medida inicial del panel empolvado. Medición en el multímetro 1.7 Voltios.

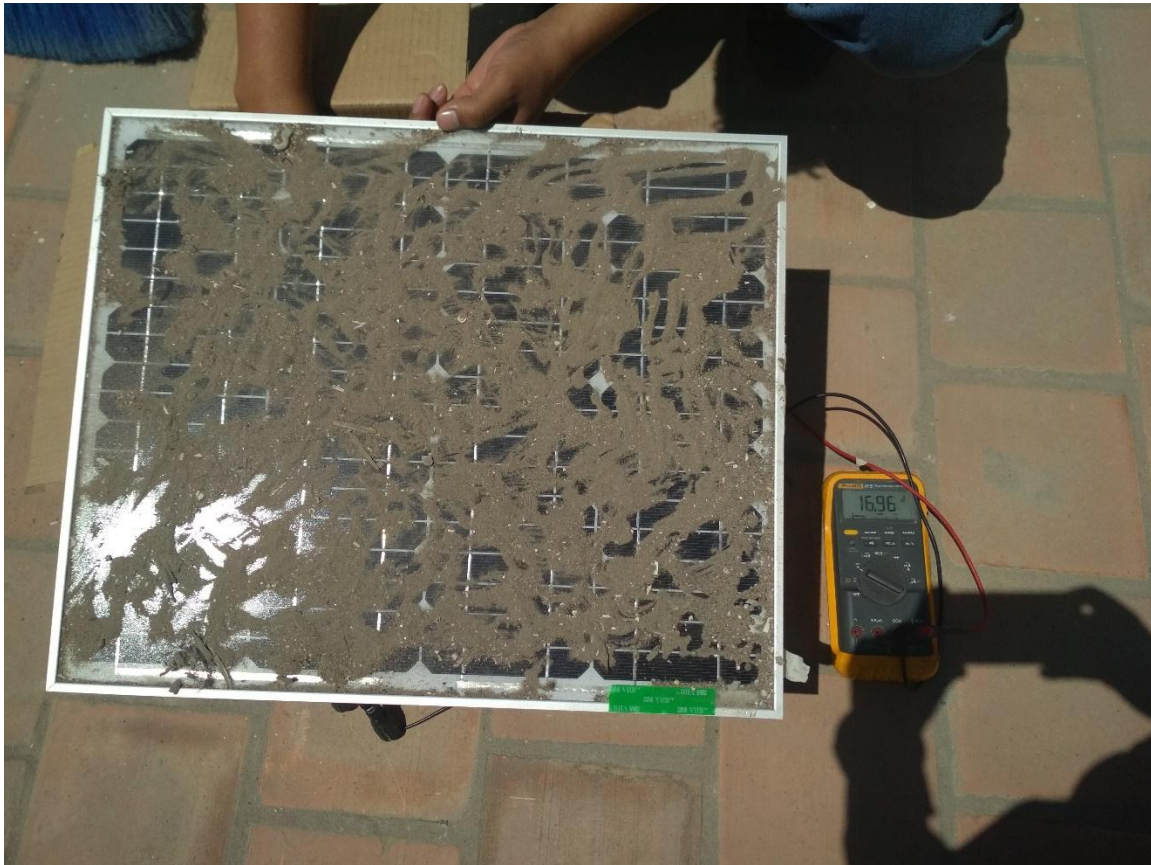


Ilustración 54 Medida inicial del panel empolvado. Medición en el multímetro 16.96 Voltios.



Ilustración 55 Medida inicial del panel empolvado. Medición en el multímetro 16.96 Voltios.

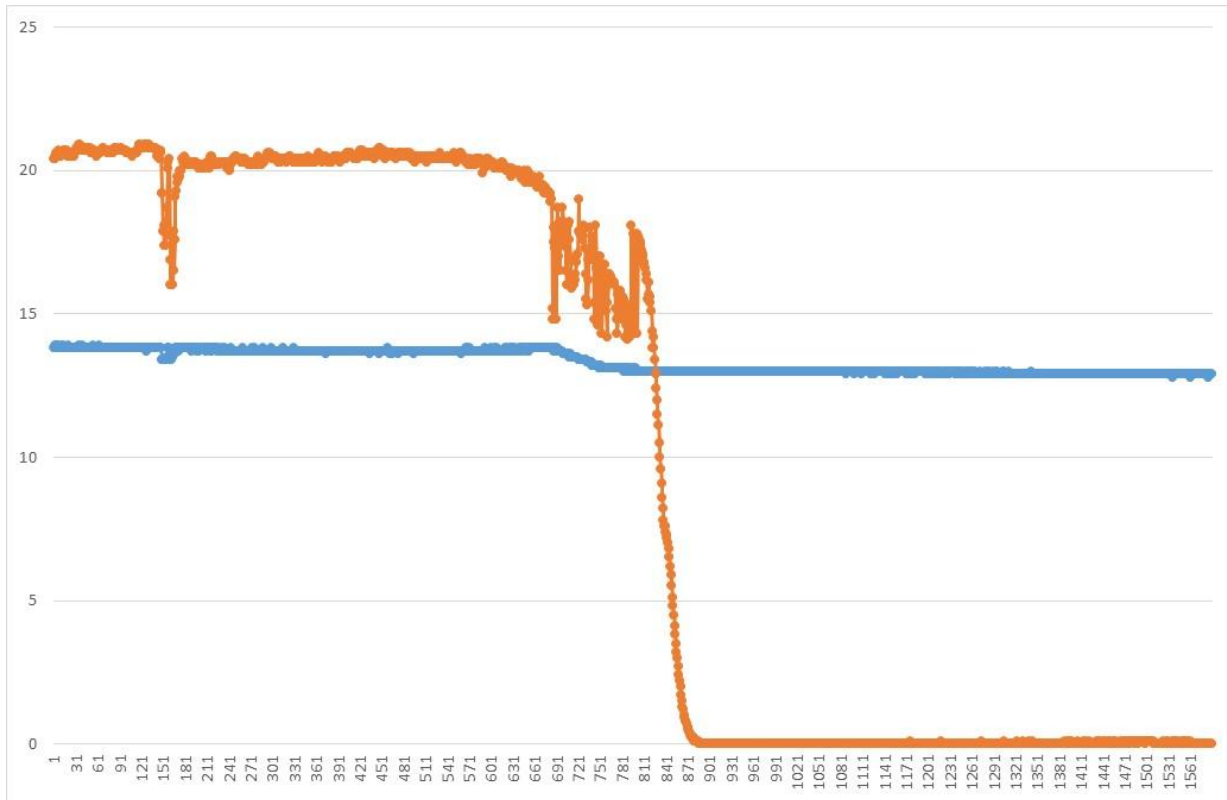


Ilustración 56 11 DE SETIEMBRE. Efecto del polvo en el panel.

b. Análisis

El efecto es limitado ya que el viento reduce la presencia de polvo en el panel.

**3.4.2.3 EXPERIMENTOS DE ENSOMBRECIMIENTO**

Se realizaron experimentos iniciales de ensombrecimiento para determinar el descenso de voltaje en el panel. Los resultados se muestran en las ilustraciones 57 y 58.



Ilustración 57 Mitad de panel ensombrecido. Lectura de voltaje 15.53



Ilustración 58 Panel ensombrecido por barras verticales. Lectura de voltaje 18.55

Luego de registrar el ensombrecimiento de las barras verticales se dejó el sistema loggando una mañana para registrar el efecto de ensombrecimiento mientras el sol rota y la sombra de las barras se desplaza sobre el panel. La ilustración 59 muestra el gráfico de voltaje del sistema debido al ensombrecimiento.





Ilustración 59 Datos del día 12 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. Experimento de ensombrecimiento.

b. Análisis

El experimento realizado muestra un descenso abrupto en el momento en que la sombra pasa a lo largo del panel (Hasta por debajo de los 15 voltios) Sin embargo el tiempo en que esto ocurre es los suficientemente corto como par ano perturbar la carga de las baterías por lo que su efecto es mínimo en el rendimiento energético total del sistema.

### 3.4.2.4 DIAS SOLEADOS.

#### a. Toma de datos

Las ilustraciones de la 60 a la 65 muestran los datos para días soleados sin experimentos realizados. Estos días son considerados la línea de base para el sistema experto. Se muestran tanto los datos de voltaje de panel y batería como la irradiación.

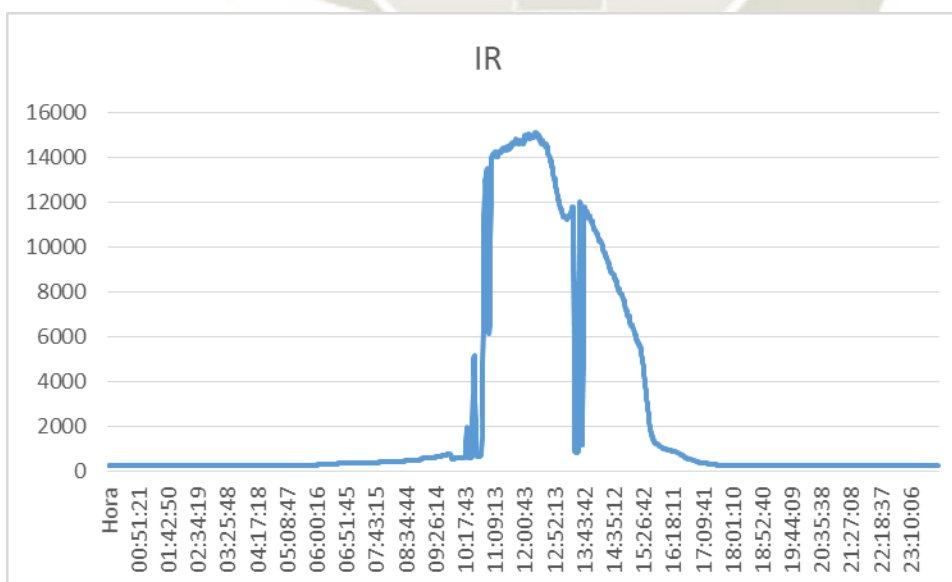
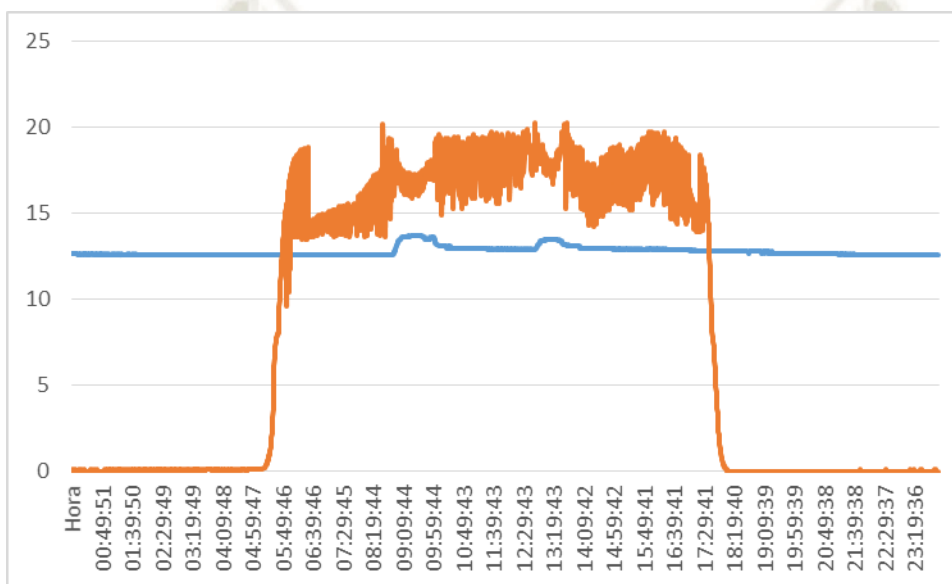


Ilustración 60 Datos del día 14 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.

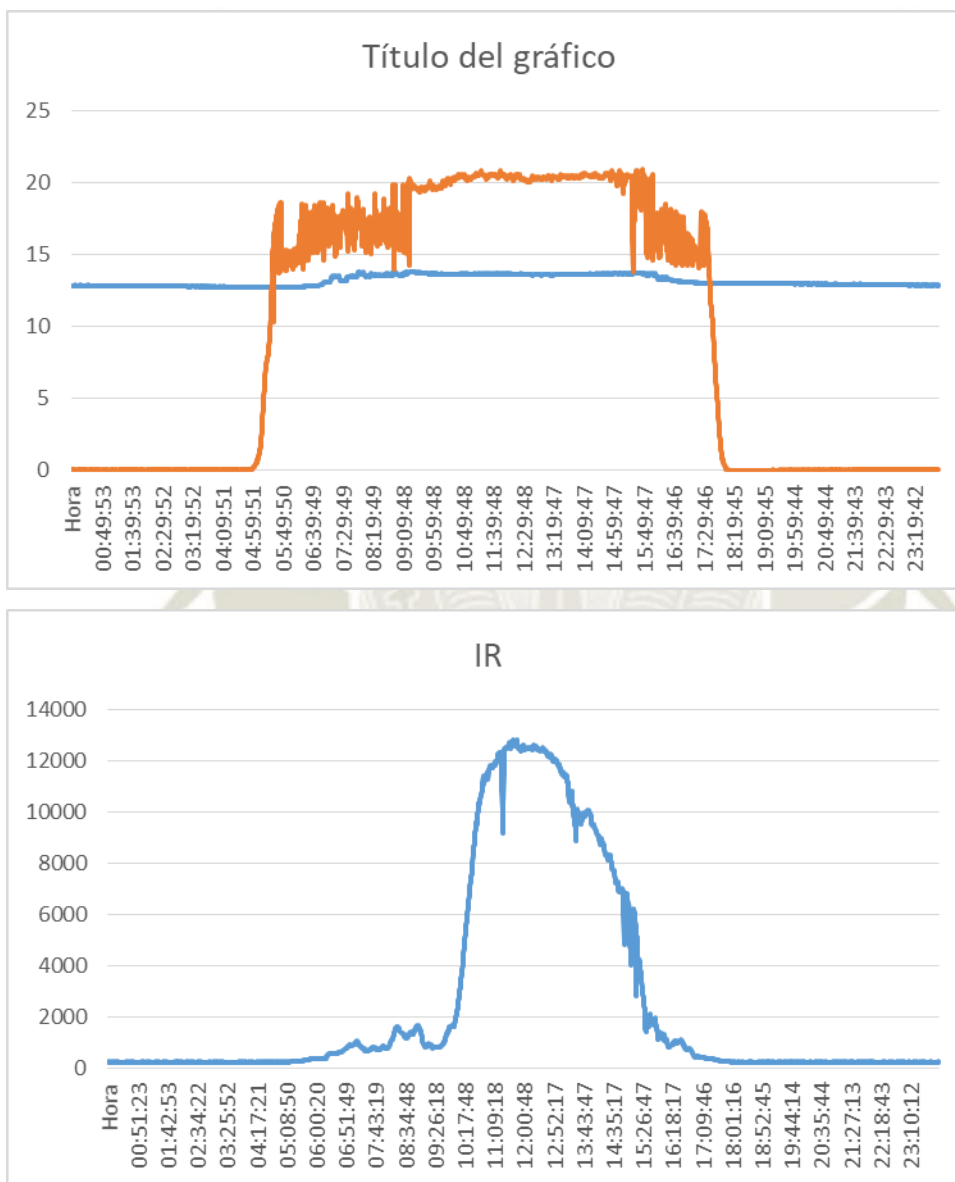


Ilustración 61 Datos del día 6 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.

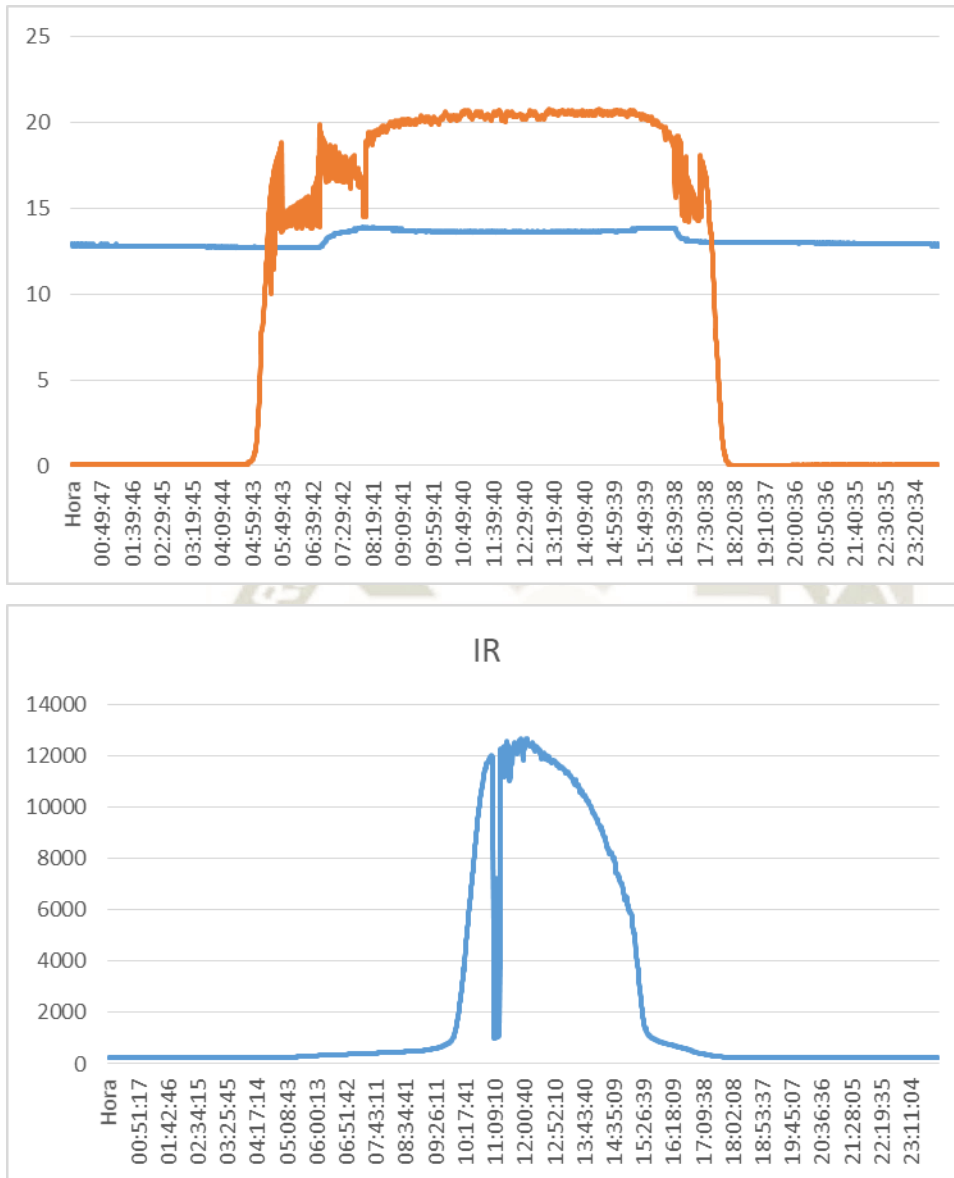


Ilustración 62 Datos del día 9 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.

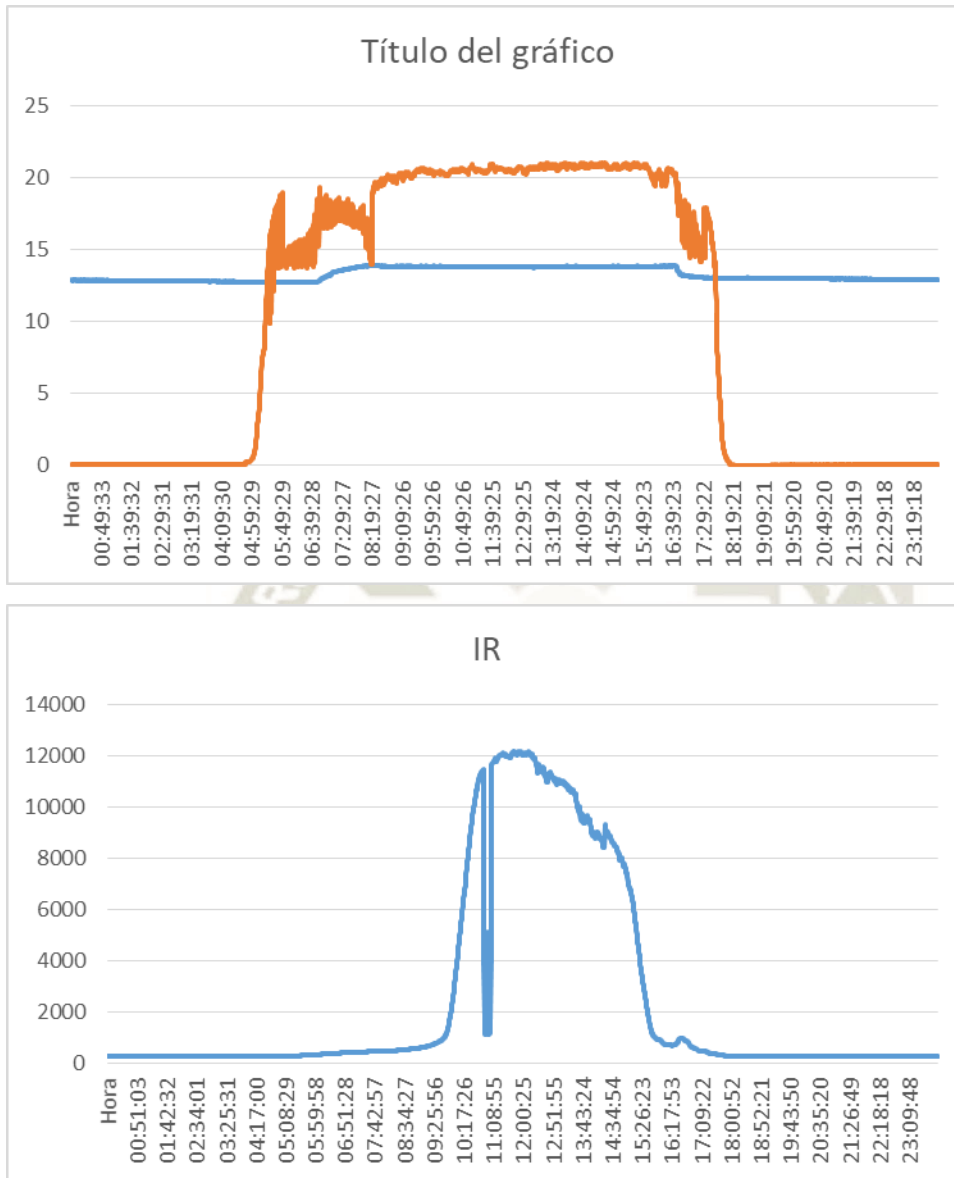


Ilustración 63 Datos del día 10 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.

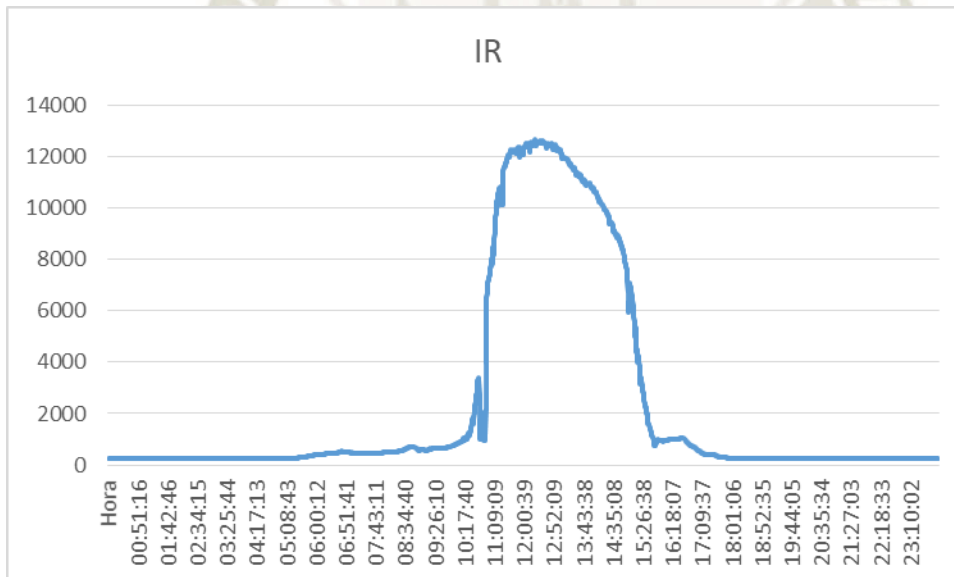
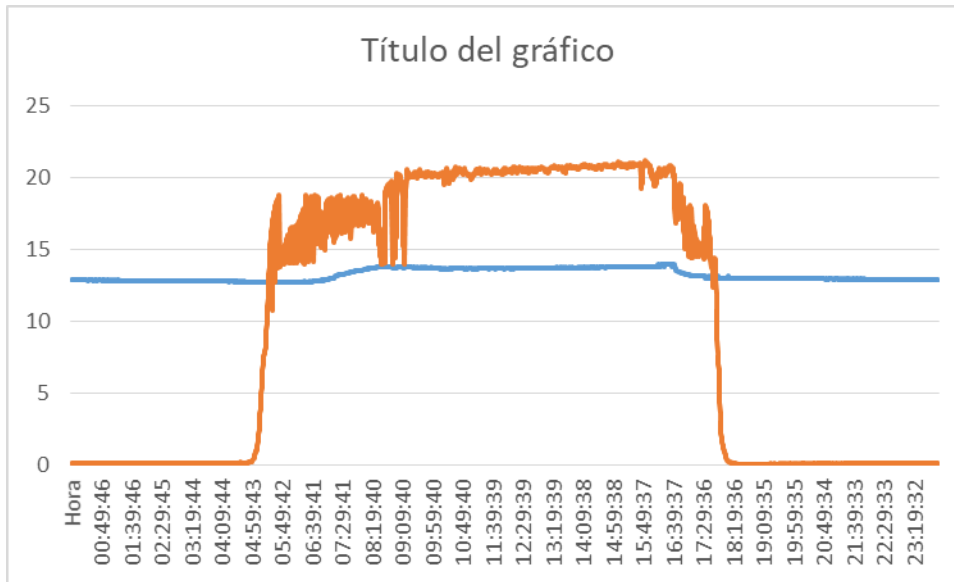


Ilustración 64 Datos del día 11 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.

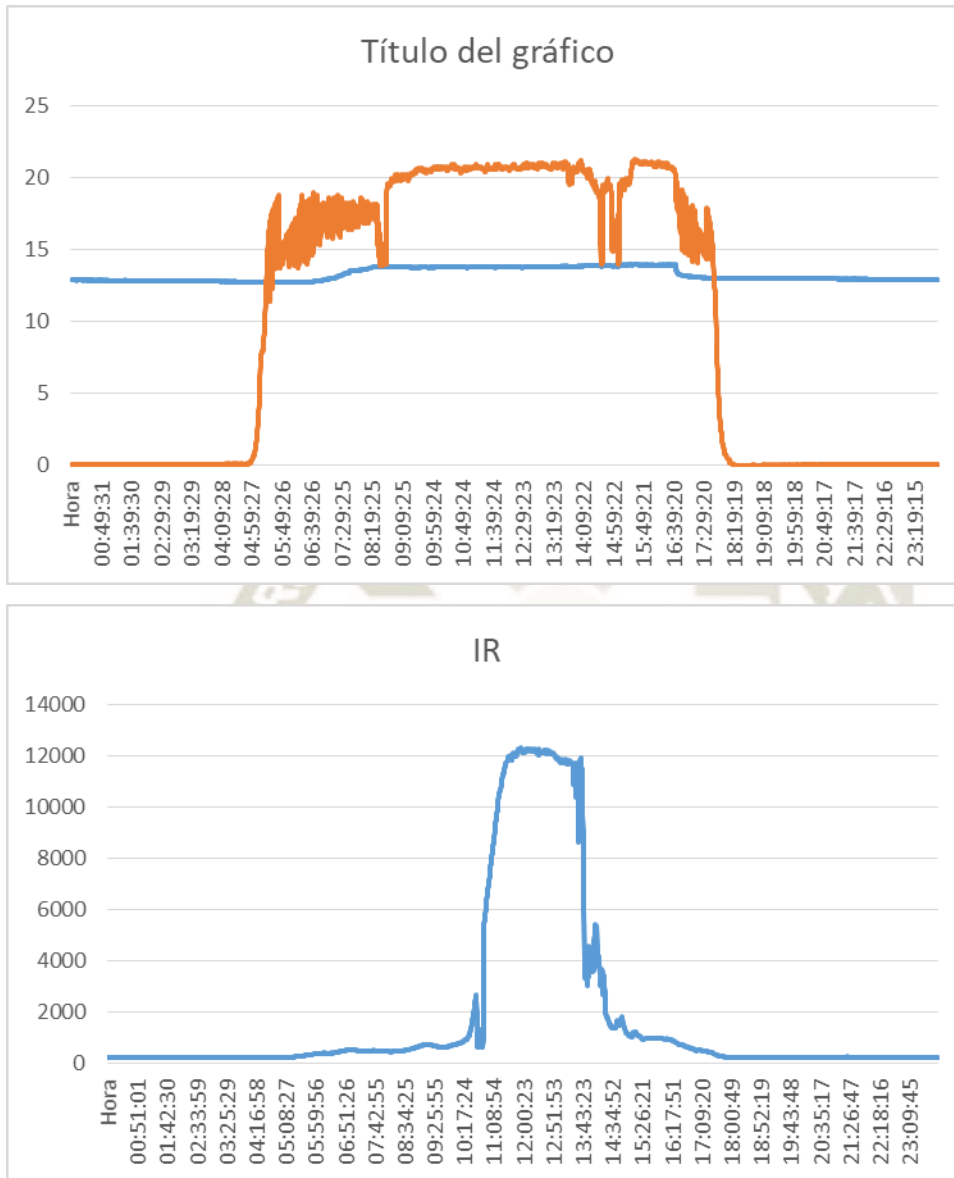


Ilustración 65 Datos del día 12 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul.

## b. Análisis

Como se puede apreciar en los gráficos el sistema muestra comportamientos similares. Al inicio del día el voltaje empieza a subir y oscilar fuertemente al cargar la batería. Posteriormente el voltaje se mantiene con oscilaciones pequeñas a la vez que la batería mantiene la carga. Al llegar la tarde se repiten las oscilaciones la perder energía por estar poniéndose el sol, lo mismo ocurre con el voltaje de la batería. Finalmente al no recibir más energía el voltaje de panel cae y el voltaje batería se mantiene en la noche conforme va entregando su energía. Este tipo de ciclo es típico de los cargadores MPPT ya que mantiene la carga de la batería al punto de máxima potencia.

También se puede observar que la irradiación cambia abruptamente alrededor de las 9:30 de la mañana alcanzando su pico máximo en el medio día solar para luego descende en una curva característica hasta las 4 de la tarde. Estas horas coinciden con los datos astronómicos de salida y ocultamiento del sol mostrados en el anexo 4. Además se pueden observar que rápidas oscilaciones en el nivel de irradiación como los vistos los días 9 y 10 de octubre casi no influyen en el comportamiento del sistema.

### 3.4.2.5 DÍAS NUBLADOS

#### a. Toma de datos

Las ilustraciones de la 66 a la 73 muestran los datos para días nublados sin experimentos realizados. Estos días son comparados con la línea de base para el sistema experto. Se muestran tanto los datos de voltaje de panel y batería como la irradiación.

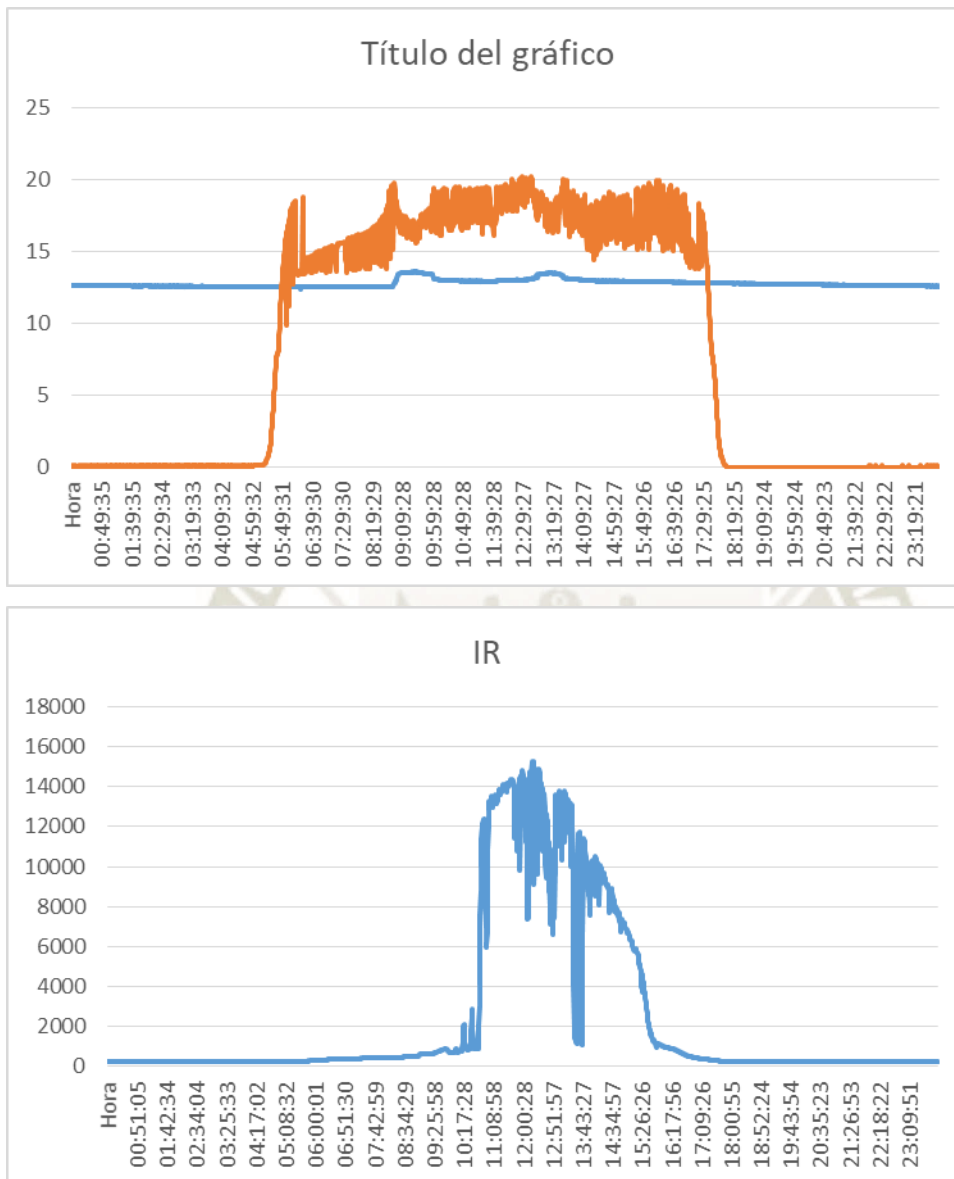


Ilustración 66 Datos del día 15 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul

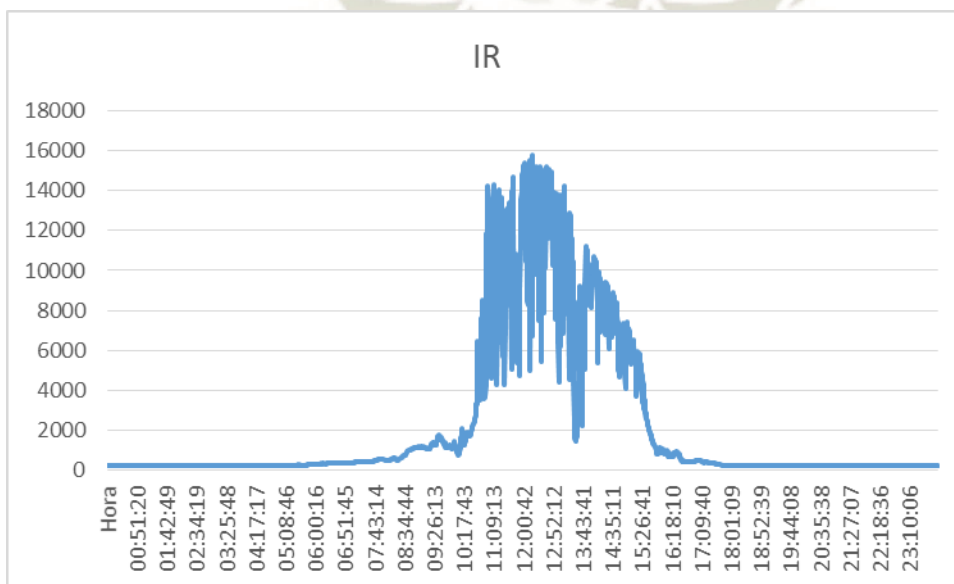
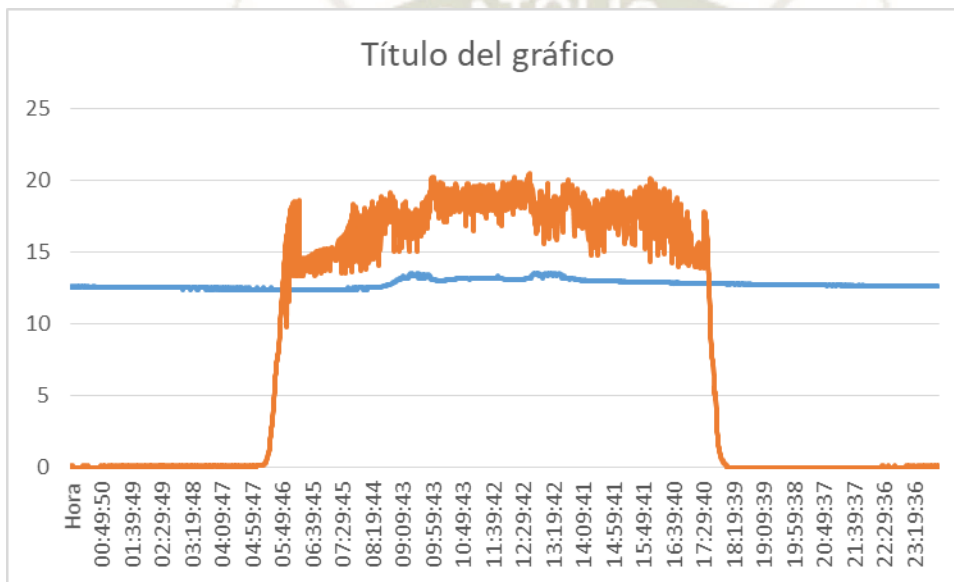
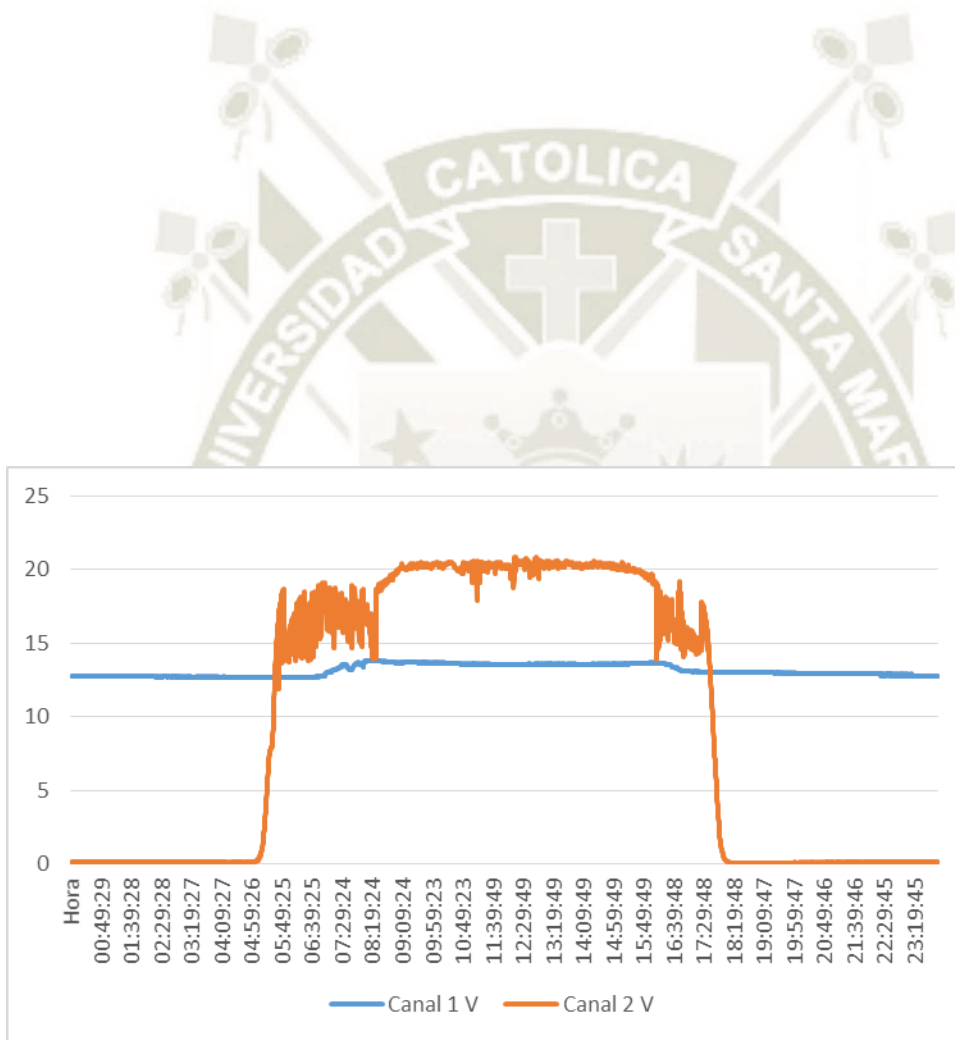


Ilustración 67 Datos del día 16 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul



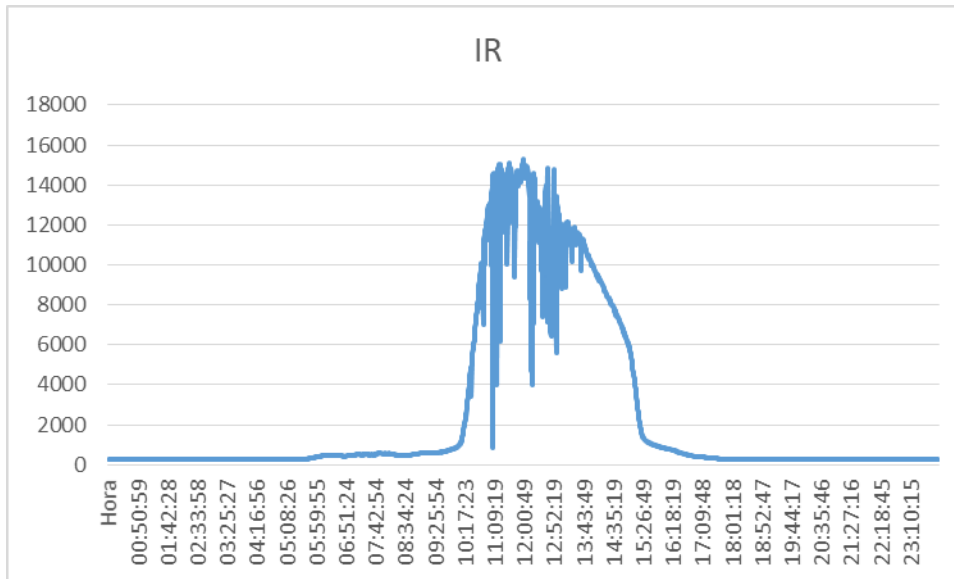
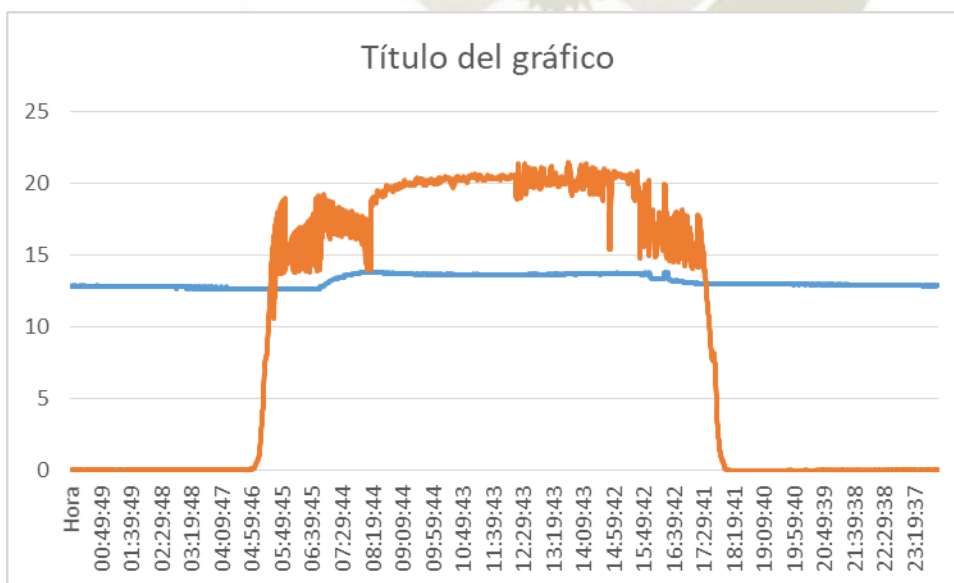


Ilustración 68 Datos del día 25 de setiembre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul



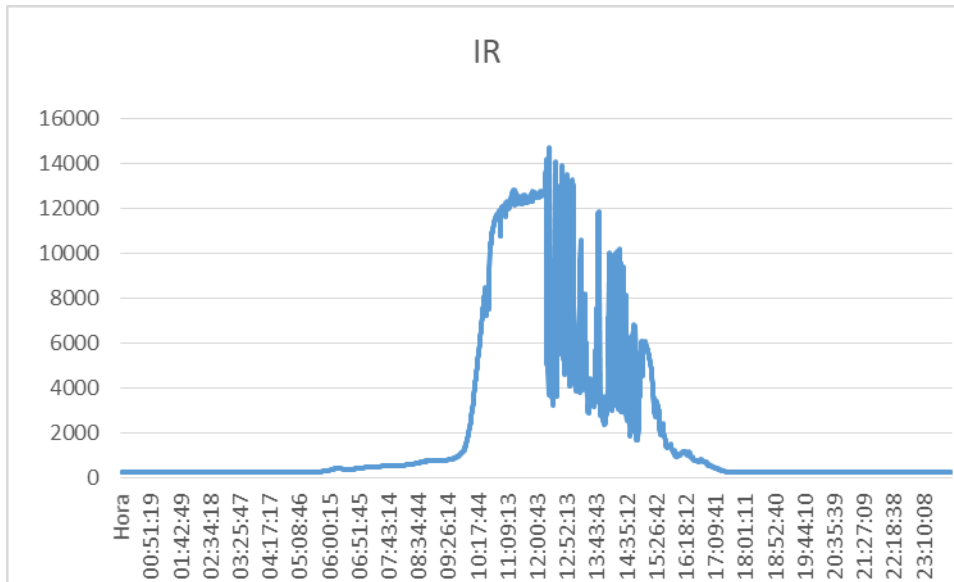


Ilustración 69 Datos del día 4 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul



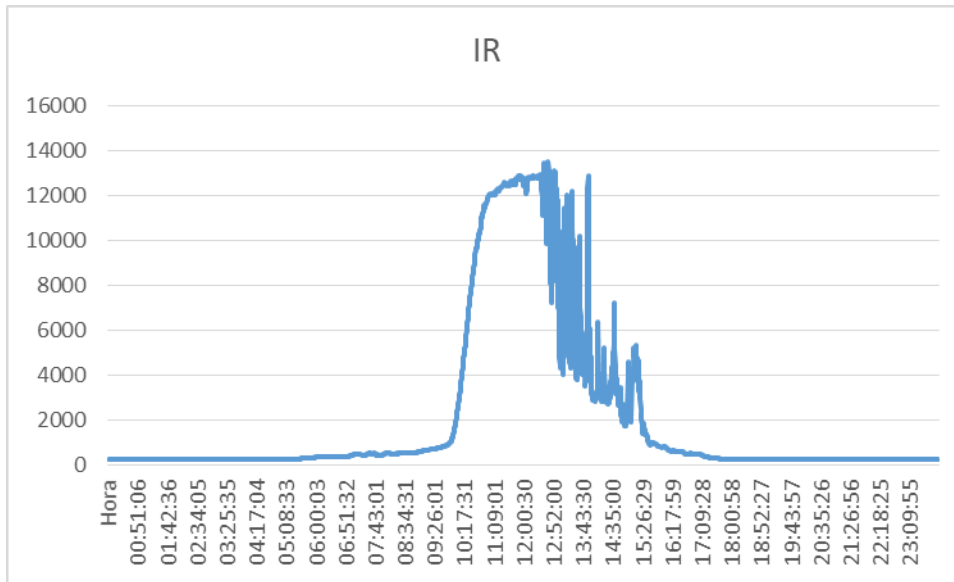
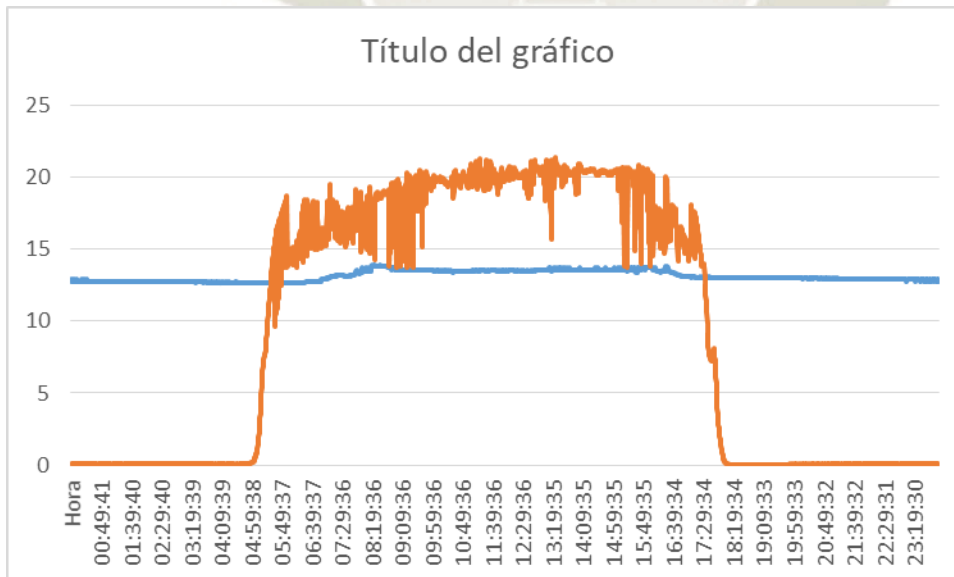


Ilustración 70 Datos del día 5 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul



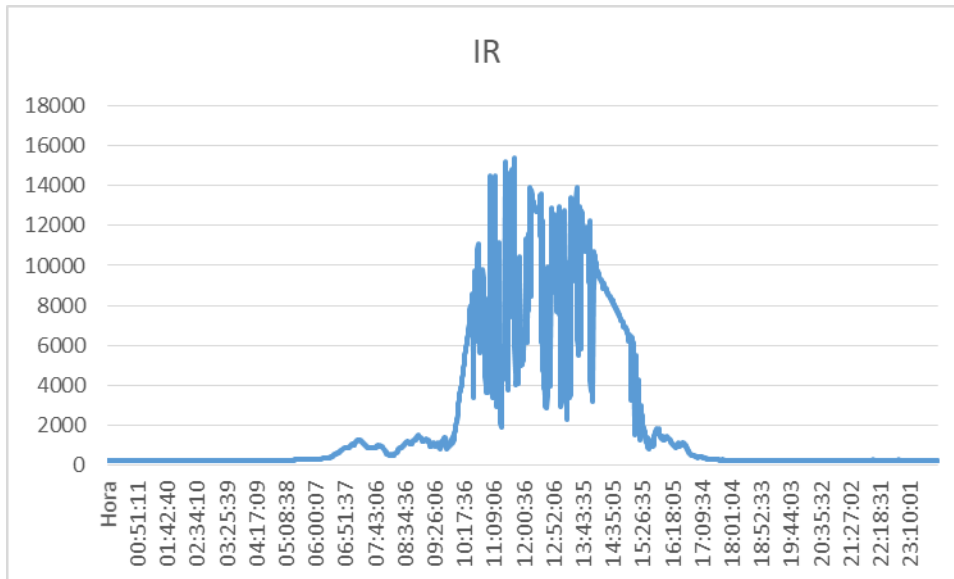


Ilustración 71 Datos del día 6 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul



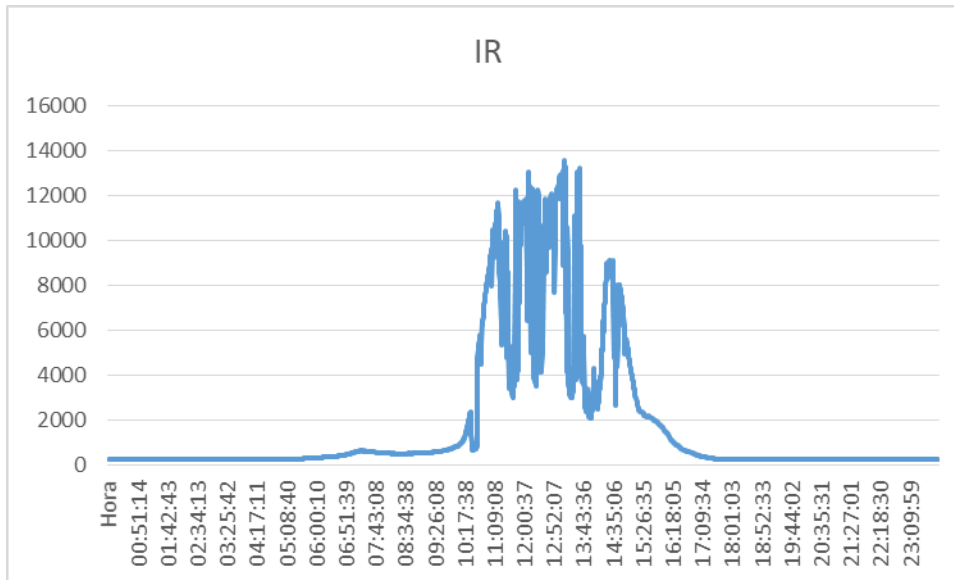
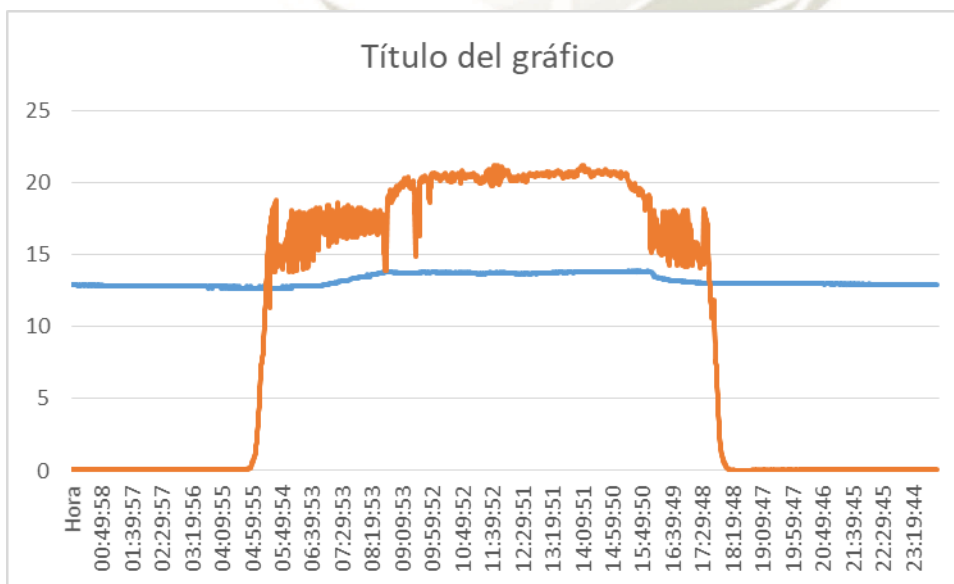


Ilustración 72 Datos del día 7 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul



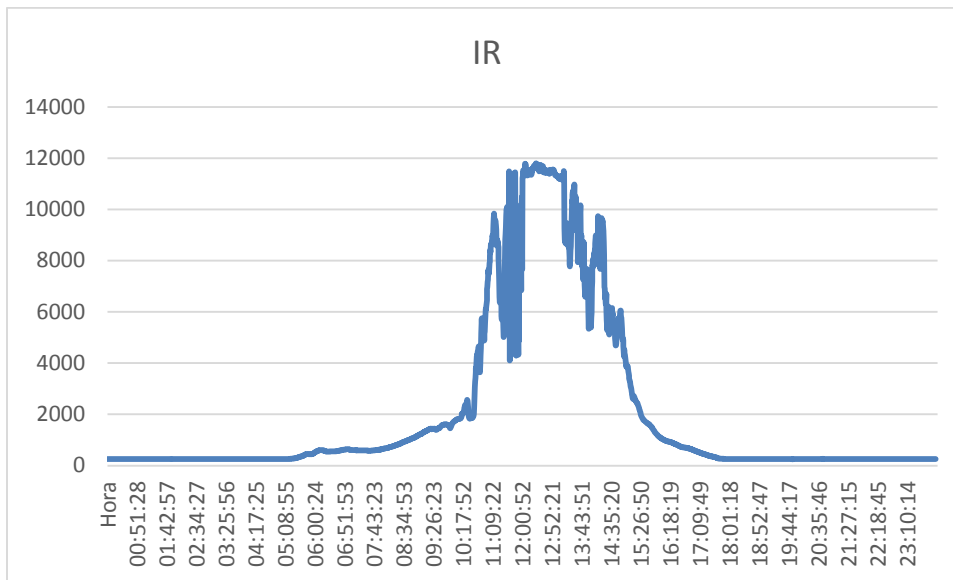


Ilustración 73 Datos del día 6 de octubre en rojo el voltaje del panel fotovoltaicos. En Azul el voltaje de las baterías. En el gráfico inferior la irradiación en azul

### b. Análisis

El análisis de los gráficos muestra como, durante días nublados, la irradiación oscila al pasar las nubes. También se muestra la relación entre la irradiación y el voltaje del panel. Por ejemplo los días 4 y 5 de octubre se notan claramente los efectos entre la mañana y una tarde nublada.

### 3.4.2.6 EVALUACIÓN DE DATOS

De acuerdo a lo visto en las secciones anteriores y orientando el análisis a las necesidades de la aplicación (mantener equipos de comunicaciones en funcionamiento) podemos desprender las siguientes conclusiones para cada tipo de falla o condición a ser detectada.

- a. Baterías defectuosa o al final de su vida útil: Es detectable a partir del deterioro del voltaje de la batería lo largo de un periodo largo.
- b. Paneles defectuosos o al final de su vida útil. Es detectable a partir del deterioro del voltaje de la batería lo largo de un periodo largo.
- c. Efecto de sombra (Shadowing) en los paneles: Tiene efecto limitado en el rendimiento energético del panel dada su poca temporalidad.
- d. Panel fracturado. No tiene efectos en el rendimiento energético del panel.
- e. Paneles sucios o cubiertos.: Tiene efecto limitado en el rendimiento energético del panel dada que el viento remueve el polvo y el poco polvo permanente existente no afecta el rendimiento energético del panel.
- f. Día nublado: Tiene un efecto distinguible en el rendimiento energético total del panel pero es detectable mediante el uso de la información proporcionada por el sensor de irradiación.
- g. Paneles mal orientados. Es detectable mediante una comparación entre las horas de salida y puesta de sol y la curva de voltaje de panel.

Para nuestra aplicación entonces se vuelve importante la detección del día nublado. Siendo que el resto de fallas no tienen un efecto importante en el funcionamiento del sistema.

### 3.4.3 DESARROLLO DE ALGORITMOS DE DIAGNÓSTICO.

Se desarrollaron los siguientes algoritmos para la detección de los errores pertinentes a la aplicación del sistema.

#### 3.4.3.1 DETECCIÓN DE FALLA DE PANEL Y DIA NUBLADO

La detección de falla de panel se realiza juntamente con la detección de la presencia de un día nublado como se detalla en la ilustración 74. Dado que durante el día ocurren oscilaciones de voltaje debidas a distintas razones la prueba se realiza diariamente durante el mediodía astronómico. El algoritmo primero calcula la hora de salida y puesta de sol a partir de la fecha provista por el módulo GPS y un algoritmo astronómico. Posteriormente el sistema usa esta información para calcular el medio día astronómico:

$$\text{Medio día astronómico} = \text{Hora de salida} + \frac{(\text{hora de puesta} - \text{hora de salida})}{2}$$

Luego se realizan una comparación para que el sistema espere al medio día astronómico correspondiente a esa fecha. A dicha hora el sistema compara el voltaje del panel con el límite obtenido experimentalmente (20 Voltios) de ser mayor el sistema continúa su funcionamiento normal, en caso el voltaje sea menor a 20 voltios el sistema pasa a analizar la siguiente condición. En esta condición se compara si la irradiación al medio día solar es menor al valor obtenido experimentalmente (12000), de ser este el caso significaría que se trata de un día

nublado y el sistema continúa con su funcionamiento normal. De ser el valor mayor a 12000 el sistema reporta una falla del panel.

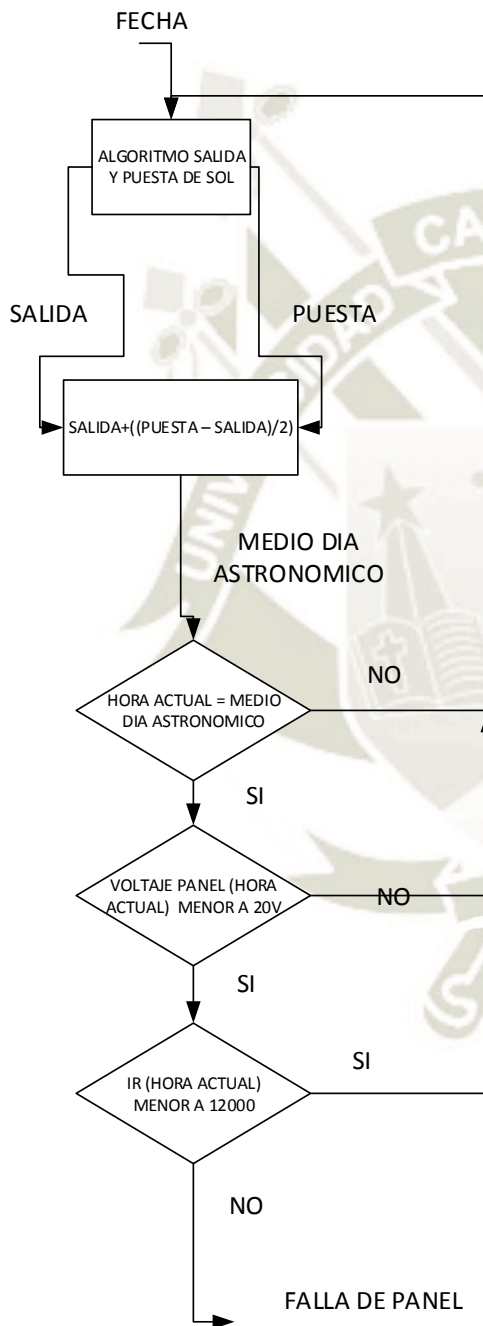
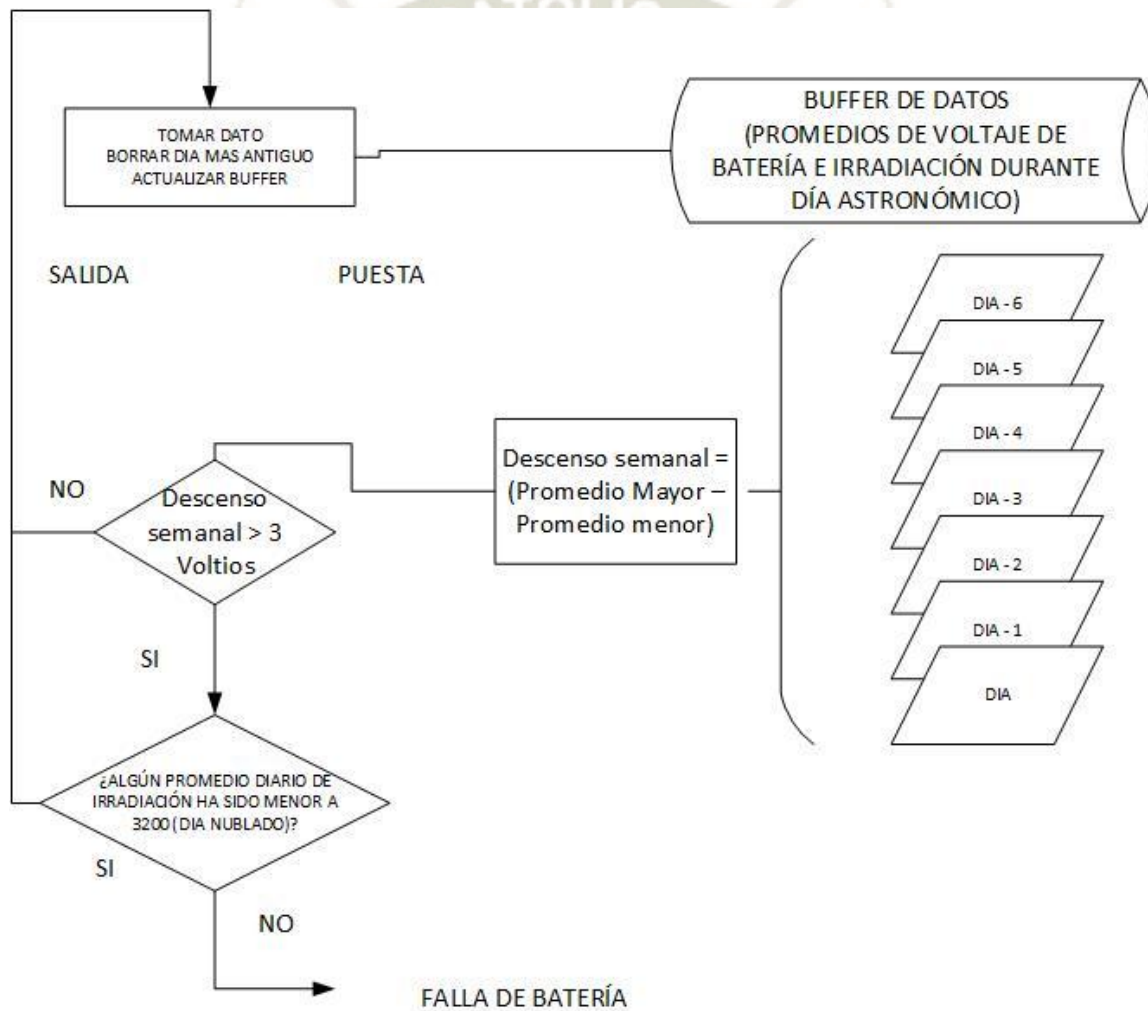


Ilustración 74 Algoritmo de detección de falla de panel.

### 3.4.3.2 DETECCIÓN DE PANELES Y BATERÍAS DEFECTUOSOS.

Se realiza mediante el cálculo del promedio de los últimos 10 días del promedio diario de voltajes de baterías y voltajes y comparándolo con los promedios diarios de irradiación. Si el promedio de alguno voltajes es menor al esperado (determinado experimentalmente) para los valores de irradiación entonces el sistema reporta una advertencia.



### **3.4.3.3 DETECCIÓN DE PANELES MAL ORIENTADOS.**

Se realiza mediante el cálculo de la hora de salida y puesta del sol y comparándolo con la hora en que sube y baja el voltaje del panel solar. Si el desplazamiento es muy largo entonces eso significaría que los paneles están mal orientados.

## **3.5 IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE.**

### **3.5.1 IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE EMBEBIDO.**



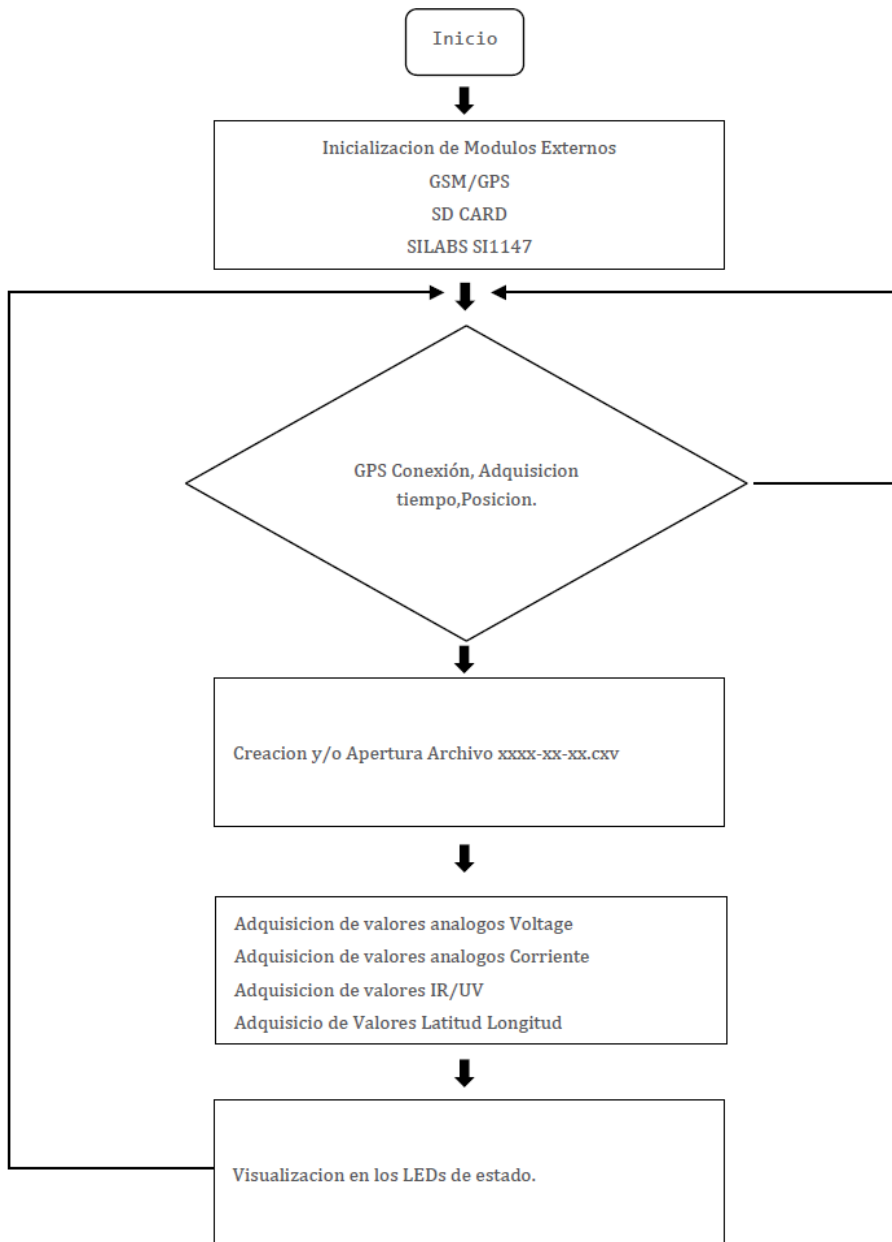


Ilustración 75 Diagrama básico del sistema embebido.

Para la programación del sistema Arduino se usaron las siguientes librerías:

Adafruit SI1145 Library: Para el sensor de irradiación.

Chrono: Para el RTC

DS1307RTC\_ID421: Para el RTC

Dusk2Dawn\_ID1483: Para calcular la salida y puesta del día astronómico.

MiniApache: Servidor Web

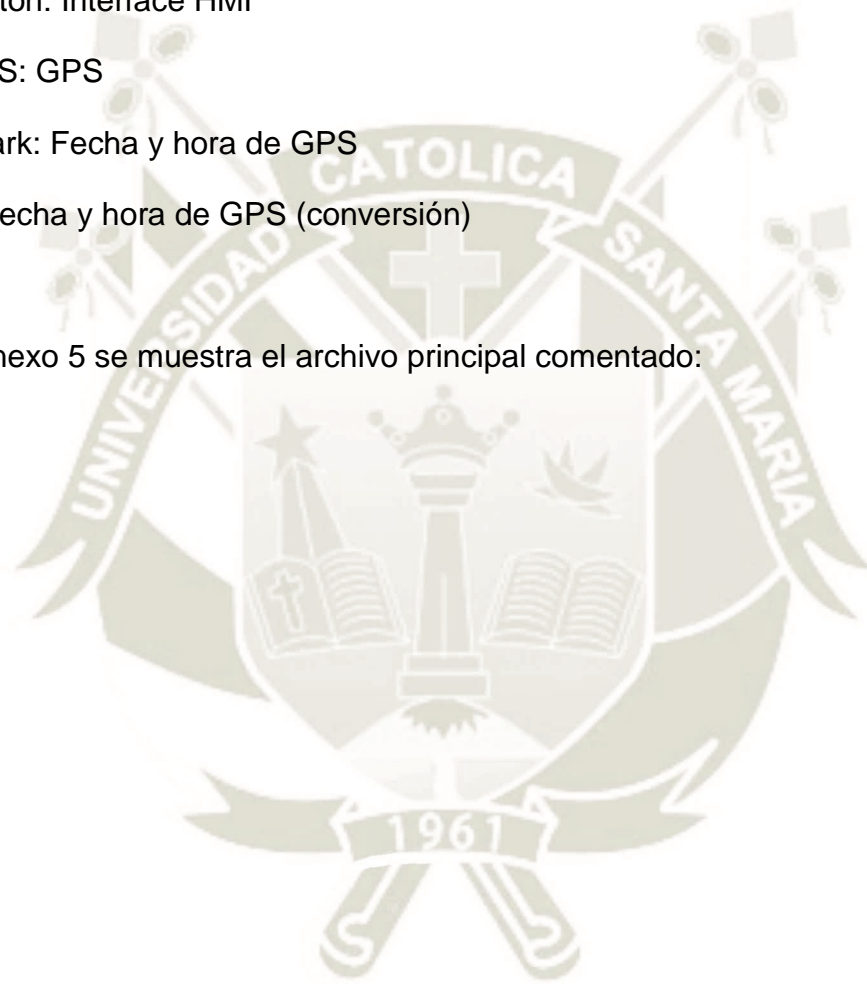
OneButton: Interface HMI

TinyGPS: GPS

Timemark: Fecha y hora de GPS

Time: Fecha y hora de GPS (conversión)

En el anexo 5 se muestra el archivo principal comentado:



## Capítulo IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se diseñó e implementó el sistema prototipo para monitoreo de funcionamiento del sistema fotovoltaico.
- El sistema prototipo permite determinar fallas de panel, fallas de batería, de orientación y distinguirlo de condiciones normales de operación y días nublados.
- Se analizaron los datos obtenidos por el registrador del sistema, para voltajes de batería y panel y se simularon los efectos de ensombrecimiento, empolvamiento y fractura de panel.
- Se determinó que las fallas de ensombrecimiento y empolvamiento no influyen en el desempeño del sistema para la aplicación demostrada.
- Se implementó un servidor web que permite al sistema informar sobre el estado del sistema a los operarios del sistema.
- Se recomienda el desarrollo de algoritmos que permitan una detección más precisa para otras aplicaciones.

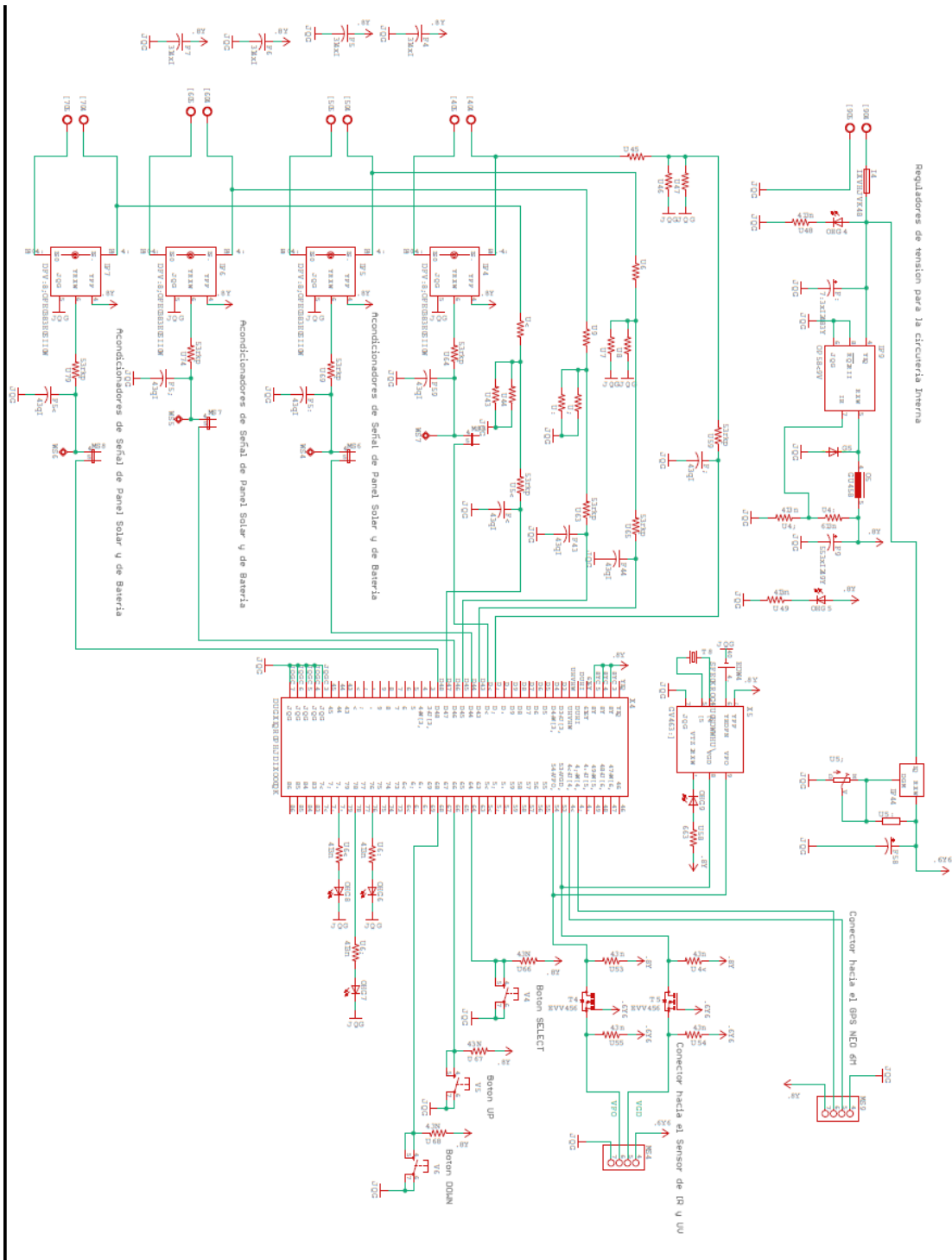
## Bibliografía

- Bauer, G. H. (2015). *Photovoltaic Solar Energy Conversion*. London, New York: Springer-Verlag.
- Commision, C. E. (2001). *A GUIDE TO PHOTOVOLTAIC (PV)*. San Ramón, California: Endecon Engineering.
- Direct, S. (20 de julio de 2018). *Science Direct*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484715000293>
- Engineering.com. (23 de Julio de 2018). *ENGINEERING.COM*. Obtenido de <http://www.engineering.com/SustainableEngineering/RenewableEnergyEngineering/SolarEnergyEngineering/Photovoltaics/tabid/3890/Default.aspx>
- Frank Vignola, J. M. (2012). *Solar and Infrared Radiation Measurement*. London, New York: CRC Press.
- INC, C. S. (10 de Julio de 2018). *Civic Solar*. Obtenido de <https://www.civicsolar.com/support/installer/articles/how-does-depth-discharge-factor-grid-connected-battery-systems>
- INC., T. (26 de Julio de 2018). *TRITEC*. Obtenido de <http://www.tritec-intervento.cl/productostritec/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>
- Keane, J. (2010). *Pico-solar Electric Systems*. New York: CRC.
- Keane, J. (s.f.). *Pico-solar Electric Systems* .
- Tutorials, Alternative Energy. (12 de Julio de 2018). *Cell IV Characteristics*. Obtenido de <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html>
- WIKI, P. (23 de Julio de 2018). *Photonics WIKI*. Obtenido de [http://photonicswiki.org/index.php?title=Silicon\\_Solar](http://photonicswiki.org/index.php?title=Silicon_Solar)

## ANEXOS

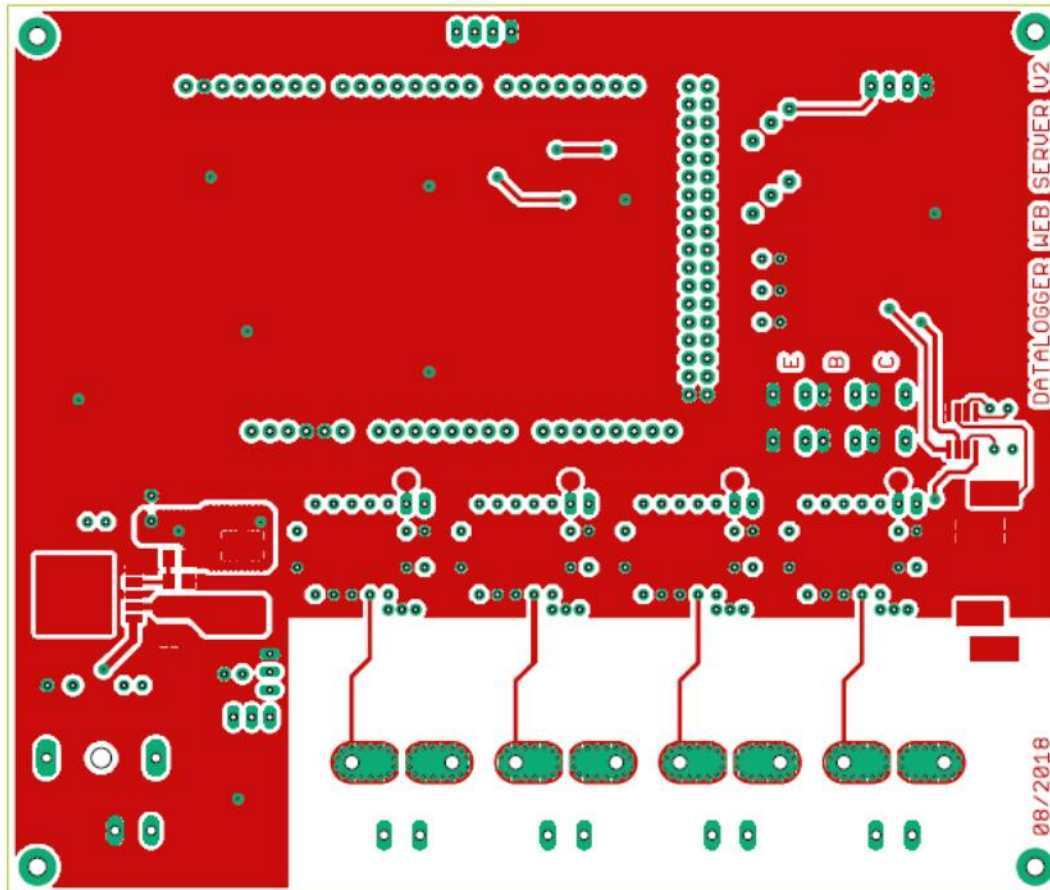
### ANEXO 1 ESQUEMATICO DEL SISTEMA





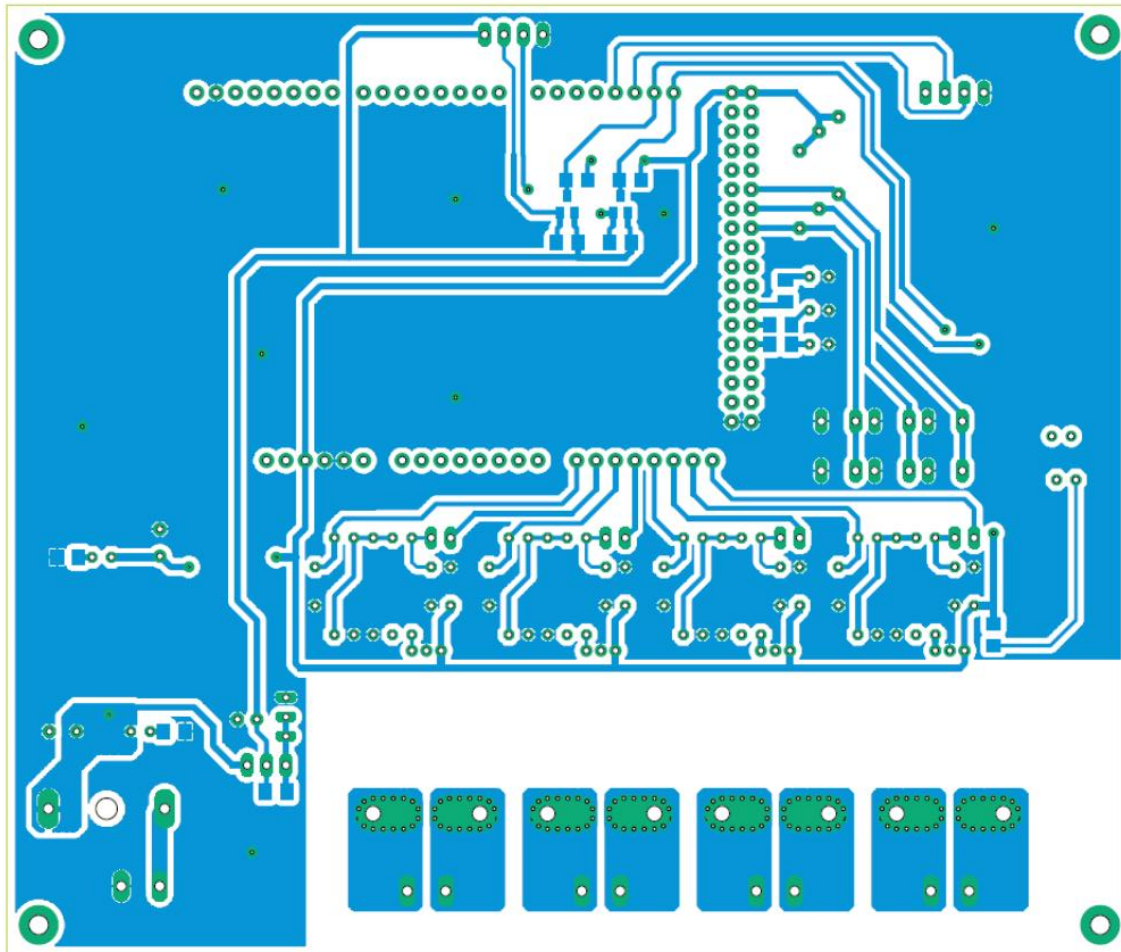
ANEXO 2 CIRCUITO IMPRESO

### CAPA SUPERIOR



### CAPA INFERIOR





**ANEXO 3 HOJAS DE DATOS**



## ANEXO 4 DATOS DE SALIDA Y PUESTA DE SOL (AREQUIPA, FECHAS INVESTIGADAS)

2018 sep	Sunrise/Sunset		Daylength		Astronomical Twilight		Nautical Twilight		Civil Twilight		Solar Noon	
	Sunrise	Sunset	Length	Difference	Start	End	Start	End	Start	End	Time	Mil. km
1	5:52 ↑ (82°)	7:39 ↑ (278°)	11:47:33	+0:51	04:40	18:51	05:05	18:26	05:30	18:01	11:46 (65,5°)	150,967
2	5:51 ↑ (82°)	7:40 ↑ (278°)	11:48:25	+0:52	04:39	18:52	05:04	18:26	05:29	18:01	11:45 (65,9°)	150,932
3	5:50 ↑ (82°)	7:40 ↑ (277°)	11:49:18	+0:52	04:39	18:52	05:04	18:27	05:29	18:01	11:45 (66,2°)	150,897
4	5:50 ↑ (83°)	7:40 ↑ (277°)	11:50:10	+0:52	04:38	18:52	05:03	18:27	05:28	18:01	11:45 (66,6°)	150,861
5	5:49 ↑ (83°)	7:40 ↑ (277°)	11:51:03	+0:52	04:37	18:52	05:02	18:27	05:27	18:02	11:44 (67,0°)	150,825
6	5:48 ↑ (84°)	7:40 ↑ (276°)	11:51:56	+0:52	04:36	18:52	05:01	18:27	05:26	18:02	11:44 (67,3°)	150,788
7	5:47 ↑ (84°)	7:40 ↑ (276°)	11:52:49	+0:53	04:36	18:52	05:01	18:27	05:26	18:02	11:44 (67,7°)	150,751
8	5:47 ↑ (84°)	7:40 ↑ (275°)	11:53:42	+0:53	04:35	18:52	05:00	18:27	05:25	18:02	11:43 (68,1°)	150,714
9	5:46 ↑ (85°)	7:40 ↑ (275°)	11:54:36	+0:53	04:34	18:52	04:59	18:27	05:24	18:02	11:43 (68,5°)	150,675
10	5:45 ↑ (85°)	7:40 ↑ (275°)	11:55:29	+0:53	04:33	18:52	04:58	18:27	05:23	18:02	11:43 (68,8°)	150,637
11	5:44 ↑ (86°)	7:41 ↑ (274°)	11:56:23	+0:53	04:33	18:52	04:58	18:27	05:23	18:02	11:42 (69,2°)	150,597
12	5:43 ↑ (86°)	7:41 ↑ (274°)	11:57:17	+0:53	04:32	18:52	04:57	18:27	05:22	18:02	11:42 (69,6°)	150,558
13	5:43 ↑ (86°)	7:41 ↑ (273°)	11:58:11	+0:54	04:31	18:52	04:56	18:27	05:21	18:02	11:41 (70,0°)	150,517
14	5:42 ↑ (87°)	7:41 ↑ (273°)	11:59:05	+0:54	04:30	18:52	04:55	18:27	05:20	18:02	11:41 (70,4°)	150,477
15	5:41 ↑ (87°)	7:41 ↑ (273°)	11:59:59	+0:54	04:29	18:53	04:54	18:27	05:19	18:02	11:41 (70,7°)	150,436
16	5:40 ↑ (88°)	7:41 ↑ (272°)	12:00:54	+0:54	04:29	18:53	04:54	18:28	05:19	18:03	11:40 (71,1°)	150,394
17	5:39 ↑ (88°)	7:41 ↑ (272°)	12:01:48	+0:54	04:28	18:53	04:53	18:28	05:18	18:03	11:40 (71,5°)	150,353
18	5:38 ↑ (88°)	7:41 ↑ (271°)	12:02:43	+0:54	04:27	18:53	04:52	18:28	05:17	18:03	11:40 (71,9°)	150,311
19	5:38 ↑ (89°)	7:41 ↑ (271°)	12:03:38	+0:54	04:26	18:53	04:51	18:28	05:16	18:03	11:39 (72,3°)	150,269
20	5:37 ↑ (89°)	7:41 ↑ (271°)	12:04:33	+0:54	04:25	18:53	04:50	18:28	05:15	18:03	11:39 (72,7°)	150,227
21	5:36 ↑ (90°)	7:42 ↑ (270°)	12:05:28	+0:54	04:24	18:53	04:49	18:28	05:14	18:03	11:39 (73,1°)	150,185
22	5:35 ↑ (90°)	7:42 ↑ (270°)	12:06:23	+0:54	04:24	18:53	04:49	18:28	05:14	18:03	11:38 (73,5°)	150,143
23	5:34 ↑ (90°)	7:42 ↑ (269°)	12:07:18	+0:55	04:23	18:53	04:48	18:28	05:13	18:03	11:38 (73,8°)	150,100
24	5:34 ↑ (91°)	7:42 ↑ (269°)	12:08:13	+0:55	04:22	18:54	04:47	18:28	05:12	18:03	11:38 (74,2°)	150,058
25	5:33 ↑ (91°)	7:42 ↑ (269°)	12:09:08	+0:55	04:21	18:54	04:46	18:29	05:11	18:04	11:37 (74,6°)	150,016
26	5:32 ↑ (92°)	7:42 ↑ (268°)	12:10:03	+0:55	04:20	18:54	04:45	18:29	05:10	18:04	11:37 (75,0°)	149,974
27	5:31 ↑ (92°)	7:42 ↑ (268°)	12:10:58	+0:55	04:19	18:54	04:45	18:29	05:10	18:04	11:37 (75,4°)	149,932
28	5:30 ↑ (92°)	7:42 ↑ (267°)	12:11:54	+0:55	04:19	18:54	04:44	18:29	05:09	18:04	11:36 (75,8°)	149,890
29	5:30 ↑ (93°)	7:42 ↑ (267°)	12:12:49	+0:55	04:18	18:54	04:43	18:29	05:08	18:04	11:36 (76,2°)	149,848
30	5:29 ↑ (93°)	7:43 ↑ (267°)	12:13:44	+0:55	04:17	18:55	04:42	18:29	05:07	18:04	11:36 (76,6°)	149,806

2018 oct	Sunrise/Sunset		Daylength		Astronomical Twilight		Nautical Twilight		Civil Twilight		Solar Noon	
	Sunrise	Sunset	Length	Difference	Start	End	Start	End	Start	End	Time	Mil. km
1	5:28 ↑ (94°)	7:43 ↑ (266°)	12:14:39	+0:55	04:16	18:55	04:41	18:29	05:06	18:04	11:35 (77,0°)	149,765
2	5:27 ↑ (94°)	7:43 ↑ (266°)	12:15:35	+0:55	04:15	18:55	04:40	18:30	05:06	18:04	11:35 (77,3°)	149,723
3	5:26 ↑ (94°)	7:43 ↑ (265°)	12:16:30	+0:55	04:14	18:55	04:40	18:30	05:05	18:05	11:35 (77,7°)	149,681
4	5:26 ↑ (95°)	7:43 ↑ (265°)	12:17:25	+0:55	04:14	18:55	04:39	18:30	05:04	18:05	11:34 (78,1°)	149,639
5	5:25 ↑ (95°)	7:43 ↑ (265°)	12:18:20	+0:55	04:13	18:56	04:38	18:30	05:03	18:05	11:34 (78,5°)	149,597
6	5:24 ↑ (96°)	7:43 ↑ (264°)	12:19:16	+0:55	04:12	18:56	04:37	18:30	05:03	18:05	11:34 (78,9°)	149,554
7	5:23 ↑ (96°)	7:44 ↑ (264°)	12:20:11	+0:55	04:11	18:56	04:36	18:31	05:02	18:05	11:33 (79,3°)	149,512
8	5:23 ↑ (96°)	7:44 ↑ (263°)	12:21:06	+0:55	04:10	18:56	04:36	18:31	05:01	18:06	11:33 (79,6°)	149,469
9	5:22 ↑ (97°)	7:44 ↑ (263°)	12:22:01	+0:54	04:09	18:57	04:35	18:31	05:00	18:06	11:33 (80,0°)	149,426
10	5:21 ↑ (97°)	7:44 ↑ (263°)	12:22:56	+0:54	04:09	18:57	04:34	18:31	05:00	18:06	11:33 (80,4°)	149,383
11	5:21 ↑ (98°)	7:44 ↑ (262°)	12:23:50	+0:54	04:08	18:57	04:33	18:32	04:59	18:06	11:32 (80,8°)	149,340
12	5:20 ↑ (98°)	7:45 ↑ (262°)	12:24:45	+0:54	04:07	18:58	04:33	18:32	04:58	18:06	11:32 (81,2°)	149,296
13	5:19 ↑ (98°)	7:45 ↑ (261°)	12:25:40	+0:54	04:06	18:58	04:32	18:32	04:57	18:07	11:32 (81,5°)	149,253
14	5:18 ↑ (99°)	7:45 ↑ (261°)	12:26:34	+0:54	04:05	18:58	04:31	18:32	04:57	18:07	11:32 (81,9°)	149,209
15	5:18 ↑ (99°)	7:45 ↑ (261°)	12:27:28	+0:54	04:05	18:59	04:30	18:33	04:56	18:07	11:31 (82,3°)	149,166
16	5:17 ↑ (100°)	7:45 ↑ (260°)	12:28:22	+0:54	04:04	18:59	04:30	18:33	04:55	18:07	11:31 (82,6°)	149,123
17	5:16 ↑ (100°)	7:46 ↑ (260°)	12:29:16	+0:53	04:03	18:59	04:29	18:33	04:55	18:08	11:31 (83,0°)	149,079
18	5:16 ↑ (100°)	7:46 ↑ (259°)	12:30:10	+0:53	04:02	19:00	04:28	18:34	04:54	18:08	11:31 (83,4°)	149,036
19	5:15 ↑ (101°)	7:46 ↑ (259°)	12:31:03	+0:53	04:02	19:00	04:27	18:34	04:53	18:08	11:31 (83,7°)	148,994
20	5:15 ↑ (101°)	7:47 ↑ (259°)	12:31:57	+0:53	04:01	19:00	04:27	18:34	04:53	18:09	11:30 (84,1°)	148,951
21	5:14 ↑ (101°)	7:47 ↑ (258°)	12:32:50	+0:53	04:00	19:01	04:26	18:35	04:52	18:09	11:30 (84,4°)	148,909
22	5:13 ↑ (102°)	7:47 ↑ (258°)	12:33:43	+0:52	03:59	19:01	04:25	18:35	04:51	18:09	11:30 (84,8°)	148,867
23	5:13 ↑ (102°)	7:47 ↑ (258°)	12:34:35	+0:52	03:59	19:02	04:25	18:35	04:51	18:09	11:30 (85,1°)	148,825
24	5:12 ↑ (103°)	7:48 ↑ (257°)	12:35:28	+0:52	03:58	19:02	04:24	18:36	04:50	18:10	11:30 (85,5°)	148,784
25	5:12 ↑ (103°)	7:48 ↑ (257°)	12:36:20	+0:52	03:57	19:03	04:24	18:36	04:49	18:10	11:30 (85,8°)	148,744
26	5:11 ↑ (103°)	7:48 ↑ (257°)	12:37:11	+0:51	03:57	19:03	04:23	18:37	04:49	18:11	11:30 (86,2°)	148,703
27	5:11 ↑ (104°)	7:49 ↑ (256°)	12:38:03	+0:51	03:56	19:03	04:22	18:37	04:48	18:11	11:29 (86,5°)	148,664
28	5:10 ↑ (104°)	7:49 ↑ (256°)	12:38:54	+0:51	03:55	19:04	04:22	18:37	04:48	18:11	11:29 (86,9°)	148,624
29	5:10 ↑ (104°)	7:49 ↑ (255°)	12:39:45	+0:50	03:55	19:04	04:21	18:38	04:47	18:12	11:29 (87,2°)	148,585
30	5:09 ↑ (105°)	7:50 ↑ (255°)	12:40:35	+0:50	03:54	19:05	04:21	18:38	04:47	18:12	11:29 (87,5°)	148



ANEXO 5  
CODIGO FUENTE

```
#include <Arduino.h>

#include <Ethernet.h>
////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
#include <MiniApache.h>
////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

File LogFile;
String dataString;
String filename; // This is a holder for the full file name
char dateNameBuffer[] = "";
////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
#include <Chrono.h>

Chrono secondsChrono(Chrono::SECONDS);

////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
#include <Adafruit_SI1145.h>
Adafruit_SI1145 SensorUV = Adafruit_SI1145();
unsigned long IRdata;
```

```

float UVdata;

////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
#include <TimeLib.h>
#include <Wire.h>
#include <DS1307RTC.h> // a basic DS1307 library that returns time as a time_t
unsigned long age;

int Year;
byte Month, Day, Hour, Minute, Second;
bool DS1307UpdateFlag = 1; // Indicador de actualizacion de los registros del
RTC DS1307
time_t tm; //Variable que contendra el valor de tiempo en formato C
standard, numero de segundos transcurridos desde 1 de 1970( se usara para
sincronizar el RTC con el GPS)
tmElements_t tm_rtc; //estructura que nos permitira un acceso conveniente a
los elementos de tiempo tiempo directamente (se usara solo para leer la Info del
RTC)

// Offset hours from gps time (UTC)
//const UTC_offset = 1; // Central European Time
const int UTC_offset = -5; // Eastern Standard Time (USA)
//const UTC_offset = -4; // Eastern Daylight Time (USA)
//const UTC_offset = -8; // Pacific Standard Time (USA)
//const UTC_offset = -7; // Pacific Daylight Time (USA)
////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
byte mac[] = {0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED}; // MAC address from
Ethernet shield sticker under board
    
```

```

IPAddress ip(192, 168, 1, 200);           // IP address, may need to be
changed depending on network
MiniApache apache(80);                   // Create a server at port 80

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
/**** DATA LOGGER AND TIMER CONTROLS ****/

unsigned long lastIntervalTime = 0; //The time the last measurement occurred.
#define MEASURE_INTERVAL 5000 //10 minute intervals between
measurements (in ms)
unsigned long lastIntervalRTC = 0; //The time the last measurement occurred.
#define RTC_INTERVAL_UPDATE 60000 //60 minute intervals between update
the DS1307(in ms)

// Variables will change:

#define VOLTAGE_CANAL_1 A8
#define CORRIENTE_CANAL_1 A9

#define VOLTAGE_CANAL_2 A10
#define CORRIENTE_CANAL_2 A11

#define VOLTAGE_CANAL_3 A12
#define CORRIENTE_CANAL_3 A13

#define VOLTAGE_CANAL_4 A14
#define CORRIENTE_CANAL_4 A15

#define SENSITIVIDAD_ACS 40 //40mv/Amp
    
```

```
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////  
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////  
/*** Alarm thresholds ****/  
  
#define ALARM_VBAT_THRESHOLD      10.0 //V  
#define UP_VOLTAGE_THRESHOLD      20.0  
#define ALARM_IR_THRESHOLD        12000  
  
int estadoPanel = 0;  
int estadoBateria = 0;  
//0 no alarms  
//1 Cloudy  
//2 falla panel  
  
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////  
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////  
//FALLA DE PANEL  
  
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////  
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////  
/*****/  
  
float VoltageCanal1;  
float VoltageCanal2;  
float VoltageCanal3;  
float VoltageCanal4;  
float CorrienteCanal1;  
float CorrienteCanal2;
```

```

float CorrienteCanal3;
float CorrienteCanal4;

#define LED_GREEN 47
#define LED_RED 45
#define LED_YELLOW 43

#define HALFMINUTE 30
#define MINUTE 60
#define FIVEMINUTE 300
#define TENMINUTE 600

unsigned int intervaloLogueo = MINUTE;
#include <OneButton.h>
OneButton SELECT_BUTTON(35, true);
void habilitarLogueo(void);
void seleccionarIntervalo(void);
bool habilitacionLogueo = false;
bool firstTimeConfig = 1;
unsigned char opcionIntervalo = 0; //en esta opcion se seleccionar la opcion para
los intervalos de logeo por defecto esta en 30 segundos

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

#include <TinyGPS.h>
static const unsigned int GPSBaud = 9600; //9600
float flat, flon;
unsigned long fix_age;
// returns +/- latitude/longitude in degrees
// The TinyGPS++ object

```

```
TinyGPS gps;  
// This custom version of delay() ensures that the gps object  
// is being "fed".
```

```
#include <Dusk2Dawn.h>  
int AqpAmanece = 0;  
int AqpAnochece = 0;  
char HoraAmaneceBuffer[6];  
char HoraAnocheceBuffer[6];  
char MedioDiaBuffer[] = "00:00";  
byte updateTimes = 100;  
int medioDia = 0;  
int horaAstronomica = 0;  
int minutoAstronomico = 0;  
static void smartDelay(unsigned long ms)  
{  
  unsigned long start = millis();  
  do  
  {  
    while (Serial1.available()) // due icin duzeldi  
      gps.encode(Serial1.read()); // due icin duzeldi  
  } while (millis() - start < ms);  
}
```

```
////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////
```

```
void seleccionarIntervalo(void)  
{  
  if (habilitacionLogueo)  
  {
```

```
    return;
}
else
{
    if (opcionIntervalo >= 3)
        opcionIntervalo = 0;
    else
        opcionIntervalo++;

    if (opcionIntervalo == 0)
    {
        intervaloLogueo = HALFMINUTE;

        digitalWrite(LED_RED, LOW);
        digitalWrite(LED_YELLOW, LOW);
    }
    if (opcionIntervalo == 1)
    {
        intervaloLogueo = MINUTE;
        digitalWrite(LED_RED, HIGH);
        digitalWrite(LED_YELLOW, LOW);
    }
    if (opcionIntervalo == 2)
    {
        digitalWrite(LED_RED, LOW);
        digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH);
        intervaloLogueo = FIVEMINUTE;
    }
    if (opcionIntervalo == 3)
    {
```

```
        intervaloLogueo = TENMINUTE;
        digitalWrite(LED_RED, HIGH);
        digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH);
    }
}
//digitalWrite(LED_GREEN, !digitalRead(LED_GREEN));
}
////////////////////////////////////

void CreatingFile(void)
{
    RTC.read(tm_rtc);
    sprintf(dateNameBuffer, "%02d-%02d-%02d.CSV", tm_rtc.Day, tm_rtc.Month,
tmYearToCalendar(tm_rtc.Year) - 2000);

    filename = "server/data/" + String(dateNameBuffer);
    //Serial.println(filename);
    // Create the file and put a row of headers at the top
    // SD.open("/server/data");
    // only open a new file if it doesn't exist
    if (!SD.exists(filename))
    {

        LogFile = SD.open(filename, FILE_WRITE); // Open the correct file
        // if the file is available, write to it:
        if (LogFile)
        {
            LogFile.println("Hora,Fecha,Canal 1 V,Canal 2 V,Canal 3 V,Canal 4
V,Canal 1 A,Canal 2 A,Canal 3 A,Canal 4 A,IR,UV,Latitud,longitud,MSNM");
            LogFile.close();
        }
    }
}
```

```

        //Serial.println("headers escritos");
    }
    // if the file isn't open, pop up an error:
    else
    {
        //Serial.println("error");
    }
}
else
{
    // Serial.println("File Exist already");
}
}

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//esta funcion solo habilita el bit para iniciar o detener le logueo
void habilitarLogueo(void)
{

    if (habilitacionLogueo)
    {
        habilitacionLogueo = 0;
        secondsChrono.stop();
        //Serial.println("Logueo deshabilitado");
    }
    else
    {
        habilitacionLogueo = 1;
        secondsChrono.start();
    }
}

```

```
    //Serial.println("Logueo Habilitado");
}
// set the LED with the ledState of the variable:
// digitalWrite(LED_BUILTIN, habilitacionLogueo);
digitalWrite(LED_GREEN, habilitacionLogueo);
}

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//esta funcion lee el canal asociado a su variable de entradas

float leerADC(unsigned char canal)
{
    float tempVal, Corrientetemp;
    unsigned int adcPromedio;
    switch (canal)
    {
        case VOLTAGE_CANAL_1:
            adcPromedio = 0;
            for (unsigned char i = 0; i < 16; i++)
                adcPromedio += analogRead(VOLTAGE_CANAL_1);
            adcPromedio /= 16;
            // if( adcPromedio > 100)
            // tempVal =
            return float((adcPromedio * 10.0) / 100.0);
            break;
        case VOLTAGE_CANAL_2:
            adcPromedio = 0;
            for (unsigned char i = 0; i < 16; i++)
                adcPromedio += analogRead(VOLTAGE_CANAL_2);
```

```
    adcPromedio /= 16;
    return float((adcPromedio * 10.0) / 100.0);
    break;
case VOLTAGE_CANAL_3:
    adcPromedio = 0;
    for (unsigned char i = 0; i < 16; i++)
        adcPromedio += analogRead(VOLTAGE_CANAL_3);
    adcPromedio /= 16;
    return float((adcPromedio * 10.0) / 100.0);
    break;
case VOLTAGE_CANAL_4:
    adcPromedio = 0;
    for (unsigned char i = 0; i < 16; i++)
        adcPromedio += analogRead(VOLTAGE_CANAL_4);
    adcPromedio /= 16;
    return float((adcPromedio * 10.0) / 100.0);
    break;

case CORRIENTE_CANAL_1:
    adcPromedio = 0;
    for (unsigned char i = 0; i < 32; i++)
        adcPromedio += analogRead(CORRIENTE_CANAL_1);
    adcPromedio /= 32;
    // Serial.print("Adc Promedio = " );
    //Serial.println(adcPromedio);
    tempVal = (adcPromedio / 1023.0) * 5098;
    Corrientetemp = ((tempVal - 2557) / SENSITIVIDAD_ACS);
    if (Corrientetemp < 0.0)
        Corrientetemp = 0.00;
    return Corrientetemp;
```

```
break;
case CORRIENTE_CANAL_2:
    adcPromedio = 0;
    for (unsigned char i = 0; i < 32; i++)
        adcPromedio += analogRead(CORRIENTE_CANAL_2);
    adcPromedio /= 32;
    //tempVal = ( 5.01/1024)*adcPromedio;
    tempVal = (adcPromedio / 1023.0) * 5102;
    Corrientetemp = ((tempVal - 2549) / SENSITIVIDAD_ACS);
    if (Corrientetemp < 0.0)
        Corrientetemp = 0.00;
    return Corrientetemp;
    break;
case CORRIENTE_CANAL_3:
    adcPromedio = 0;
    for (unsigned char i = 0; i < 32; i++)
        adcPromedio += analogRead(CORRIENTE_CANAL_3);
    adcPromedio /= 32;
    // tempVal = ( 5.01/1024)*adcPromedio;
    tempVal = (adcPromedio / 1023.0) * 5102;
    Corrientetemp = ((tempVal - 2544) / SENSITIVIDAD_ACS);
    if (Corrientetemp < 0.0)
        Corrientetemp = 0.00;
    return Corrientetemp;
    break;
case CORRIENTE_CANAL_4:
    adcPromedio = 0;
    for (unsigned char i = 0; i < 32; i++)
        adcPromedio += analogRead(CORRIENTE_CANAL_4);
    adcPromedio /= 32;
```

```
// tempVal = ( 5.01/1024)*adcPromedio;
tempVal = (adcPromedio / 1023.0) * 5100;
Corrientetemp = ((tempVal - 2558) / SENSITIVIDAD_ACS);
if (Corrientetemp < 0.0)
    Corrientetemp = 0.00;
return Corrientetemp;
break;
}
return 0x0000;
}

void getAnalogData(void)
{
    VoltageCanal1 = leerADC(VOLTAGE_CANAL_1);
    VoltageCanal2 = leerADC(VOLTAGE_CANAL_2);
    VoltageCanal3 = leerADC(VOLTAGE_CANAL_3);
    VoltageCanal4 = leerADC(VOLTAGE_CANAL_4);

    CorrienteCanal1 = leerADC(CORRIENTE_CANAL_1);
    CorrienteCanal2 = leerADC(CORRIENTE_CANAL_2);
    CorrienteCanal3 = leerADC(CORRIENTE_CANAL_3);
    CorrienteCanal4 = leerADC(CORRIENTE_CANAL_4);
}

void setup()
{
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    Serial.begin(115200); // conexion serial para hacer debugging
```

```
Serial1.begin(GPSBaud);      // Conexion Serial para el Modulo GPS NEO-
6M

pinMode(10, OUTPUT);        // PIn usado para el CS del modulo Ethernet
Shield W5100
digitalWrite(10, HIGH);     // Deshabilitamos Ethernet Chip Select pin CS
Ethernet.begin(mac, ip);    // Inicializamos del modulo Ethernet
apache.begin((char *)"/server", 4); // Initialize MiniApache server: served path
and SD card pin

pinMode(LED_GREEN, OUTPUT);
digitalWrite(LED_GREEN, LOW);
pinMode(LED_RED, OUTPUT);
// digitalWrite(LED_RED, HIGH);
pinMode(LED_YELLOW, OUTPUT);
// digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH);

if (opcionIntervalo == 0)
{
    intervaloLogueo = HALFMINUTE;
    digitalWrite(LED_RED, LOW);
    digitalWrite(LED_YELLOW, LOW);
}
if (opcionIntervalo == 1)
{
    intervaloLogueo = MINUTE;
    digitalWrite(LED_RED, HIGH);
    digitalWrite(LED_YELLOW, LOW);
}
if (opcionIntervalo == 2)
```

```

{
    digitalWrite(LED_RED, LOW);
    digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH);
    intervaloLogueo = FIVEMINUTE;
}
if (opcionIntervalo == 3)
{
    intervaloLogueo = TENMINUTE;
    digitalWrite(LED_RED, HIGH);
    digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH);
}

//inicializaciones relacionadas a la libreria OneButton
SELECT_BUTTON.attachLongPressStart(habilitarLogueo);
SELECT_BUTTON.attachClick(seleccionarIntervalo);

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

//en la siguiente funcion de leemos el RTC interno, creamos el archivo CSV
con la fecha obtenida del RTC, colocamos las cabeceras en el archivo CSV de la
siguiente manera
// "Hora, Fecha, Canal 1 V, Canal 2 V, Canal 3 V, Canal 4 V, Canal 1 A, Canal 2
A, Canal 3 A, Canal 4 A, IR, UV, Latitud, longitud, MSNM" y cerramos el archivo.
//basicamente de la siguiente creara un archivo con la fecha mas reciente
obtenida del RTC.
CreatingFile();

```

```
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
```

```

if (!SensorUV.begin())
{
    Serial.println("Didn't find Si1145");

    digitalWrite(LED_RED, HIGH);
    digitalWrite(LED_GREEN, HIGH);
    digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH);
    while (1);
}
else
{
    Serial.println("UV Sensor OK!");
    digitalWrite(LED_RED, LOW);
    digitalWrite(LED_GREEN, LOW);
    digitalWrite(LED_YELLOW, LOW);
}

secondsChrono.stop();
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
}

void loop()
{
    //esta seccion chequeara si se ha presionado el boton SELECT
    SELECT_BUTTON.tick();
    apache.PendingRequest();// recibir peticiones http

```

```
apache.ProcessRequest();// procesa las peticiones

if ((millis() - lastIntervalTime) >= MEASURE_INTERVAL) //leemos todos los
valores analogos y el RTC listo para grabarlos en la SD Card
{
    //Is it time for a new measurement?

    // Serial.println("time for a new measurement");

    lastIntervalTime = millis();
    getAnalogData();
    IRdata = 0;
    for (unsigned char i = 0; i < 16; i++)
        IRdata += SensorUV.readIR();
    IRdata /= 16;

    UVdata = 0;
    UVdata = SensorUV.readUV();
    UVdata /= 100.0;

    gps.f_get_position(&flat, &flon, &fix_age);

    RTC.read(tm_rtc);
    dataString = "";
    dataString = String(tm_rtc.Hour, DEC); //String(housenumber);
    dataString += ':';
    dataString += String(tm_rtc.Minute, DEC);
    dataString += ':';
    dataString += String(tm_rtc.Second, DEC);

    dataString += ',';
```

```
dataString += String(tm_rtc.Day, DEC);  
// Store the number of pulses from the previous second  
dataString += '/';  
dataString += String(tm_rtc.Month, DEC); // Temperature 1  
dataString += '/';  
dataString += String(tmYearToCalendar(tm_rtc.Year) - 2000, DEC); //  
Temperature 2  
dataString += ';;'  
dataString += String(VoltageCanal1, 1); //  
dataString += ';;'  
dataString += String(VoltageCanal2, 1); //  
dataString += ';;'  
dataString += String(VoltageCanal3, 1); //  
dataString += ';;'  
dataString += String(VoltageCanal4, 1); //  
dataString += ';;'  
dataString += String(CorrienteCanal1, 2); //  
dataString += ';;'  
dataString += String(CorrienteCanal2, 2); // 3  
dataString += ';;'  
dataString += String(CorrienteCanal3, 2); //  
dataString += ';;'  
dataString += String(CorrienteCanal4, 2); //  
dataString += ';;'  
dataString += String(IRdata, DEC);  
dataString += ';;'  
dataString += String(UVdata, 2);  
dataString += ';;'  
dataString += String(flat, 4);  
dataString += ';;'
```

```
dataString += String(flon, 4);
dataString += ',';
dataString += String(gps.f_altitude(), 1);
// Serial.println(dataString);
// if (firstTimeConfig && !DS1307UpdateFlag)
// {
//   Serial.println("Primer Config flag");
//   DS1307UpdateFlag = 1;
//   firstTimeConfig = 0;
// }
}

if(tm_rtc.Hour == horaAstronomica && tm_rtc.Minute == minutoAstronomico){

    if(VoltageCanal1 < UP_VOLTAGE_THRESHOLD){
        if(IRdata < ALARM_IR_THRESHOLD ){
            estadoPanel = 1;
        }
        else{
            estadoPanel = 2;
        }
    }
}

if(VoltageCanal2 < ALARM_VBAT_THRESHOLD){
    estadoBateria = 1;
}
```

```
}else{
    estadoBateria = 0;
}

if (secondsChrono.hasPassed(intervaloLogueo))
{
    secondsChrono.restart();

    if (habilitacionLogueo)
    {
        digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
        RTC.read(tm_rtc);
        sprintf(dateNameBuffer, "%02d-%02d-%02d.CSV", tm_rtc.Day,
tm_rtc.Month, tmYearToCalendar(tm_rtc.Year) - 2000);
        filename = "server/data/" + String(dateNameBuffer);
        if (!SD.exists(filename))
        {
            LogFile = SD.open(filename, FILE_WRITE); // Open the correct file
            // if the file is available, write to it:
            if (LogFile)
            {
                LogFile.println("Hora,Fecha,Canal 1 V,Canal 2 V,Canal 3 V,Canal 4
V,Canal 1 A,Canal 2 A,Canal 3 A,Canal 4 A,IR,UV,Latitud,longitud,MSNM");
                LogFile.close();
                //Serial.println("headers escritos");
            }
            // if the file isn't open, pop up an error:
```

```
else
{
    //Serial.println("error");
}
LogFile = SD.open(filename, FILE_WRITE); // Open the correct file
LogFile.println(dataString);
LogFile.close();
}
else
{
    //Serial.println("File Exist already");
    LogFile = SD.open(filename, FILE_WRITE); // Open the correct file
    LogFile.println(dataString);
    LogFile.close();
}
//Serial.println("info grabada");
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
}
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//actualiza hora de gps al rtc
if ((millis() - lastIntervalRTC) >= RTC_INTERVAL_UPDATE) //leemos todos
los valores analogos y el RTC listo para grabarlos en la SD Card
{
    //Is it time for a new measurement?
    // Serial.println("time for a new measurement");
    lastIntervalRTC = millis();
}
```

```
gps.crack_datetime(&Year, &Month, &Day, &Hour, &Minute, &Second,  
NULL, &age);  
//Serial.println(age);  
if (age < 600)  
{  
    // set the Time to the latest GPS reading  
    setTime(Hour, Minute, Second, Day, Month, Year);  
    adjustTime(UTC_offset * SECS_PER_HOUR);  
    RTC.set(now());  
  
    // gps.f_get_position(&flat, &flon, &fix_age);  
    // Serial.println(flat);  
    // Serial.println(flou);  
    Dusk2Dawn Aqp(flat, flon, UTC_offset);  
  
    AqpAmanece = Aqp.sunrise(int(Year), int(Month), int(Day), false);  
    // Serial.println(Year);  
    // Serial.println(Month);  
    // Serial.println(Day);  
    // Dusk2Dawn::min2str(HoraAmaneceBuffer, AqpAmanece);  
  
    //Serial.print("hora que amanece en AQP:");  
    // Serial.println(HoraAmaneceBuffer); // 06:58  
    AqpAnochece = Aqp.sunset(int(Year), int(Month), int(Day), false);  
    // Dusk2Dawn::min2str(HoraAnocheceBuffer, AqpAnochece);  
  
    //Serial.println("RTC updated!!!! with GPS Data");  
    medioDia = AqpAmanece + (AqpAnochece - AqpAmanece) / 2;  
    horaAstronomica = medioDia / 60;
```

```

        minutoAstronomico = medioDia % 60;
    }
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

if (DS1307UpdateFlag == 1)
{
    gps.crack_datetime(&Year, &Month, &Day, &Hour, &Minute, &Second,
NULL, &age);
    Serial.println(age);
    if (age < 600)
    {
        // set the Time to the latest GPS reading
        setTime(Hour, Minute, Second, Day, Month, Year);
        adjustTime(UTC_offset * SECS_PER_HOUR);
        RTC.set(now());

        // gps.f_get_position(&flat, &flon, &fix_age);
        // Serial.println(flat);
        // Serial.println(flon);
        Dusk2Dawn Aqp(flat, flon, UTC_offset);

        AqpAmanece = Aqp.sunrise(int(Year), int(Month), int(Day), false);
        // Serial.println(Year);
        // Serial.println(Month);
        // Serial.println(Day);
    }
}

```

```
// Dusk2Dawn::min2str(HoraAmaneceBuffer, AqpAmanece);

Serial.print("hora que amanece en AQP:");
Serial.println(HoraAmaneceBuffer); // 06:58
AqpAnochece = Aqp.sunset(int(Year), int(Month), int(Day), false);
// Dusk2Dawn::min2str(HoraAnocheceBuffer, AqpAnochece);
Serial.print("hora que anochece en AQP");
Serial.println(HoraAnocheceBuffer); // 16:53
medioDia = AqpAmanece + (AqpAnochece - AqpAmanece) / 2;

horaAstronomica = medioDia / 60;
minutoAstronomico = medioDia % 60;

Dusk2Dawn::min2str(MedioDiaBuffer, medioDia);
Serial.println(MedioDiaBuffer); // 11:56
DS1307UpdateFlag = 0;
// Serial.println(updateTimes);

// Serial.println("RTC updated!!!! with GPS Data");
}
}

smartDelay(0);
}
```