

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas  
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR  
FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO  
DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA  
DEL NORTE.**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la  
obtención del título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

Autor:

Edison Patricio Cruceira Fueltan

Directora:

MSc. Eliana Carolina Ormeño Mejía

Ibarra – Ecuador

2019



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

##### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	040179835-0		
APELLIDOS Y NOMBRES:	CRUCERIRA FUELTAN EDISON PATRICIO		
DIRECCIÓN:	ANTONIO JOSÉ DE SUCRE Y EUSEBIO BORRERO 5-11		
EMAIL:	<a href="mailto:epcruceoraf@utn.edu.ec">epcruceoraf@utn.edu.ec</a>		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0993988937

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.
AUTOR:	CRUCERIRA FUELTAN EDISON PATRICIO
FECHA: AAAAMMDD	2020-01-02
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSTGRADO

TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO
ASESOR/DIRECTOR:	MSC. ELIANA CAROLINA ORMEÑO MEJÍA

## 2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 2 días del mes de Enero de 2020

EL AUTOR:

(Firma): .....  
Nombre: Crucerira Fweltan Edison Patricio  
C.C.: 040179835-0



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Yo, Edison Patricio Cruceira Fueltan, con cédula de identidad No. 040179835-0, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de propiedad intelectual del Ecuador, artículo 4, 5 y 6 en calidad de autor del trabajo de grado denominado: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE”**. Que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes mencionada, aclarando que el trabajo aquí descrito es de mi autoría y que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

.....  
Firma

Nombre: Edison Patricio Cruceira Fueltan

Cédula: 040179835-0

Ibarra, diciembre del 2019



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### DECLARACIÓN

Yo, Crucerira Fweltan Edison Patricio, con cédula de identidad No. 040179835-0, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de autoría; y que este no ha sido previamente presentado en ningún grado o calificación profesional.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte, según lo establecido por las Leyes de la Propiedad Intelectual, Reglamentos y Normativa vigente de la Universidad Técnica del Norte.

.....  


Cruceira Fweltan Edison Patricio

C.I.: 040179835-0



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

MSc. Eliana Ormeño

### CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante; Cruceira Fultan Edison Patricio certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE”**. Para la obtención de título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

MSc. Eliana Ormeño

**DIRECTORA DE TESIS**

## Dedicatoria

*“Para ser exitoso debes exigirte más y trabajar más duro, 80, 100 horas a la semana; sólo así lograrás tus metas”.*

**Elon Musk.**

*Dedico este trabajo a Dios, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, por permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.*

*A mis padres José Genaro Cruceira y Carmen Esther Fultan, que me apoyaron en todo momento y estuvieron conmigo a cada instante de este proceso de formación, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño.*

*A mis hermanos Mauricio, Carolina y Jimmy, por ser mi apoyo diario para lograr este sueño.*

*A todos mis docentes que supieron impartirme sus enseñanzas, que fueron pilar fundamental para lograr esta meta.*

*A mis amigos, pero sobre todo a Alicia, por confiar y creer en mí, por su motivación constante a seguir adelante en los momentos de desesperación.*

## **Agradecimientos**

*Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de este camino, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.*

*A mis padres por estar a mi lado y brindarme su amor incondicional y ser mi sustento económico en estos años tan exigentes de mi vida, por haberme dado la oportunidad de tener una buena educación en mi vida, pero sobre todo por ser un excelente ejemplo por seguir.*

*A mis hermanos por estar en mi vida y brindarme todos esos momentos inolvidables que me han dado la fuerza para luchar por un mejor futuro, por darme el regalo más bello que llenan mi vida de alegría y amor, mis sobrinos.*

*A mi tutora MSc. Eliana Ormeño por la paciencia, el apoyo brindado y por todas sus enseñanzas para poder culminar este proyecto.*

*A la Universidad Técnica del Norte, a la carrera de Ingeniería en Electricidad, a los docentes que de manera desinteresada aportaron para que durante este periodo de estudio se cristalice mi formación académica.*

*Y finalmente a mis amigos, por ser parte en apoyo de muchas maneras para haber culminado esta carrera.*

## Tabla de contenidos

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	ii
CONSTANCIAS .....	iii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE .....	iv
DECLARACIÓN .....	v
ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR .....	vi
Dedicatoria.....	vii
Agradecimientos .....	viii
Tabla de contenidos.....	ix
Índice de figuras.....	xiii
Índice de cuadros.....	xv
Resumen .....	xvi
Abstract.....	xvii
Introducción .....	xviii
A.1. Contextualización .....	xviii
A.2. Planteamiento del problema .....	xix
A.3. Formulación del problema .....	xx
A.4. Justificación del trabajo.....	xx
A.5. Alcance del trabajo .....	xxi
A.6. Viabilidad del trabajo .....	xxi
A.7. Objetivo general.....	xxii
A.8. Objetivos específicos .....	xxii
CAPÍTULO I .....	1
Generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica .....	1
1.1. Energía.....	1
1.1.1. Energías Renovables.....	1
1.2. Energía Solar.....	2

1.2.1.	Radiación solar .....	3
1.3.	Energía Solar Fotovoltaica .....	4
1.3.1.	Funcionamiento energía solar fotovoltaica .....	4
1.4.	Análisis de la generación solar fotovoltaica .....	5
1.5.	Sistema Solar Fotovoltaico .....	6
1.5.1.	Paneles Solares Fotovoltaicos .....	7
1.5.2.	Regulador de carga solar .....	12
1.5.3.	Baterías .....	14
1.5.4.	Inversores con conexión a la red .....	17
1.5.5.	Contadores de doble sentido .....	20
1.6.	Clasificación de las instalaciones fotovoltaicas .....	20
1.6.1.	Instalaciones aisladas de la red .....	21
1.6.2.	Instalaciones con conexión a la red .....	21
1.6.3.	Instalaciones híbridas .....	22
1.7.	Sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica .....	23
1.7.1.	Método de sincronización con la red .....	24
1.8.	Análisis del sistema solar fotovoltaico y su integración a la red eléctrica .....	25
CAPÍTULO 2	.....	27
Diseño de un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica	...	27
2.1.	Introducción .....	27
2.2.	Análisis del objetivo .....	27
2.3.	Ubicación física .....	27
2.3.1.	Disposición y medidas de la azotea disponible .....	28
2.3.2.	Zona geográfica de la instalación .....	29
2.4.	Diagrama de flujo .....	29
2.5.	Desarrollo del proyecto .....	30
2.5.1.	Estimación de recurso solar existente en el campus principal de la Universidad Técnica del Norte .....	31
2.5.2.	Cálculos y dimensionamiento de la instalación fotovoltaica .....	35

2.5.3. Diseño del sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica	47
CAPÍTULO 3.....	48
Implementación de un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica .....	48
2.1. Puesta en marcha del sistema de generación solar fotovoltaica .....	48
2.1.1. Recepción e inspección de los equipos .....	48
2.1.2. Construcción de la estructura y montaje de los paneles solares .....	49
2.1.3. Conexión de los paneles solares .....	50
2.1.4. Colocación de canaletas en el tablero de control .....	51
2.1.5. Instalación las protecciones de DC (Interruptor termomagnético de 1x32 A). 51	
2.1.6. Instalación del regulador de carga solar.....	52
2.1.7. Instalación y conexión de batería de 12V DC.....	52
2.1.8. Instalación de las Barras DC.....	53
2.1.9. Instalación y conexión del inversor .....	53
2.1.10. Instalación de tomacorrientes .....	54
2.1.11. Instalar las protecciones de AC (Interruptor termomagnético de 3x10 A).....	55
2.1.12. Montaje del tablero de generación .....	55
2.1.13. Conexión de generación fotovoltaica con la red eléctrica de distribución .....	56
2.2. Presupuesto.....	56
2.3. Pruebas de funcionamiento del sistema fotovoltaico.....	57
2.3.1. Módulo Fotovoltaico.....	57
2.3.2. Regulador de carga solar.....	58
2.3.3. Batería .....	58
2.3.4. Inversor con conexión a red.....	59
2.4. Resultados.....	60
2.4.1. Gráficas de los datos registrados por el regulador de carga .....	61
2.4.2. Potencia generada.....	65
2.4.3. Requerimientos técnicos para la conexión con el sistema de distribución.....	66
Conclusiones .....	70

Recomendaciones .....	71
Referencias.....	72
Anexos.....	77
Anexo A. Equipos utilizados en la medición de radiación solar.....	77
Anexo A1. Piranómetro RK200-03 .....	77
Anexo A2. Piranómetro S-LIB-M003 .....	78
Anexo A3. Data Logger RK600-02/02B.....	79
Anexo A4. HOBO Micro Station .....	80
Anexo B. Cálculos de caída de tensión y porcentaje de caída de tensión .....	81
Anexo B1. Caída de tensión.....	81
Anexo B2. Porcentaje de caída de tensión.....	82
Anexo C. Equipos seleccionados en la implementación del sistema fotovoltaico .....	83
Anexo C1. Selección de los paneles fotovoltaicos .....	83
Anexo C2. Selección del regulador de carga solar.....	84
Anexo C3. Selección de la batería .....	85
Anexo C4. Selección de los inversores con conexión a red .....	86
Anexo D. Diagrama multifilar del sistema fotovoltaico .....	87
Anexo E. Demanda energética del edificio CIELE .....	88
Anexo E1. Energía Consumida en CIELE .....	88
Anexo E2. Potencia activa consumida en CIELE .....	90
Anexo F. Prácticas de Laboratorio.....	91

## Índice de figuras

Figura 1. Efecto fotovoltaico sobre paneles solares. ....	5
Figura 2. Componentes de un sistema solar fotovoltaico. ....	6
Figura 3. Panel de silicio puro Monocristalino. ....	7
Figura 4. Panel solar de silicio puro policristalino. ....	8
Figura 5. Módulo solar amorfo. ....	8
Figura 6. Característica corriente-tensión de un módulo fotovoltaico. ....	9
Figura 7. Partes de un módulo fotovoltaico. ....	11
Figura 8. Regulador de carga del sistema. ....	12
Figura 9. Regulador tipo paralelo. ....	13
Figura 10. Regulador tipo serie. ....	14
Figura 11. Batería de ciclo profundo. ....	15
Figura 12. Inversor Paneles Solares. ....	17
Figura 13. Diferentes configuraciones de los inversores fotovoltaicos: Inversor central (a), Inversor cadena (b), Inversor multi-cadena (c) e Inversor módulo (d). ....	19
Figura 14. Medidor Bidireccional Itrón Sentinel. ....	20
Figura 15. Diagrama de bloques de una instalación aislada. ....	21
Figura 16. Esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica. ....	22
Figura 17. Diagrama de una instalación aislada híbrida. ....	23
Figura 18. Esquema general del detector de cruce por cero. ....	24
Figura 19. Técnica de sincronización PLL. ....	25
Figura 20. Ubicación del sistema de generación solar fotovoltaico. ....	28
Figura 21. Área disponible para la instalación del Sistema Fotovoltaico. ....	28
Figura 22. Proceso general del sistema fotovoltaico. ....	30
Figura 23. Series de tiempo irradiancia solar sensor RK200-03 desde abril a julio del 2019. ....	32
Figura 24. Series de tiempo irradiancia solar sensor HOBO desde febrero a julio del 2019. ....	33
Figura 25. Radiación solar diaria desde febrero hasta julio del 2019. ....	34
Figura 26. Histograma de la radiación solar diaria media desde febrero hasta julio del 2019. ....	35
Figura 27. Estructura soporte. ....	37
Figura 28. Diseño de posición de equipos. ....	48
Figura 29. Recepción e inspección de los equipos. ....	49
Figura 30. Construcción de la estructura y montaje de los paneles solares. ....	50
Figura 31. Conexión eléctrica de los paneles solares. ....	50

Figura 32. Posición de las canaletas.....	51
Figura 33. Interruptor Térmico-magnético de 32A.....	51
Figura 34. Instalación del regulador de carga solar.....	52
Figura 35. Instalación de la batería solar con el regulador de carga.....	53
Figura 36. Instalación y pintado de Barras DC.....	53
Figura 37. Instalación de los inversores.....	54
Figura 38. Instalación de tomacorrientes.....	54
Figura 39. Interruptor Térmico-magnético de 10A.....	55
Figura 40. Montaje del tablero e instalación de los equipos.....	55
Figura 41. Conexión de generación eléctrica con la red de distribución.....	56
Figura 42. Mediciones de voltaje en circuito abierto.....	57
Figura 43. Revisión de funcionamiento en paneles y batería.....	58
Figura 44. Prueba de voltaje en batería.....	59
Figura 45. Prueba de funcionamiento del inversor.....	59
Figura 46. Porcentaje de carga de la batería.....	61
Figura 47. Voltaje de la batería (Vcc).....	62
Figura 48. Corriente de recarga de la batería (DC).....	62
Figura 49. Voltaje de generación de los paneles.....	63
Figura 50. Corriente generada por los paneles.....	64
Figura 51. Corriente de consumo.....	64
Figura 52. Potencia generada por los paneles.....	66

## Índice de cuadros

Tabla 1. 1. Tipo de energías renovables y su descripción.....	1
Tabla 1. 2. Tipos de energías solares y su descripción.....	2
Tabla 1. 3. Tipos de radiación y su descripción.....	4
Tabla 1. 4. Eficiencia de diferentes celdas fotovoltaicas.....	9
Tabla 1. 5. Parámetros de la característica I-V y su descripción. ....	10
Tabla 1. 6. Factores que inciden sobre los paneles solares. ....	11
Tabla 1. 7. Parámetros de las baterías y su descripción. ....	16
Tabla 1. 8. Partes fundamentales de un inversor y su descripción.....	17
Tabla 2.1. Datos geográficos de la ciudad de Ibarra. ....	29
Tabla 2. 2. Equipos utilizados para medir la radiación solar existente en Ibarra.....	31
Tabla 2. 3. Estimadores estadísticos para el conjunto total de datos y mensuales.....	34
Tabla 2. 4. Caídas de tensión en conductores. ....	43
Tabla 2. 5. Coeficientes de pérdidas del sistema. ....	45
Tabla 2. 6. Equipos empleados en la implementación del sistema fotovoltaico.....	46
Tabla 3. 1. Presupuesto de equipos eléctricos. ....	56
Tabla 3. 2. Datos obtenidos por el regulador de carga. ....	60
Tabla 3. 3. Potencia generada por el sistema fotovoltaico. ....	65
Tabla 3. 4. Valores de voltaje de la red de distribución y el sistema de generación. ....	66
Tabla 3. 5. Voltaje del sistema integrado a la red eléctrica.....	67
Tabla 3. 6. Frecuencia de operación en sincronismo con la red eléctrica.....	68

## Resumen

En el presente proyecto se realiza el diseño e implementación de un sistema fotovoltaico integrado a la red eléctrica. En la etapa inicial del estudio se determina el potencial de radiación solar existente en el Campus de la Universidad Técnica del Norte que está en un rango entre  $4,48 - 6,71 \text{ kWh/m}^2$ , luego se analiza el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos con conexión a red, los componentes y recomendaciones que se deben seguir para el dimensionamiento y la selección de los equipos a instalar.

El sistema de generación fotovoltaica tiene la capacidad de producir hasta una potencia de 520 W, a 220 VAC, el cual puede satisfacer hasta un 15% aproximadamente de la demanda del edificio de la carrera de Ingeniería en Electricidad. El proyecto se encuentra conformado por equipos tanto de generación eléctrica como de integración a la red; así mismo de componentes adicionales que brindarán protección y seguridad a los dispositivos del sistema.

Para el desarrollo del proyecto se realizaron tres capítulos. En el Capítulo 1, se hace un estudio general de la energía solar fotovoltaica, destacando principalmente, la descripción del fenómeno de generación solar e integración a la red eléctrica. En el Capítulo 2, se realiza los cálculos necesarios para dimensionar el sistema y se describen cada uno de los componentes, que en conjunto forman un sistema fotovoltaico. En el Capítulo 3, se implementa el diseño del sistema fotovoltaico con integración a la red, además se realiza las pruebas de funcionamiento de los equipos y por último se describe los resultados obtenidos en el trabajo propuesto.

**Palabras claves:** sistema fotovoltaico, radiación solar, generación fotovoltaica, energía solar, dimensionamiento, conexión a red.

## Abstract

This project involves the design and implementation of a photovoltaic system integrated into the electricity grid. In the initial stage of the study, the solar radiation potential existing in the Campus of the Universidad Técnica del Norte is determined, which is in a range between  $4,48 - 6,71 \text{ kWh/m}^2$ , then the operation of photovoltaic systems with connection to the grid is analyzed, as well as the components and recommendations to be followed for the sizing and selection of the equipment to be installed.

The photovoltaic generation system has the capacity to produce a power up to of 520 W, at 220 VAC, which can satisfy up to approximately 15% of the demand for the building of the Electrical Engineering degree. The project is made up of teams of power generation and grid integration; also of additional components that will provide protection and security to the system devices.

For the development of the project, three chapters were carried out. In Chapter 1, a general study of photovoltaic solar energy is made, mainly highlighting the description of the phenomenon of solar generation and grid integration. In Chapter 2, the necessary calculations are made to dimension the system and each of the components, which together form a photovoltaic system, is described. In Chapter 3, the design of the photovoltaic system with integration to the grid is implemented, in addition the operation tests of the equipment are carried out and finally the results obtained in the proposed work are described.

**Keywords:** photovoltaic system, solar radiation, photovoltaic generation, solar energy, sizing, grid connection.

## Introducción

### A.1. Contextualización

La electricidad es una de las principales formas de energía que se consumen en el mundo y constituye parte integral de la vida de los seres humanos, de hecho, la principal fuente de generación eléctrica en Ecuador es hidráulica y la primera planta que se fundó en Guayaquil era de alumbrado eléctrico. La producción solar fotovoltaica es una fuente renovable secundaria que a futuro aportará de gran manera al Sistema Nacional Interconectado.

En 1839, el físico francés Edmund Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, es decir, la transformación de luz en energía eléctrica, cuando experimentaba con dos electrodos metálicos en una solución conductora y constato un aumento de la generación eléctrica producida al exponerla a la luz del sol (Velásquez, 2013).

Ecuador se encuentra en una ubicación privilegiada en cuanto a radiación solar, además, la generación fotovoltaica en una manera limpia de producir electricidad, ya que por ser una fuente renovable no contamina al medio ambiente con producción de gases de efecto invernadero (Gómez, 2017) afirma:

La sociedad moderna se está viendo enfrentada a una serie de fenómenos naturales de alto impacto que los expertos no dudan en atribuir a los efectos del cambio climático en el mundo, para esto se ha propuesto de manera general la utilización de recursos renovables para la producción de energía eléctrica y su uso local o transmisión a los sitios donde sea requerida (pág. 87).

A la energía solar se la emplea para generar electricidad, a través del uso de paneles solares fotovoltaicos. Los paneles solares se los puede conseguir fácilmente en el mercado y a precios asequibles. Además, la energía fotovoltaica es abundante en Ecuador, ya que se encuentra en la línea ecuatorial, siendo casi perpendicular la radiación. (Bayegan, 2001) refiere lo siguiente, Los sistemas solares fotovoltaicos tienen cada vez más acogida en su implementación para la generación distribuida, ya que además de usar una fuente primaria de energía inagotable, posee gran facilidad de instalación y requiere un mantenimiento mínimo. Otra característica de esta tecnología es la facilidad con la que se puede integrar a la red eléctrica, por lo que los lugares en los que se adopte pueden llegar a convertirse en sitios energéticamente autónomos que entregan electricidad a la red en lugar de realizar un consumo de esta.

Para conectar el sistema de generación solar fotovoltaica a la red eléctrica, los equipos que se necesitan son los siguientes: un regulador, un inversor, un medidor, cableado y paneles solares. En estos sistemas, el único equipo adicional que se requiere es una unidad que tiene componentes electrónicos que permiten acoplar los paneles solares a la red convencional y no es necesario la utilización de baterías (Cornejo, 2013) afirma:

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica (SFCR) constituyen una de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica que más atención están recibiendo en los últimos años, dado su elevado potencial de utilización en zonas urbanizadas próximas a la red eléctrica. Estos sistemas están compuestos por un generador fotovoltaico que se encuentra conectado a la red eléctrica convencional a través de un inversor, produciéndose un intercambio energético entre ésta y el sistema fotovoltaico, característico de este tipo de instalaciones. Así, el sistema inyecta energía en la red cuando su producción supera al consumo local, y extrae energía de ella en caso contrario (pág. 9).

En el siglo XX las redes locales crecieron con el tiempo, y finalmente se interconectan por razones económicas y de fiabilidad. En el siglo XXI, algunos países en desarrollo como China, India y Brasil fueron vistos como pioneros de la implantación de redes inteligentes (José de Castro, Brandão, Rosental, & Dorado, 2015) afirman:

Durante mucho tiempo, la integración eléctrica ha sido un tema bastante discutido e incentivado a nivel mundial ya que proporciona ventajas considerables para los países involucrados, tales como: el uso más eficiente de los recursos naturales para la producción de electricidad, la reducción de los precios de la energía eléctrica en el mercado mayorista y, sobre todo de su volatilidad, los incentivos a la eficiencia energética a través del aumento de la competencia y el incremento de la confiabilidad y seguridad en la prestación del servicio (pág. 3).

## **A.2. Planteamiento del problema**

En la actualidad, el mundo se encuentra en un periodo de crisis energética, ya que la producción mundial de combustibles fósiles tales como petróleo, carbón y gas natural se encuentran en decadencia, al haber alcanzado actualmente el límite de producción. Mientras tanto, la demanda de energía mundial no deja de aumentar. La energía solar es una gran alternativa teniendo en consideración que es una fuente gratuita e inagotable, limpia y amigable con el medio ambiente dado que no genera emisiones nocivas ni gases contaminantes.

En los últimos años, la evolución de la industria ecuatoriana a causa del cambio de la matriz energética, ha obligado a los estudiantes a relacionarse de manera temprana con tecnologías encaminadas a la generación de electricidad mediante sistemas solares fotovoltaicos, ya que, la producción de módulos fotovoltaicos ha incrementado considerablemente y el precio de estos ha disminuido, por lo cual se está recurriendo a esta tecnología, sumado a que Ecuador tiene un buen potencial energético solar, además esto permitirá habituarse con el uso de equipos electrónicos de potencia, integración y mantenimiento de dispositivos industriales conectados a la red eléctrica, lo que conllevará a que tengan una mejor competitividad en el ámbito laboral.

La carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica del Norte actualmente cuenta con varios laboratorios para que sus estudiantes realicen prácticas, fortaleciendo sus conocimientos teóricos. Pero no cuenta con este tipo de sistema, es por esta razón que se implementa un sistema de integración a la red eléctrica y una infraestructura de generación eléctrica mediante paneles solares, que sirvan como motivación para que los jóvenes continúen con la investigación de energías renovables.

Para un ingeniero en mantenimiento eléctrico es importante fortalecer sus conocimientos con respecto a sistemas de conexión a la red eléctrica y generación solar fotovoltaica, asimismo del mantenimiento de sus equipos. Esto se procura mediante la construcción de una infraestructura enlazada a la red de baja tensión, el cual permite a los estudiantes familiarizarse con procesos de generación solar e integración a la red convencional, como parte integral la cual facilitara la rápida adaptación al ámbito laboral.

### **A.3. Formulación del problema**

¿Cómo implementar un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica en el edificio de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica del Norte?

### **A.4. Justificación del trabajo**

Este proyecto, se centra en el diseño de instalaciones de generación solar fotovoltaica para autoconsumo en baja tensión en el edificio de electricidad y su implementación para integrarse a la red eléctrica.

A raíz del cambio climático, la energía solar con sistemas de interconexión a la red eléctrica ha sido una opción viable y eficiente para generar energía libre de efectos adversos para el

medio ambiente, mitigando así la progresiva contaminación que perjudica en la actualidad al planeta en general. Si se empieza a tomar en cuenta y de forma seria el aprovechamiento de los recursos naturales, se podría llegar a prolongar la existencia de nuestro planeta como hoy lo conocemos.

Por estas razones, la realización de este proyecto es de gran beneficio tanto para el medio ambiente como para los alumnos de la carrera de Ingeniería Eléctrica para que puedan reforzar sus conocimientos. Para el proyecto se dispone de un sistema de generación solar fotovoltaica que se integrará a la red eléctrica por medio de dispositivos electrónicos.

La Carrera de Ingeniería Eléctrica se beneficiará con el proyecto, con el fin de incentivar a los estudiantes a la investigación y la implementación de un sistema integrado a la red eléctrica. Al implementar dicho sistema, se tiene como objetivo aportar a la realización de prácticas, las cuales son de utilidad para el aprendizaje diario de los estudiantes.

#### **A.5. Alcance del trabajo**

Dotar a la carrera de Ingeniería Eléctrica con una infraestructura para la generación de energía eléctrica mediante paneles solares e implementar un sistema de integración a la red convencional, este proyecto es parte de un sistema de micro generación eólica que se implementará en el edificio de electricidad.

Metodológicamente, la implementación del sistema solar fotovoltaico con integración a la red se enmarca como investigativo y experimental. Además, se pretende hacer conciencia al ciudadano ecuatoriano en la utilización de energías renovables, proponiendo este sistema como una inversión económica, con recuperación a corto plazo.

#### **A.6. Viabilidad del trabajo**

El proyecto reúne características, condiciones técnicas y operativas que aseguran el cumplimiento de sus metas y objetivos. En base al proceso de generación de electricidad mediante un sistema solar fotovoltaico e integración a la red eléctrica, se puede concluir que la producción e interconexión de la infraestructura es técnicamente viable, ya que se tienen los conocimientos técnicos adquiridos durante todo el periodo académico, además, los equipos que se utilizará existen en el mercado local y finalmente se cuenta con la ayuda del tutor que tiene gran experiencia en el tema planteado.

Dada la naturaleza de este proyecto, y en vista que no se cuenta con apoyo privado para la generación e integración a la red del sistema de solar fotovoltaico, se ha hecho un análisis

del presupuesto, la cual implica la adquisición de los materiales eléctricos y electrónicos, y se determina que es factible su instalación con recursos propios, desde el punto de vista económico, aunque los costos iniciales de instalación de un sistema de energía solar pueden ser altos comparados con otras alternativas.

### **A.7. Objetivo general**

Implementar un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica en el edificio de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica del Norte.

### **A.8. Objetivos específicos**

1. Analizar el estado del arte de las diferentes tecnologías para la generación solar fotovoltaica y sistemas de interconexión a la red eléctrica.
2. Estimar el recurso solar existente en el Campus Principal de la Universidad Técnica del Norte.
3. Diseñar el sistema de generación solar fotovoltaica y el sistema de interconexión a la red eléctrica de una infraestructura híbrida solar-eólica.
4. Implementar el sistema de generación solar fotovoltaica y el sistema de interconexión con la red eléctrica de una infraestructura híbrida solar-eólica.

# CAPÍTULO I

## Generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica

### 1.1. Energía

La energía está relacionada con la capacidad que tiene la materia de generar o realizar un trabajo en forma de movimiento, luz, etc., se puede decir que es el motor que tienen los cuerpos para realizar una acción. La existencia de materias primas no quiere decir que todas se utilicen para producir energía, ya que, se deben tomar en cuenta ciertos aspectos tales como el económico, es decir, costos de extracción y producción que son los que determinan si es factible o no producir energía eléctrica (Fajardo, 2016).

#### 1.1.1. Energías Renovables

La energía renovable es la que se utiliza repetidamente sin que se agote o acabe en cualquier momento, es decir, tiene doble cualidad, es inagotable y abundante. La característica principal de las energías renovables es que es amigable con el medio ambiente y también es relativamente menos costosa comparándola con el resto de las energías (Torres & López, 2014).

En Ecuador, la utilización de este tipo de energías ha sido casi nulo y estamos desaprovechando una gran fuente de energía. En nuestro país, existen diversos tipos de climas como: cálido, cálido húmedo y tropical, que benefician a la generación de energía eléctrica, pero en especial se debe a la ubicación geográfica del país, ya que se encuentra en la línea ecuatorial (Lora & Ortega, 2012).

Existen diversos tipos de energías renovables, las cuales se mencionan en la TABLA 1. 1, en el actual trabajo se analizará a mayor profundidad la energía solar fotovoltaica.

TABLA 1. 1. TIPO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y SU DESCRIPCIÓN.

ENERGÍA	DESCRIPCIÓN
Solar	La energía del Sol induce el movimiento del viento y agua, y el florecimiento de las plantas, es por esta razón que la energía solar es la fuente de la mayoría de las energías renovables.
Eólica	Es la energía que aprovecha el viento para generar electricidad. La energía eólica es un tipo de energía renovable que se produce por la fuerza del viento mediante aerogeneradores.

Mareomotriz	Es la energía que aprovecha las mareas. Existen varios tipos de sistemas que permiten generar energía, aprovechando los beneficios del mar y sus olas.
Hidráulica	Es aquella que aprovecha la energía cinética y potencial de corrientes de agua, saltos, ríos, etc. El agua mueve una turbina cuyo movimiento de rotación es transferido mediante un eje a un generador de electricidad.
Biomasa	Es la energía que aprovecha la materia orgánica para generar electricidad y/o calor. De la biomasa se obtienen combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.
Geotérmica	Es la energía que aprovecha el calor del interior de la Tierra para generar calor y/o electricidad. El interior de la Tierra está caliente y la temperatura aumenta con la profundidad.

Fuente: (García, 2017).

## 1.2. Energía Solar

El sol es un gigantesco reactor nuclear en el que la masa se convierte en energía continuamente; de esta solo una parte llega a la tierra, casi el 30% de la energía solar que alcanza el borde exterior de la atmósfera se consume en el ciclo del agua, que produce lluvia, y la energía potencial de las corrientes de montaña y de los ríos (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014).

Según Nuñez (2013), “el potencial solar en Ecuador es uno de los más altos de Sudamérica. La inclinación del sol es perpendicular durante casi todo el año, situación que no ocurre en otros países del planeta. En la región Interandina Ecuatoriana, la radiación media es del orden de los  $1.600 kWh/m^2$  al año”. Los tipos de energía solar más importantes y sus respectivas técnicas para aprovecharlas se mencionan en la TABLA 1. 2.

TABLA 1. 2. TIPOS DE ENERGÍAS SOLARES Y SU DESCRIPCIÓN.

ENERGÍA	DESCRIPCIÓN
Solar fotovoltaica	La energía solar fotovoltaica genera corriente continua por medio de materiales semiconductores. Suelen tener una vida útil cercana a los 25 años.
Solar térmica	Se trata del aprovechamiento de la energía de los rayos del sol para producir calor y energía destinada al consumo sanitario a pequeña escala.

Solar activa	Se la utiliza para calefacción o como calentador de agua. Este tipo de energía emplea sistemas como ventiladores o bombas de agua para almacenar esta energía.
Solar pasiva	Aprovecha el calor del Sol sin necesidad de sistemas mecánicos. Es el conjunto de infraestructuras encaminada a obtener la energía directamente del sol, sin transformar.
Solar termoeléctrica	La energía solar termoeléctrica se basa en el calentamiento de líquidos por efecto del sol. Estos líquidos se utilizarán para producir electricidad.

Fuente: (Erenovable, 2015).

### 1.2.1. Radiación solar

La energía del Sol llega a la Tierra en forma de radiación solar con una longitud de onda entre 300 y 2.500nm. La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. Básicamente, el Sol se comporta como un enorme cuerpo negro, el cual emite energía de acuerdo con la Ley de Planck que tiene una temperatura de 5727°Celsius (Martínez, 2016). Es importante diferenciar entre los siguientes términos:

- **Irradiancia solar**

“Es la potencia instantánea recibida en  $W/m^2$ . La irradiancia que se recibe sobre una superficie perpendicular a los rayos de Sol en el exterior de la atmósfera puede considerarse como constante e igual a  $1.367 W/m^2$ ” (Nuñez, 2013, pág 27).

- **Insolación o Irradiación solar**

Según Gozalbes (2015), “Es la cantidad de irradiancia recibida en un lapso determinado, es decir, la potencia recibida por unidad de tiempo y por unidad de superficie. Se suele medir en  $Wh/m^2$  o, en caso de un día, en  $Wh/m^2/día$ ” (pág. 60).

- **Constante solar**

Es el valor total promedio de la energía solar que llega al borde de la atmósfera y es de  $1367 W/m^2$ . El 30% de esta energía es regresada al espacio porque es reflejada por las nubes. El 70% de la energía que sigue hacia la tierra, dos terceras partes calientan la atmósfera, la otra tercera parte se absorbe en la evaporación de agua (Acevedo, 2016).

La diferencia entre los tipos de radiación está en cómo inciden los rayos solares sobre la superficie terrestre. En la TABLA 1. 3 se presentan las subdivisiones de la radiación.

TABLA 1. 3. TIPOS DE RADIACIÓN Y SU DESCRIPCIÓN.

RADIACIÓN	DESCRIPCIÓN
Directa	Es la que proviene directamente del Sol, es decir que no se desvía o que no hay nada que lo obstruya, se caracteriza por generar sombras bien definidas.
Difusa	Es la radiación absorbida y dispersada por la atmósfera que llega a la superficie terrestre. Y así los rayos solares no llegan en forma directa.
Reflejada	Es cuando los rayos solares son desviados a causa de superficies planas. A esta radiación también se le llama "albedo".
Global	Será la suma de las radiaciones directa y difusa.
Total	Es la suma de todos los tipos de radiación antes citados, que es la que nos interesa a efectos energéticos.

Fuente: (Miranda, 2016).

### 1.3. Energía Solar Fotovoltaica

Se entiende por energía solar fotovoltaica a la transformación de los rayos del Sol en energía eléctrica a partir de la utilización de las propiedades eléctricas de los materiales contenidos en las células solares. Esto se hace por medio de semiconductores en especial el silicio (Vela, 2015). Lo más eficiente es ubicar los paneles perpendiculares a la radiación del Sol, pero se recomienda instalarlos con un ángulo de 5° a 15° para que resbale el agua o cualquier objeto que pueda caer.

Quinche & Soto (2012) afirman: "Hasta el final del 2008 existía una capacidad instalada de generación fotovoltaica y eólica dentro del país de 2,42MW, de los cuales apenas 123kW corresponden a solar, según el Plan Maestro de Electrificación 2009-2020" (pág. 48).

#### 1.3.1. Funcionamiento energía solar fotovoltaica

Es posible obtener energía eléctrica directamente de la luz del sol, por medio de paneles fotovoltaicos. Esta transformación se debe al efecto llamado fotoeléctrico que consiste en la interacción entre la radiación solar y el material semiconductor fotovoltaico (Véase Figura 1). Esta energía se genera en corriente continua, la cual para su transformación a corriente alterna se utiliza inversores y para su almacenamiento se utilizan baterías (Valdivia, 2012).

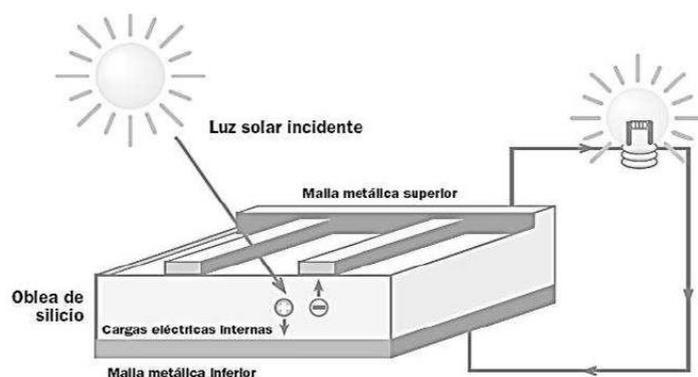


Figura 1. Efecto fotovoltaico sobre paneles solares.

Fuente: (Valdivia, 2012).

En la Figura 1, se muestra el efecto fotovoltaico sobre los paneles solares. Este efecto es la base del proceso mediante el cual una célula FV convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas.

#### 1.4. Análisis de la generación solar fotovoltaica

Casi todas las formas de energía que se conoce proceden directa o indirectamente de la energía del sol, en todas las épocas de la historia se han desarrollado varios inventos capaces de aprovechar de una u otra manera la energía solar.

Es importante conocer todos y cada uno de los componentes que forman parte de la generación eléctrica. Las energías alternativas a diferencia de las energías convencionales utilizan como fuente de generación recursos renovables y poseen una fuente básicamente inagotable.

Ecuador es un país abundante en su biodiversidad, geográficamente se encuentra situado en una zona envidiable, en donde sus fuentes energéticas existentes, y temperaturas no extremas vuelven a nuestro país muy importante para el desarrollo y explotación de nuevas alternativas energéticas para la generación de electricidad.

Esta ventaja posicional del Ecuador se traduce en la recepción de una mayor y constante cantidad de radiación solar, misma que varía dentro del país únicamente por condiciones climatológicas locales y que varían de acuerdo con la cercanía o lejanía del sol.

En nuestro país, las condiciones para implementar sistemas de energía solar son ideales, dado que el territorio nacional se encuentra localizado sobre la línea ecuatorial que es una de las zonas con alta intensidad de radiación solar en el planeta. Los datos de radiación solar en Ecuador promedio de insolación directa es  $300 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$ .

## 1.5. Sistema Solar Fotovoltaico

En las últimas décadas, los sistemas fotovoltaicos han llegado a ser una manera efectiva de producir energía eléctrica y aún más en los lugares donde hay mayor radiación solar. Los paneles fotovoltaicos que usan celdas monocristalinas son los más utilizados (60% del mercado). Los que usan células policristalinas tienen un 35% del mercado (Yahyaoui, Chaabene, & Tadeo, 2015).

Los componentes principales que se utilizan en una instalación solar son los paneles fotovoltaicos que varían según su esquema (Figura 2), el cual pueden ir desde un par de kW (kilowatt, unidad de potencia) en una instalación residencial hasta decenas de MW (en una generación a gran escala) (Issa, 2013).

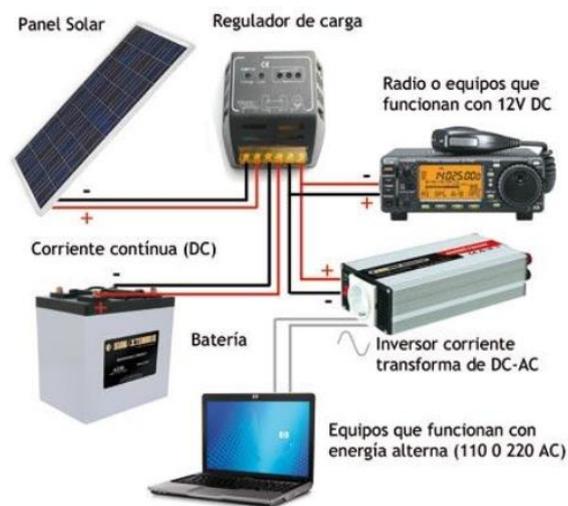


Figura 2. Componentes de un sistema solar fotovoltaico.

Fuente: (Loza & Palacios, 2014).

En la Figura 2 se muestran los componentes que conforman un sistema solar fotovoltaico. También se observa el proceso de generación de energía eléctrica mediante la captación de luz solar, la cual pasa a un sistema acumulador de energía y por último es transformada por un inversor para ser utilizada en corriente alterna.

Los equipos que se emplean generalmente en una instalación fotovoltaica con conexión a red se mencionan a continuación:

- Paneles solares
- Regulador de carga solar
- Inversores con conexión a red
- Contador bidireccional

### 1.5.1. Paneles Solares Fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos son dispositivos eléctricos que para su funcionamiento utilizan luz solar en forma directa, la misma que al caer en la celda libera electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico denominado “efecto fotovoltaico”. Un módulo o panel es un conjunto de celdas conectadas en serie para aumentar el voltaje y en paralelo para aumentar la corriente (Uzquiano Camilo, Sullivan Mike, & Ximena, 2015).

En la actualidad, existen diferentes tipos de paneles fotovoltaicos que se caracterizan, desde un punto de vista eléctrico y es posible clasificarlos ya sea por el material de construcción o por su proceso de fabricación; entre los más usados se encuentran:

- ***Paneles monocristalinos de silicio***

Este tipo de celda tiene una estructura cristalina ordenada (Figura 3), con cada átomo situado en una posición preordenada y muestra un comportamiento predecible y uniforme. Estas celdas son relativamente caras, pero alcanzan eficiencias del orden del 18 % (Romero, 2015).



Figura 3. Panel de silicio puro Monocristalino.

Fuente: (Martínez, 2011).

En la Figura 3, se muestra un panel de silicio monocristalino, su apariencia es sobre todo de color negro. Para producir el panel fotovoltaico de silicio, es necesario pasar por una serie de etapas.

- ***Paneles policristalinos de silicio***

Este tipo de células se caracterizan por estar fabricadas con un silicio menos puro, siendo así más baratas que las células monocristalinas (Figura 4). El proceso para producirlo es más simple y se alcanzan eficiencias del orden del 20 % en laboratorio y entre un 10 y un 12% en producción (Vega, 2013).



Figura 4. Panel solar de silicio puro policristalino.

Fuente: (Martínez, 2011).

En la Figura 4, se muestra un panel de silicio policristalino. Existen muchas técnicas por las cuales puede obtenerse silicio en estado policristalino.

- ***Celdas solares tipo amorfo***

Este tipo de celdas tiene un arreglo incluso menos regular de los átomos, con lo cual se forman enlaces colgantes y algunas lagunas donde la recombinación puede tener lugar. Se pueden formar celdas de silicio de cualquier tamaño y forma (Figura 5). Su precio de fabricación puede ser muy bajo (Ardila, 2017).



Figura 5. Módulo solar amorfo.

Fuente: (Escamilla & Tovar, 2011).

En la Figura 5, se presenta un panel de silicio tipo amorfo, la gran ventaja de estas células reside en el hecho de que sólo se necesita muy poco material para su fabricación.

En la TABLA 1. 4, se pueden observar los rendimientos actuales de las diferentes tecnologías de módulos solares fotovoltaicos en fase de comercialización.

TABLA 1. 4. EFICIENCIA DE DIFERENTES CELDAS FOTOVOLTAICAS.

TIPO DE MATERIAL	MÁXIMO TEÓRICO	LABORATORIO	EN MÓDULOS
Silicio Monocristalino	27%	24.70%	16%
Silicio Policristalino	27%	19.80%	14%
Arseniuro de Galio	29%	25.70%	20%
Silicio Amorfo	25%	13.9%	8%
Teluro de Cadmio	28.50%	16%	8%
Película de Silicio	27%	16%	11%

Fuente: (Valdivia, 2012).

### 1.5.1.1. Principales parámetros de la característica I-V

La presentación estándar de un panel fotovoltaico viene definida por su curva característica corriente-tensión (Figura 6).

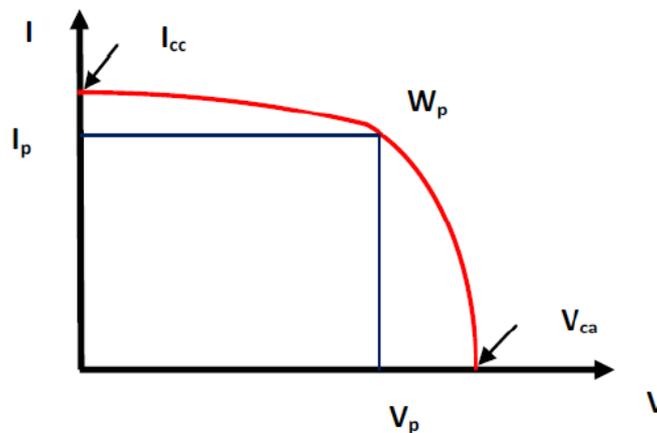


Figura 6. Característica corriente-tensión de un módulo fotovoltaico.

Fuente: (Escamilla & Tovar, 2011).

En la Figura 6 se indica la curva característica corriente-tensión que presenta puntos importantes, estos son la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ), la tensión en circuito abierto ( $V_{ca}$ ), la corriente y tensión en el punto de máxima potencia ( $I_p, V_p$ ) y la potencia máxima ( $W_p$ ).

La respuesta de un panel a la radiación solar vendrá determinada por las celdas que lo conforman, pudiendo ser descrita mediante varios parámetros, los cuales se mencionan a continuación en la TABLA 1. 5.

TABLA 1. 5. PARÁMETROS DE LA CARACTERÍSTICA I-V Y SU DESCRIPCIÓN.

PARÁMETROS I-V	DESCRIPCIÓN
Corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ )	Es la intensidad máxima de corriente que se puede obtener de un panel. Para conocer la ( $I_{SC}$ ) se hace mediante un amperímetro, midiendo los bornes del panel, sin ninguna resistencia y provocando un cortocircuito.
Voltaje a circuito abierto ( $V_{OC}$ )	Es el voltaje máximo que puede proporcionar el módulo fotovoltaico, se puede medir con un voltímetro sin que pase corriente a los bornes del panel, es decir, en condiciones de circuito abierto.
Tensión nominal ( $V_n$ )	Denominado como $V_n$ , es el valor de diseño al que trabaja el módulo.
Potencia máxima ( $P_{mp}$ )	Es el valor máximo de potencia que se puede obtener del panel y se define por el punto de la curva I-V en que se consigue un valor máximo, los puntos restantes de la curva generan valores inferiores.
Tensión máxima ( $V_{mp}$ )	Denominada como $V_{mp}$ , es el valor de tensión para la potencia de pico en condiciones estándar o de prueba.
Corriente máxima ( $I_{mp}$ )	Denominada como $I_{mp}$ , es el valor de corriente cuando la potencia generada es máxima, o corriente en el punto de máxima potencia.

Autor: (Tesillo, 2016).

### 1.5.1.2. Partes de un panel fotovoltaico

Cada fabricante tiene una manera distinta en la construcción de paneles solares, pero tienen una característica en común que es su estructura (Figura 7), donde ambos lados de la célula quedan mecánicamente protegidos.

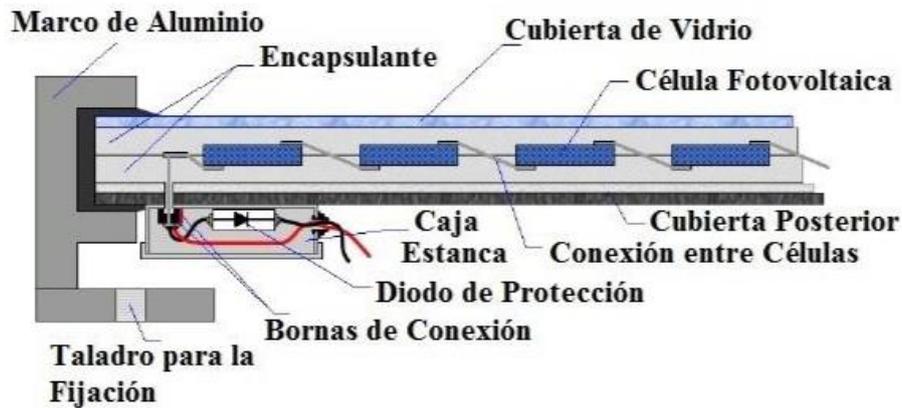


Figura 7. Partes de un módulo fotovoltaico.

Autor: (Gozalbes, 2015).

En la Figura 7, se destacan las principales características de todo panel solar y puede verse un esquema típico de su construcción. El vidrio que recubre el panel sirve como protección para las células solares ante los fenómenos atmosféricos.

### 1.5.1.3. Factores que inciden en el rendimiento de los paneles solares

Se han desarrollado investigaciones para identificar los factores que afectan el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos. A continuación, se presenta en la TABLA 1. 6 dichos factores.

TABLA 1. 6. FACTORES QUE INCIDEN SOBRE LOS PANELES SOLARES.

FACTORES	DESCRIPCIÓN
Orientación e inclinación	Los paneles han de situarse de tal forma que a lo largo del periodo anual de utilización aprovechen al máximo la radiación solar disponible. En la zona ecuatorial, se necesita conservar un ángulo $> 10^\circ$ para que el polvo no se acumule sobre el panel.
Energía de la luz incidente	El nivel de radiación que incide en el panel solar tiene que estar dentro de ciertos límites, porque no todas las ondas de radiación son percibidas por los paneles, en consecuencia, no se puede generar el flujo de corriente necesario.
Reflexión	Son pérdidas producidas en la superficie del panel solar debido a la reflexión de los rayos incidentes. Actualmente, los fabricantes de paneles están trabajando en este problema utilizando capas antirreflejo.

Factor sombra	El efecto sombra es causado cuando se obstaculiza la luz que impacta sobre la superficie del panel ya sea por árboles, edificaciones o por los mismos paneles. Esto provoca la eliminación de la radiación directa, lo que significa que la corriente se disminuirá.
Temperatura y viento	Si la temperatura se eleva, significa que la potencia de salida disminuye. Si la temperatura baja, quiere decir que la potencia de salida se eleva levemente. El factor viento, puede afectar siempre y cuando el sistema fotovoltaico no esté construido de un material resistente.
Factor agua	El factor agua puede provocar efectos dañinos sobre los paneles, conexiones y sellos, siempre y cuando la lluvia no resbale de los paneles, pero en caso contrario el agua sirve como agente limpiador del polvo del panel.

Autor: (Cepeda & Sierra, 2016).

### 1.5.2. Regulador de carga solar

El regulador de carga es un dispositivo electrónico (Figura 8), el cual controla la entrada en exceso de electricidad a la batería y también evita las sobrecargas. El regulador también permite conectar la energía eléctrica de la batería a la carga en uso. Estos controladores permiten que las baterías tengan una vida útil larga, ya que incorporan un sistema que permite desconectar la batería por bajo voltaje de descarga y máximo voltaje de carga (Acevedo, 2016).



Figura 8. Regulador de carga del sistema.

Fuente: (Martínez, 2011).

En la Figura 8 se muestra un regulador de carga solar, el cual tiene funciones básicas de conexión entre paneles, baterías y carga. Además, tiene capacidades de regulación desde 6A hasta 200A. Los voltajes varían entre 12V, 24V y 48V.

### 1.5.2.1. Tipos de regulares de carga

Se distinguen tres tipos de reguladores según su método de control utilizado para regular la carga proveniente de los paneles solar a las baterías:

#### - **Reguladores en paralelo**

Estos reguladores son los primeros que se empezaron a utilizar y su tecnología es la más sencilla que se encuentra en el mercado (Figura 9). Principalmente estos dispositivos son empleados en instalación de baja potencia. En conclusión, los reguladores de tipo paralelo tienen bajo costo y una alta fiabilidad (Gozalbes, 2015).

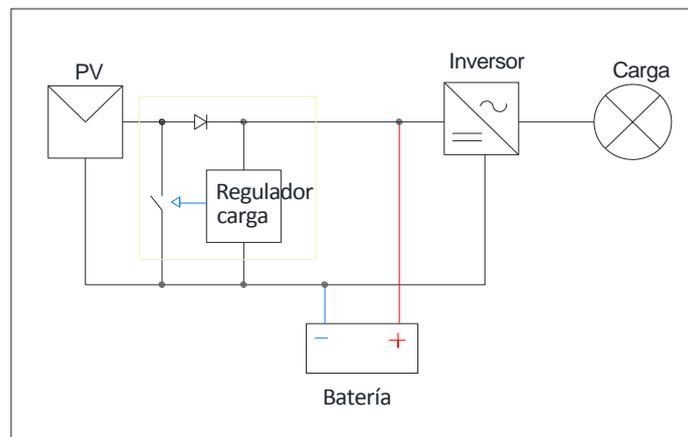


Figura 9. Regulador tipo paralelo.

Fuente: (Gozalbes, 2015).

En la Figura 9, se puede observar el funcionamiento del regulador en paralelo, consiste en colocar un transistor o MOSFET en paralelo entre el generador y el banco de baterías. Cuando se llega al límite máximo de descarga el regulador corta el bus que conecta el acumulador con la carga AC.

#### - **Reguladores en serie**

Los reguladores tipo serie (Figura 10) abren el circuito interrumpiendo en camino a las baterías, para desconectar el circuito se utilizan relés o interruptores de estado sólido. Cuando las baterías alcanzan un nivel máximo de carga, el regulador desconecta las baterías, pero cuando existen niveles mínimos el interruptor del regulador tiene que estar conectando el circuito (Gozalbes, 2015).

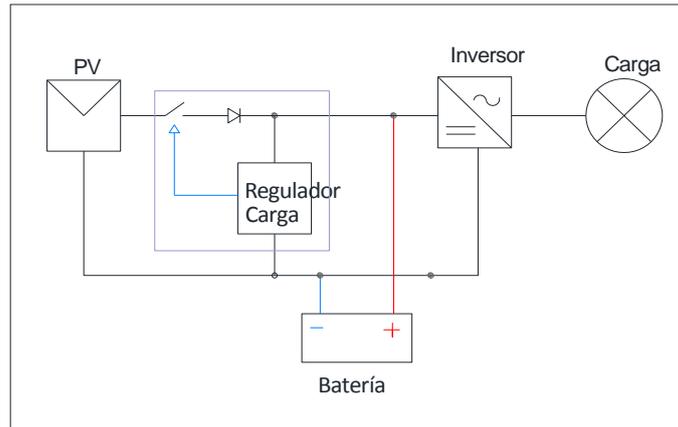


Figura 10. Regulador tipo serie.  
Fuente: (Gozalbes, 2015).

En la Figura 10, se puede observar el funcionamiento de un regulador tipo serie, este sistema abre los buses de corriente en vez de disipar la energía, por esta razón son los más utilizados en instalaciones de mayor potencia.

- **Reguladores con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)**

Los reguladores MPPT son convertidores que trabajan como conversores DC-DC entre el generador FV y la batería. La función principal del controlador MPPT es ajustar la salida del generador FV para transferir la máxima la energía generada a las baterías. Este dispositivo opera ajustando el punto de operación de voltaje o corriente de modo que la potencia obtenida se aproxime lo posible a la potencia máxima del generador FV (Gozalbes, 2015).

Existen cuatro parámetros eléctricos que han de tenerse en cuenta: tensión nominal de las baterías, las entradas MPPT, tensión de entrada y tolerancia a las sombras en los puntos de máxima potencia. La ventaja de utilizar un regulador de carga de alto voltaje es que permite colocar varios paneles conectados en serie, de esta manera se evita la colocación de dichos paneles en paralelo (Gozalbes, 2015).

**1.5.3. Baterías**

Acumulan la energía eléctrica generada por los paneles durante el día para su posterior utilización cuando no exista sol (Figura 11). Además, las baterías ayudan al sistema proporcionando la energía necesaria cuando por los cambios climáticos no se pueda generar la suficiente electricidad, por ejemplo, en el atardecer o amanecer es casi imposible producir la potencia requerida para alimentar un circuito (Acosta, Martínez, & Riveros, 2015).



Figura 11. Batería de ciclo profundo.

Fuente: (Martínez, 2011).

En la Figura 11, se muestra una batería de ciclo profundo, la cual soporta sucesivos y continuos ciclos. Un ciclo es una carga y descarga al 80% de la capacidad de la batería. Esta batería de ciclo profundo tiene como mínimo 3 años de vida útil, siempre y cuando su descarga sea de manera lenta.

Según Santillán (2016), entre las más utilizadas en los sistemas fotovoltaicos encontramos una gran variedad y a continuación se las expone:

- a) Plomo - ácido
- b) Níquel – Cadmio.
- c) Sodio alta temperatura
- d) Litio
- e) Baterías selladas. (Gelificadas, Electrolito absorbido).

Según el catálogo de baterías DAISA (2019), las baterías para uso fotovoltaico tienen que cumplir los siguientes requisitos:

- ✓ Bajo valor de auto descarga.
- ✓ Larga vida útil.
- ✓ Manutención casi nula.
- ✓ Elevado número de carga-descarga.
- ✓ Buena carga con baja intensidad.
- ✓ Alto rendimiento.

### 1.5.3.1. Parámetros característicos de las baterías

Antes de definir el modelo y tamaño de las baterías es importante tener en cuenta los siguientes parámetros característicos de las baterías, los cuales se presentan a continuación en la TABLA 1. 7.

TABLA 1. 7. PARÁMETROS DE LAS BATERÍAS Y SU DESCRIPCIÓN.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Capacidad nominal	La capacidad nominal de una batería, $C_{\#}$ este valor viene estipulado en catálogos de fabricantes y sus unidades son amperios-hora (Ah) que se puede obtener de la batería, si se descarga a corriente constante durante un tiempo $t$ .
Tensión	La batería en sí misma es una fuente de tensión, dicha tensión varía en función del estado de carga de las baterías, hecho que permite la regulación de estas y del sistema. Las baterías tienen un voltaje nominal que suele ser de 2, 6, 12 o 24V.
Eficiencia de la carga	Se conoce como eficiencia de la carga de una batería a la relación existente entre la energía utilizada para cargar la batería y la energía que se consigue almacenar. Cuanto mayor sea dicha eficiencia menor energía se perderá.
Estado de la carga	Es la capacidad de la batería expresada en tanto por ciento, en instalaciones fotovoltaicas resulta difícil determinar el estado de la carga debido a que las baterías están continuamente cargándose y descargándose.
Profundidad de descarga	La profundidad de descarga máxima es el valor en porcentaje de la energía que se puede sacar de un acumulador plenamente cargado en una descarga, con el fin de proteger y prolongar la vida de las baterías.
Autodescarga	Es el proceso mediante el cual el acumulador eléctrico tiende a descargarse, sin estar en uso debido al consumo interno de su energía almacenada.
Eficiencia de la batería	Relación entre la energía obtenida a partir del generador fotovoltaico y la energía que entra en Wh. Para baterías nuevas dicho valor suele oscilar entre 0,7 y 0.85.

Autor: (Gozalbes, 2015).

#### 1.5.4. Inversores con conexión a la red

Los inversores fotovoltaicos para conexión a la red eléctrica son dispositivos electrónicos (Figura 12), se caracterizan por operar directamente con el generador fotovoltaico y también permiten suministrar la potencia generada a la red comercial. Su función principal es convertir la corriente continua producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna. Para optimizar el grado de aprovechamiento del generador FV, el inversor debe tener seguidor de punto máximo de potencia (Cornejo, 2013).



Figura 12. Inversor Paneles Solares.  
Fuente: (Acosta, Martínez, & Riveros, 2015).

En la Figura 12, se indica un inversor marca Xantrex, este dispositivo tiene parámetros de calidad como; baja distorsión armónica, elevado factor de potencia y bajas interferencias electromagnéticas

##### 1.5.4.1. Partes fundamentales de un inversor

Las partes fundamentales en un inversor son las que se presentan a continuación en la TABLA 1. 8.

TABLA 1. 8. PARTES FUNDAMENTALES DE UN INVERSOR Y SU DESCRIPCIÓN.

<b>PARTES DEL INVERSOR</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Control principal	Incluye todos los elementos de control general, los sistemas de generación de onda basados en sistemas de modulación de anchura de pulsos (PWM) y parte del sistema de protecciones.
Etapa de potencia	Debe incorporar un filtro de salida (LC), para filtrar la onda y evitar el rizado en la tensión procedente de los módulos.
Control de red	Es la interfase entre la red y el control principal. Proporciona el correcto funcionamiento del sistema al sincronizar la forma

	de onda generada a la red eléctrica, ajustando tensión, fase, sincronismo, etc.
Seguidor punto máxima potencia	Su función es acoplar la entrada del inversor a los valores de potencia variables que produce el generador, obteniendo en todo momento la mayor cantidad de energía disponible, la máxima potencia.
Protecciones	Los inversores deben estar protegidos ante tensión de red fuera de márgenes, frecuencia de red fuera de márgenes, temperatura de trabajo elevada, tensión baja del generador y fallo de la red eléctrica.
Monitorización de datos	Los inversores dispondrán de microprocesadores que les facilite una gran cantidad de datos tanto de los parámetros habituales como de parámetros externos (radiación, temperatura ambiente, etc.) e internos.

Autor: (Ormaechea, 2012).

#### 1.5.4.2. Topologías de los inversores conectados a red

Según Lora & Ortega (2012), aspectos importantes que habrán de cumplir los inversores fotovoltaicos:

- Deberán tener una eficiencia alta.
- Estar adecuadamente protegidos contra cortocircuitos y sobrecargas.
- Incorporar rearme y desconexión automáticos.
- Admitir demandas instantáneas de potencia mayores del 150% de su potencia máxima.
- Cumplir con los requisitos que establece el Reglamento de Baja Tensión, Baja distorsión armónica, bajo consumo, aislamiento galvánico, sistema de medidas y protección.

Según (Cruz & de la Fuente, 2012), en cuanto a las configuraciones del sistema, el inversor fotovoltaico conectado a red (Ver Figura 13) se puede clasificar en:

- Inversores centrales.
- Inversores cadena.
- Inversores módulo.
- Inversores multicadena.

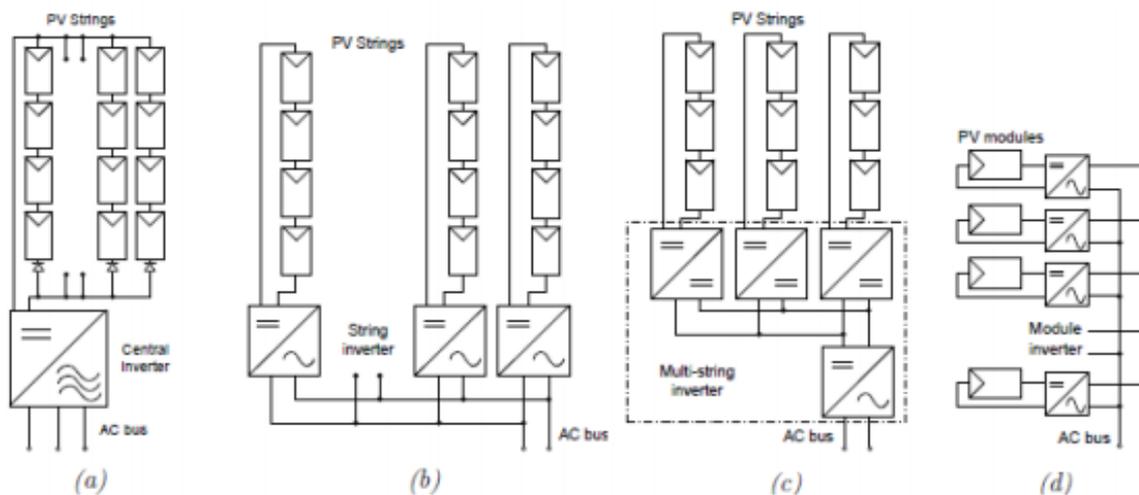


Figura 13. Diferentes configuraciones de los inversores fotovoltaicos: Inversor central (a), Inversor cadena (b), Inversor multi-cadena (c) e Inversor módulo (d).  
 Autor: (Cruz & de la Fuente, 2012).

En la Figura 13, se puede observar las diferentes configuraciones de los inversores fotovoltaicos. Los módulos están conectados en combinaciones de configuraciones serie y paralelo para obtener una mayor potencia.

- **Seguimiento del punto de máxima potencia**

Un inversor de conexión a red es una fuente de corriente y como tal no puede estar controlado en tensión, la mayoría de los inversores de conexión a red disponen de un control PWM controlado en corriente. El inversor debería operar en todo momento en el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico. La potencia DC que el inversor pueda obtener de un generador fotovoltaico depende del punto de trabajo de la curva I-V (Abella, 2016).

Para que el inversor opere en PMP es necesario un algoritmo que pueda controlar la tensión de operación del generador FV. Existen diferentes algoritmos como: perturbación y observación, conductancia incremental, capacidad, voltaje constante, voltaje corregido con la temperatura, lógica difusa, etc. El algoritmo más utilizado en inversores de conexión a red es el de perturbación y observación, y el de conductancia incremental (Cruz & de la Fuente, 2012).

**1.5.4.3. Configuración del inversor**

El inversor DC/AC para conexión a la red está incorporado por un circuito de sincronización de fase entre su salida de corriente alterna y de la red eléctrica a la que se conecta. La condición para unir las líneas con corriente alterna a la de la red de distribución y la salida del inversor, es que coincidan completamente sus fases y voltajes (Domínguez, 2012).

El inversor se utiliza para obtener corriente alterna de salida en forma de onda senoidal, el inversor con conexión a la red se define por un conjunto de especificaciones técnicas, siendo las más importantes las tensiones de entrada y salida, la potencia suministrada y su exactitud de fase (Domínguez, 2012).

#### 1.5.5. Contadores de doble sentido

Es el elemento que contabiliza por un lado la energía que consume la vivienda de los paneles y la energía sobrante que se inyecta a la red, y por otro lado se contabiliza lo que la vivienda toma de la red (Acosta, Martínez, & Riveros, 2015). Con estos aparatos se puede conocer si el usuario dispone de la energía necesaria, si la tiene en exceso o si tiene menos de la que necesitaría. (Ver Figura 14).



Figura 14. Medidor Bidireccional Itron Sentinel.  
Fuente: (Loza & Palacios, 2014).

En la Figura 14 se presenta un medidor bidireccional, este dispositivo mide la energía producida por el sistema fotovoltaico durante su período de funcionamiento. Este instrumento mide e indica magnitudes eléctricas, como corriente, carga, energía, etc.

#### 1.6. Clasificación de las instalaciones fotovoltaicas

En la actualidad, se están desarrollando sistemas fotovoltaicos conectados directamente a la red eléctrica, por lo que la energía que generan se usa de inmediato. Las instalaciones basadas en paneles solares fotovoltaicos están clasificadas en tres versiones dependiendo de su arquitectura y utilización:

- Instalaciones aisladas de la red
- Instalaciones con conexión a la red
- Instalaciones híbridas

### 1.6.1. Instalaciones aisladas de la red

Las instalaciones aisladas (Figura 15), son aquellas que están enfocadas a obtener energía eléctrica para consumo o almacenamiento por la vivienda por medio de bancos de baterías para utilizarla durante las horas nocturnas o en las que hay muy poca irradiación solar. Además, esta infraestructura no tiene ningún punto de conexión con la red eléctrica de distribución (Ormaechea, 2012).

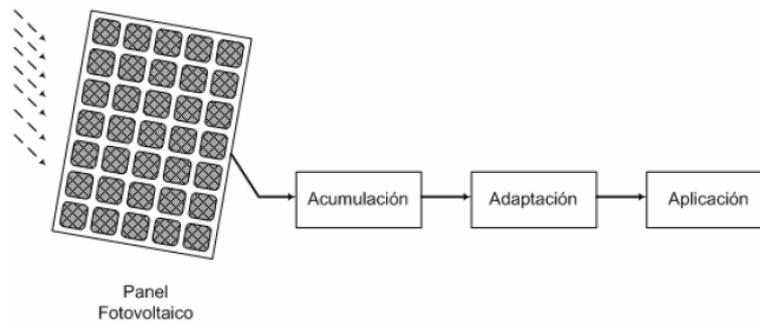


Figura 15. Diagrama de bloques de una instalación aislada.

Fuente: (Hernández & Martínez, 2007).

En la Figura 15, se indica un diagrama de bloques de una instalación aislada. En la gráfica se observa el proceso de generación, acumulación, adaptación y aplicación en corriente directa.

### 1.6.2. Instalaciones con conexión a la red

Corresponden a las que están conectadas a la red eléctrica pública de distribución, están conformadas por un generador FV y un sistema de acondicionamiento de potencia, encargado de transformar la energía en forma de corriente continua a corriente alterna, con las características de la red de distribución (Véase Figura 16).

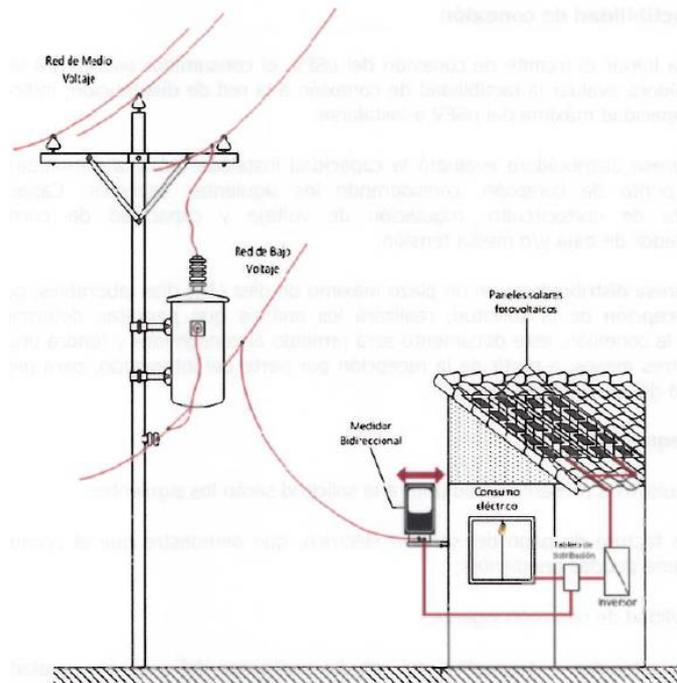


Figura 16. Esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.  
Fuente: (Arconel 003/18, 2018).

En la Figura 16, se indica un esquema básico de una instalación con conexión a la red. En la gráfica se observa el proceso de generación, adaptación (inversor) y aplicación en corriente alterna. Este tipo de sistemas ya tiene un punto de conexión con la red eléctrica.

### 1.6.3. Instalaciones híbridas

Son instalaciones que incorporan diferentes fuentes generadoras de electricidad para alimentar una misma aplicación (Figura 17), como la generación fotovoltaica y eólica. El principio de funcionamiento de una instalación híbrido eólico-solar es idéntico al de una instalación solar, con el añadido de tener un generador eólico con su respectivo regulador (Toapanta Aguilar & Hidalgo Guerrero, 2014).

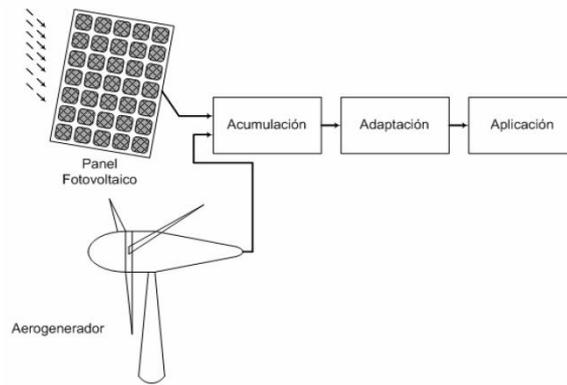


Figura 17. Diagrama de una instalación aislada híbrida.

Fuente: (Hernández & Martínez, 2007).

En la Figura 17, se indica un diagrama de bloques de una instalación aislada híbrida. En la gráfica se observa el proceso de generación con dos tipos de energía como la solar y eólica, utilizan el mismo sistema de acumulación, en la adaptación ya están adaptados ambos tipos de energía y la aplicación es en corriente directa.

### 1.7. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica

Los sistemas interconectados están permanentemente conectados a la red eléctrica. En el momento en el que el pequeño productor necesite energía eléctrica y los paneles fotovoltaicos no estén funcionando, se puede tomar de la red eléctrica la energía que se necesite, cuando se genere demasiada electricidad ésta se vierte a la red de distribución (Acosta, Martínez, & Riveros, 2015). Existen dos tipos de sistemas interconectados, con respaldo y sin respaldo.

Es poco común encontrar sistemas interconectados con respaldo, es decir, con banco de baterías, ya que, como parte negativa es el costoso de implementación, pero tiene su parte positiva que es reducir la demanda de suministros energéticos por parte de la empresa eléctrica (Sánchez & Franco, 2016).

Un sistema interconectado a red sin respaldo ya no utiliza baterías, en su lugar utilizan un contador bidireccional. Este contador se encarga de registrar el consumo y generación de electricidad. Al consumir energía eléctrica el contador gira en un sentido contabilizando la energía consumida y al producir energía eléctrica el medidor gira en sentido contrario, es decir descuenta al consumo generado (Sánchez & Franco, 2016).

### 1.7.1. Método de sincronización con la red

La red eléctrica es un sistema altamente dinámico que puede ser afectada por múltiples eventualidades como conexión y desconexión de cargas, perturbaciones, fallas debidas a caída de rayos o errores en el equipo de mantenimiento eléctrico. Por estas razones, la corriente inyectada en la red tiene que ser sincronizada con la tensión de red, esto se hace para que el sistema fotovoltaico se acople a la red con la misma frecuencia, tensión y periodo. Se han desarrollado algoritmos de sincronización que permiten la conexión de estos dos tipos de energía (Gamez & Guama, 2015).

- El método clásico, detector de cruce por cero.
- PLL Phase Locked Loop, es un método actual y produce flexibilidad debido a la implementación del software.

#### 1.7.1.1. Detector de cruce por cero

Un detector de cruce por cero se utiliza para detectar los cruces por cero de las señales de corriente alterna (Figura 18). Es importante detectar los cruces por cero en los sistemas fotovoltaicos de la onda sinusoidal de tensión de la red, los puntos de cruce solo pueden detectarse cada medio ciclo de frecuencia de la red, por lo que la dinámica de control se ve perjudicada, además, este método tiene una desventaja la cual es que detecta cruces por cero falsos debido a ruidos que existen en la red, estos pueden ser diferentes cargas, armónicos de alta frecuencia y baja calidad de señal de referencia (Escamilla & Tovar, 2011).

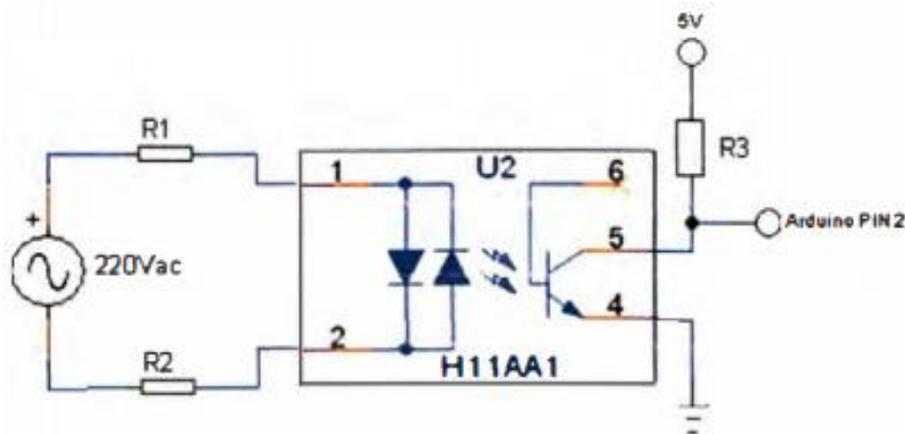


Figura 18. Esquema general del detector de cruce por cero.

Autor: (Cheng, 2014).

En la Figura 18, se puede observar un esquema general del detector de cruce por cero. En este esquema se utiliza un optoacoplador de tipo fototransistor, el cual posee en la entrada

dos diodos antiparalelos para la onda positiva y negativa, de esa manera se detecta ambos cruces y no conducirá el transistor a la salida.

### 1.7.1.2. PLL Phase Locked Loop

El método de sincronización PLL (Figura 19), es el método más común para extraer el ángulo de fase de la tensión de la red en sistemas solares fotovoltaicos interconectados a la red. El PLL permite obtener el valor de la posición angular theta ( $\Theta$ ) que se requiere para diversas operaciones de control (Tenorio, Rivas, Castillo, & González, 2018).

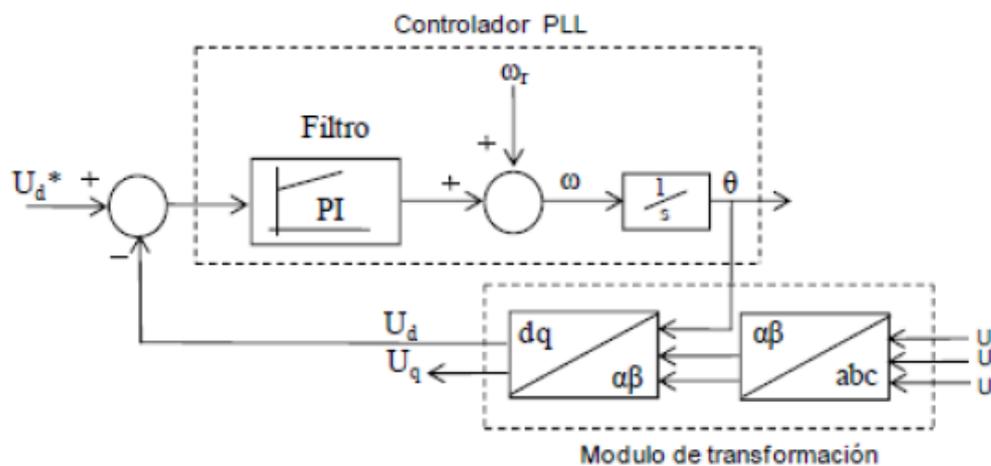


Figura 19. Técnica de sincronización PLL.  
Fuente: (Escamilla & Tovar, 2011).

En la Figura 19, se muestra la técnica de sincronización PLL, la cual consiste en obtener las componentes de eje directo y cuadratura  $dq$  de la tensión de red, utilizando las componentes  $dq$  de la tensión  $Ud$  se puede modificar el comportamiento de la señal y compararla con ella misma sin modificar  $Ud^*$ .

## 1.8. Análisis del sistema solar fotovoltaico y su integración a la red eléctrica

Un sistema de generación fotovoltaica es la que se encuentra conformada por paneles solares, inversores, baterías, reguladores de carga, medidores bidireccionales, cableado, protecciones del sistema, etc., mediante los cuales se deberá realizar un análisis para la implementación dentro de cualquier sistema de energía.

Las celdas fotovoltaicas son una de las fuentes de energía con mayor proyección para el futuro, ya que utilizan la conversión directa de energía solar en energía eléctrica. Las celdas

fotovoltaicas se construyen de silicio que es el segundo elemento más abundante en el planeta. Cuando mayor es la cantidad de luz que reciben los paneles fotovoltaicos, mayor es la cantidad de energía que produce el sistema.

La energía producida por los módulos fotovoltaicos es almacenada en baterías de acumulación. El regulador de carga sirve principalmente para preservar las baterías de un exceso de carga por el generador fotovoltaico y de la descarga por el exceso de uso.

En cuanto al inversor, su objetivo es la de transformar corriente continua producida por el módulo fotovoltaico, en corriente alterna, necesaria para la alimentación de los usuarios. El inversor tiene que estar dimensionado para poder alimentar la carga que se le quiere conectar.

Las instalaciones fotovoltaicas por lo general son fáciles de mantener, ya que prácticamente se mantendrían solas, pero siempre se debe tener la preocupación de verificar cada cierto tiempo, ya que, si no tiene el mantenimiento adecuado, reducirán el rendimiento de la instalación o disminución de su vida útil.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica es un asunto novedoso para las compañías eléctricas en el mundo. No hay bastantes experiencias del impacto sobre la calidad de suministro eléctrico en las redes de distribución. Los sistemas conectados a red están convirtiéndose en una tecnología estándar para la generación de electricidad.

## **CAPÍTULO 2**

### **Diseño de un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica**

#### **2.1. Introducción**

La generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables se está convirtiendo en un indicador de desarrollo económico y social, principalmente para disminuir la dependencia de combustibles fósiles, así como para contribuir en la reducción de la contaminación ambiental producidas por este tipo de fuentes no renovables. El presente trabajo de grado busca implementar un sistema de generación solar fotovoltaico con integración a la red eléctrica en el edificio de la carrera de Ingeniería en Electricidad (CIELE) para producir energía eléctrica a partir de fuentes inagotables y amigables con el medio ambiente.

Para el diseño e implementación del sistema se debe determinar el recurso solar disponible, esto se hace conociendo la radiación solar diaria media utilizando piranómetros. También se debe determinar la carga o consumo diario del edificio de CIELE, con estos dos parámetros se procede con el diseño y selección de equipos para el sistema de generación fotovoltaica con integración a la red.

#### **2.2. Análisis del objetivo**

El diseño e implementación de un sistema de generación solar fotovoltaico con integración a la red eléctrica en el edificio de CIELE, tiene como objetivo incentivar el uso de energías renovables en la generación de energía eléctrica, además de complementar los conocimientos teóricos con los prácticos en los estudiantes de electricidad.

#### **2.3. Ubicación física**

La ubicación en la cual se instalará el sistema de generación solar fotovoltaico con integración a la red eléctrica será en la Universidad Técnica del Norte (UTN) en la infraestructura de CIELE. El área dispuesta para la instalación de los paneles fotovoltaicos se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Ubicación del sistema de generación solar fotovoltaico.  
Fuente: (Google Maps, 2019).

### 2.3.1. Disposición y medidas de la azotea disponible

La superficie disponible para la instalación de los paneles fotovoltaicos es de 4.2 [m<sup>2</sup>]. En la Figura 21 se indica el área destinada para el sistema.

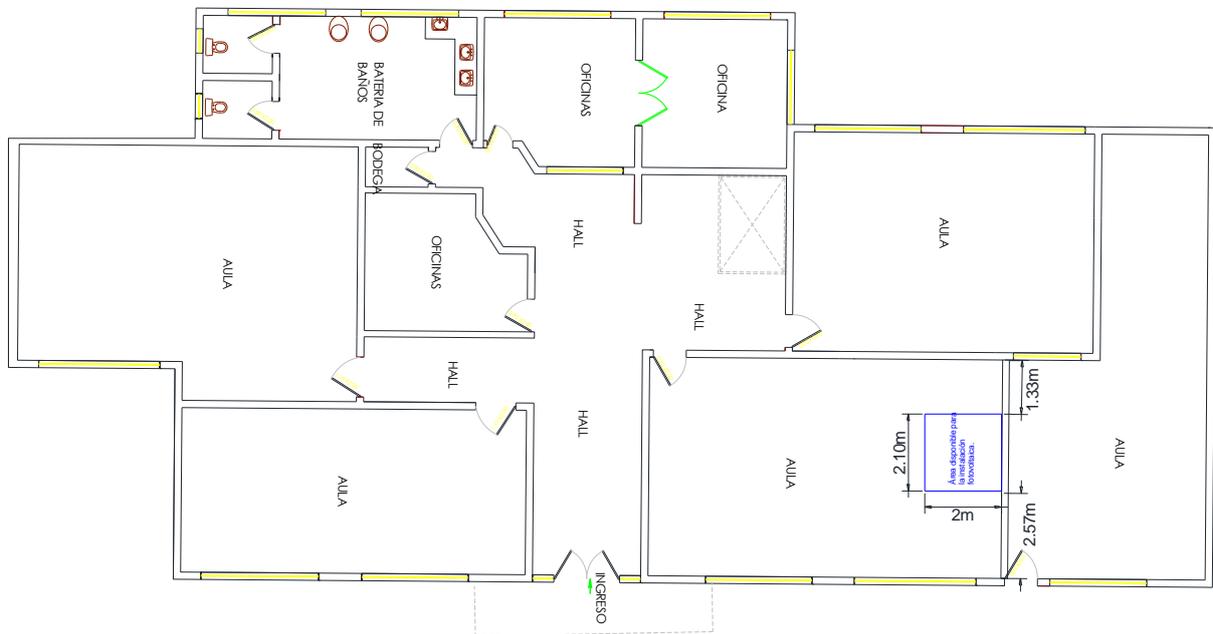


Figura 21. Área disponible para la instalación del Sistema Fotovoltaico.  
Fuente: (Departamento de construcción UTN, 2019).

Editado por el autor.

En la Figura 21 se indica el área seleccionada para la instalación del sistema fotovoltaico. Se ha elegido la cubierta del edificio de CIELE por cuestiones de ubicación, ya que cumple con cuatro parámetros: superficie disponible, orientación, carga estructural que puede soportar y la no incidencia de sombras.

### 2.3.2. Zona geográfica de la instalación

La ciudad de Ibarra se encuentra situada al norte de la región interandina del Ecuador. A continuación, se presentan los datos geográficos más relevantes del lugar donde se realizará la instalación del sistema fotovoltaico (TABLA 2.1).

TABLA 2.1. DATOS GEOGRÁFICOS DE LA CIUDAD DE IBARRA.

<b>DATOS GEOGRÁFICOS</b>		
<b>Ciudad</b>	Ibarra	-
<b>Latitud</b>	0.357	(°)
<b>Longitud</b>	-78.112	(°)
<b>Altitud</b>	2220	m.s.n.m.
<b>Temperatura</b>	13 a 24	(°C)

Fuente: (tierra.tiempo.net, 2019).

Editado por el autor.

### 2.4. Diagrama de flujo

En el siguiente diagrama de flujo (Figura 22) se describe el funcionamiento completo del sistema fotovoltaico con conexión a la red eléctrica. Los paneles solares son conectados al regulador de carga mediante un disyuntor DC y el regulador se encarga de la carga y descarga de la batería, la batería está conectada al regulador, los inversores DC/AC están conectados a los bornes de la batería mediante una Barra DC, la salida de los inversores da un voltaje de 120V AC que se conectan con la red pública de bajo voltaje.

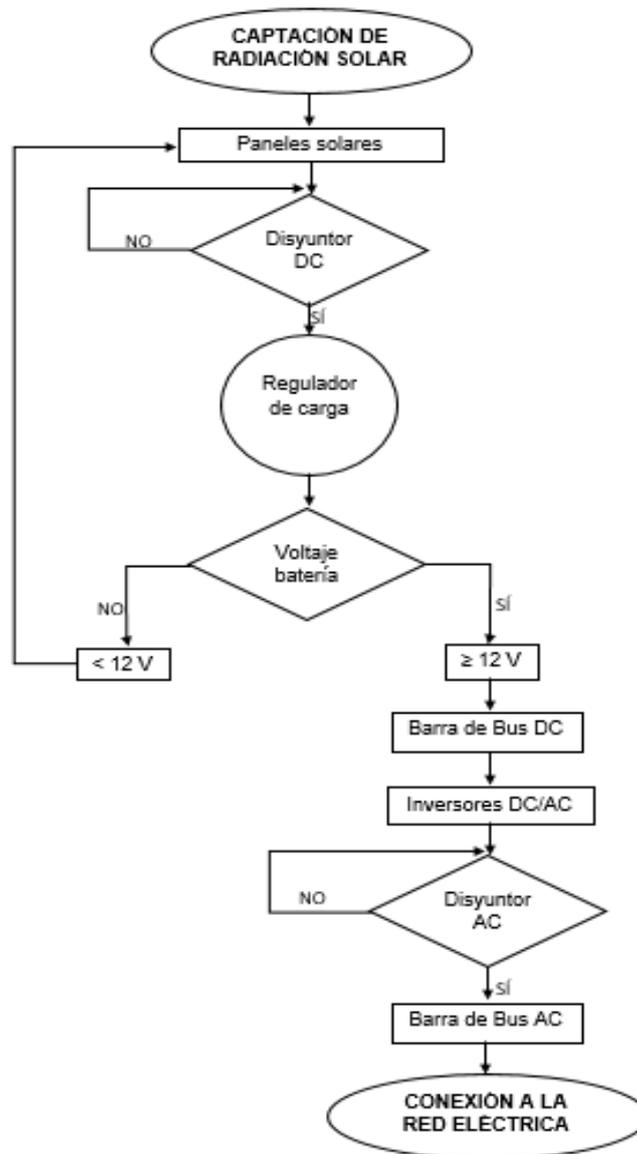


Figura 22. Proceso general del sistema fotovoltaico.

Fuente: Autor.

## 2.5. Desarrollo del proyecto

Para el desarrollo del proyecto se siguen los siguientes pasos:

- 1) Se inicia con la estimación del recurso solar disponible en el emplazamiento seleccionado.
- 2) Se realiza el dimensionamiento y la selección de los equipos del sistema fotovoltaico con integración a la red eléctrica.
- 3) Mediante AutoCAD se diseñó el sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica.

## 2.5.1. Estimación de recurso solar existente en el campus principal de la Universidad Técnica del Norte

Para la estimación del recurso solar existente en el campus principal de la UTN, se realizó mediciones de radiación solar, tomando en cuenta que el objetivo es implementar un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica.

En la TABLA 2. 2 se muestran los equipos utilizados en las mediciones de radiación solar, en los cuales se puede observar sus especificaciones técnicas (Ver Anexo A).

TABLA 2. 2. EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDIR LA RADIACIÓN SOLAR EXISTENTE EN IBARRA.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
Piranómetro RK200-03	Está basado en un principio termoeléctrico; los elementos sensores se fabrican mediante termopilas con múltiples contactos (Ver Anexo A1).	Rango espectral: 300-3200nm. Suministro: 12-24VDC. Rango medida: 0-2000W/m <sup>2</sup> . Salida: 0-20mV, 0-5V, 4-20mA.
Piranómetro S-LIB-M003	El sensor de radiación solar HOBO S-LIB-M003 es un sensor ligero e inteligente con un rango de medida de 0 a 1280 W/m <sup>2</sup> (Ver Anexo A2).	Rango medida: 0-1280W/m <sup>2</sup> . Temperatura: -40° a 75°C. Precisión: ± 10 W/m <sup>2</sup> o ± 5%. Resolución: 1.25 W/m <sup>2</sup> .
Data Logger RK600-02/02B	Es el componente central de la estación meteorológica automática, que puede conectar 16 parámetros al mismo tiempo (Ver Anexo A3).	LCD: 192 * 64. Interfaz de datos: RS485, USB. Comunicación: Ethernet, WIFI. Suministro: 12VDC, AC100V.
HOBO Micro Station	Es un registrador de datos de cuatro sensores diseñados para aplicaciones que requieren monitoreo multicanal de microclimas (Ver Anexo A4).	Rango operación: -20° a 50°C. Sensores: Cuatro sensores. Comunicación: Puerto serie de 3.5mm.

Fuente: (RIKA, 2017).

### 2.5.1.1. Datos de radiación solar

#### - Datos obtenidos del sensor de radiación solar (Piranómetro)

En la Figura 23 se muestra la serie de tiempo medidas por el Sensor de Radiación RK200-03 en W/m<sup>2</sup> y en la Figura 24 la correspondiente a medida por el sensor HOBO S-LIB-M003.

En el primer caso se tiene un conjunto de datos de aproximadamente de 46.673 muestras medidas cada minuto. Se presenta un valor máximo de 1.542 W/m<sup>2</sup>.

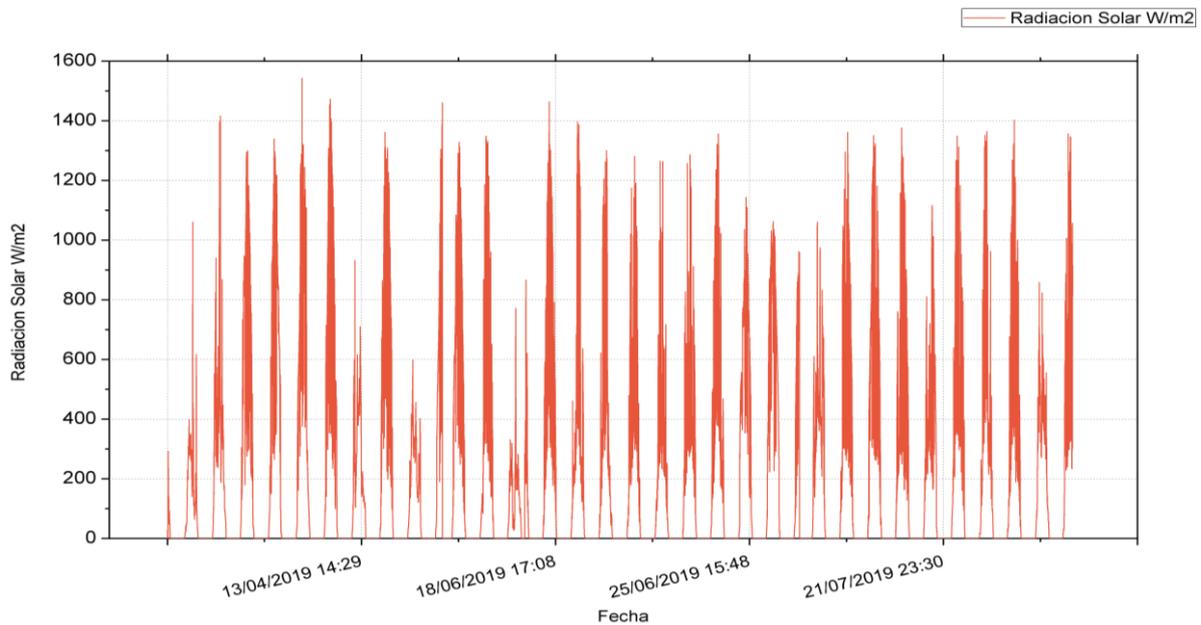


Figura 23. Series de tiempo irradiancia solar sensor RK200-03 desde abril a julio del 2019.

Fuente: Autor.

En el segundo caso se tiene un conjunto de datos cerca de 224.890 muestras, las cuales fueron registradas cada minuto. En este caso debido a que el sensor se satura en 1.276 W/m<sup>2</sup> y en nuestra región al medio día es posible sobrepasar dicho valor, no se puede determinar de manera exacta el pico máximo, sin embargo, las mediciones tomadas permiten determinar de una manera aproximada el contenido energético diario, con una serie de tiempo más larga que en el caso anterior, lo que a su vez posibilita establecer ciertas características generales del comportamiento de la radiación solar.

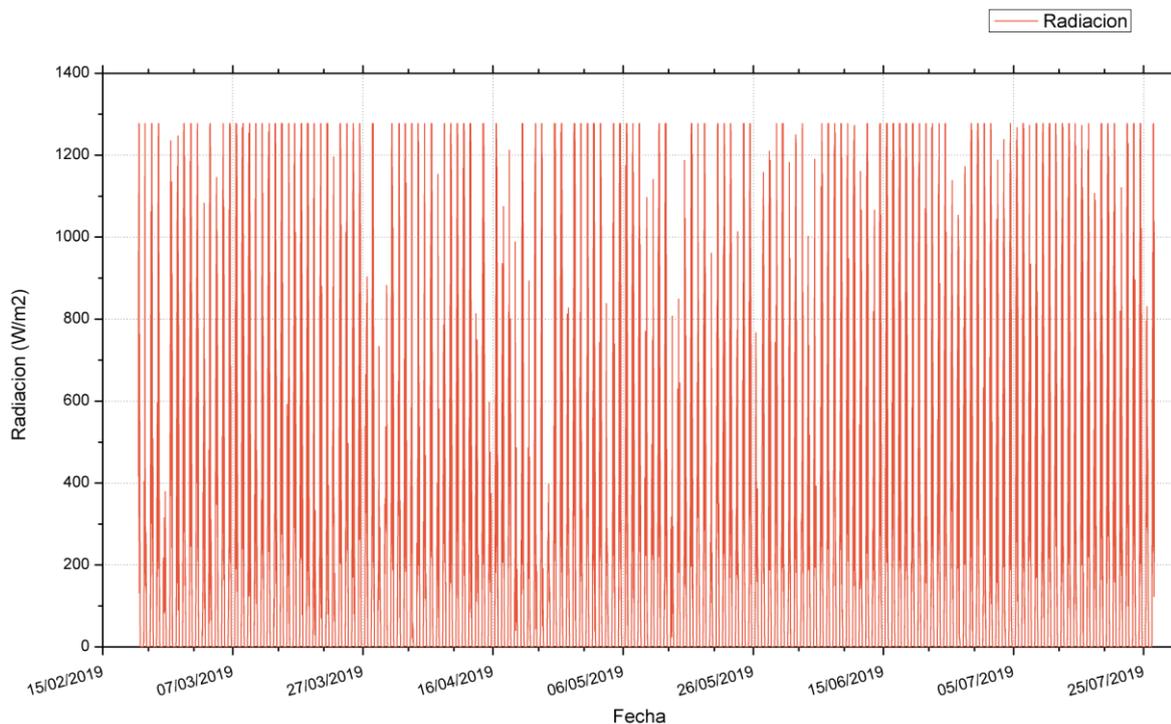


Figura 24. Series de tiempo irradiancia solar sensor HOBO desde febrero a julio del 2019.

Fuente: Autor.

Se realizó un análisis estadístico para examinar y cuantificar las características de los niveles de radiación solar. A partir de las series de tiempo de la Irradiancia Solar se determinaron valores promedios diarios de la radiación solar y se midió la coherencia estadística utilizando criterios de Chauvenet y Z-Score.

Para el tratamiento estadístico de datos se determinan los estimadores más representativos, tales como Media (M), mediana (Md), Mínimo (Mn), Máximo (Mx), Cuartil 1 (Q1), Cuartil 3 (Q3), Rango Intercuartil (Q3-Q1), percentil 5 (P5) y percentil 95 (P95). Se analizaron las series de tiempo de Irradiancia en  $W/m^2$  e Irradiación en  $KWh/m^2$  tomando como referencia promedios diarios totales y mensuales para establecer valores de interés, como se muestra en la TABLA 2. 3.

Se puede establecer a partir del conjunto total de datos que la radiación solar media diaria es aproximadamente  $4.48 KWh/m^2$ , con un máximo de  $7.36 KWh/m^2$  y un mínimo de  $1.99 KWh/m^2$ . Con dichos valores se procede al dimensionamiento del sistema fotovoltaico, con estos datos se puede generar hasta  $1,276W/m^2$  según se observa en la Figura 24 pero por cuestiones económicas se generará  $520W/m^2$ .

TABLA 2. 3. ESTIMADORES ESTADÍSTICOS PARA EL CONJUNTO TOTAL DE DATOS Y MENSUALES.

Sensor de Radiación Solar RK200-03											
Mes	# Datos	Media	Desviación Estandar	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Q3-Q1	P5	P95
Datos Globales											
Total	37	4,15	2,00	4,14	0,00	7,36	2,95	5,57	2,62	0,14	6,94
Datos por mes											
Abril	11	4,38	2,34	3,89	0,18	6,87	2,78	6,57	3,79	1,19	6,85
Mayo	4	3,48	3,18	3,36	0,00	7,21	1,42	5,41	3,99	0,28	6,85
Junio	11	4,15	1,82	3,98	0,74	7,36	3,36	5,06	1,70	1,54	6,76
Julio	11	4,14	1,53	4,39	0,00	6,03	3,92	4,85	0,93	1,81	5,58
Sensor de Radiación Solar ONSET S-LIB-M003											
Mes	# Datos	Media	Desviación Estandar	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Q3-Q1	P5	P95
Datos Globales											
Total	156	4,48	1,16	4,52	1,99	6,71	3,65	5,25	1,60	2,40	6,32
Datos por mes											
Febrero	9	4,54	1,75	4,62	2,00	6,71	2,83	6,10	3,27	2,22	6,64
Marzo	30	4,69	1,14	4,76	2,44	6,57	3,69	5,59	1,90	3,13	6,43
Abril	30	4,22	1,28	4,17	2,03	6,32	3,33	5,12	1,79	2,22	6,27
Mayo	31	4,40	1,33	4,43	1,99	6,71	3,29	5,61	2,32	2,17	6,28
Junio	30	4,50	0,95	4,48	3,03	6,40	3,84	5,08	1,24	3,10	6,22
Julio	26	4,61	0,78	4,64	3,46	6,11	3,83	5,12	1,29	3,58	5,93

Fuente: Autor.

En la Figura 25 se muestra la serie de tiempo de la Radiación Solar diaria media, ubicándose el promedio en alrededor de 4.48 KWh/m<sup>2</sup>. Esta estabilidad nos revela precisamente la singularidad del estudio al realizarse en una zona muy próxima a la línea ecuatorial, por tanto, no se aprecian variaciones considerables respecto a las estaciones del año.

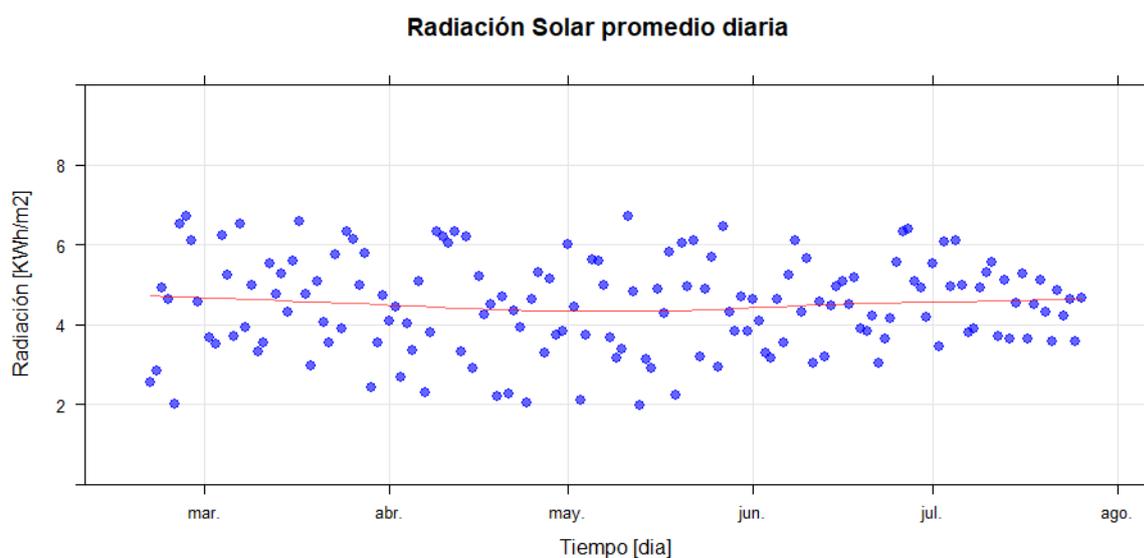


Figura 25. Radiación solar diaria desde febrero hasta julio del 2019.

Fuente: Autor.

En la Figura 26, se muestra el histograma de frecuencias. En esta gráfica se observa que la mayor concentración de datos esta entre 3.5-4.0, 4.5-5.0 y 6.0-6.5 KWh/m<sup>2</sup>. Cabe indicar que estos valores han sido determinados a partir de las mediciones realizadas por el sensor HOBO S-LIB-M003, por tanto, pueden verse ligeramente afectadas debido a la saturación presente alrededor de la media diaria para días con bastante recurso solar, sin embargo, son un buen referencial al ser comparados por los proporcionados por el sensor RIKA200-03.

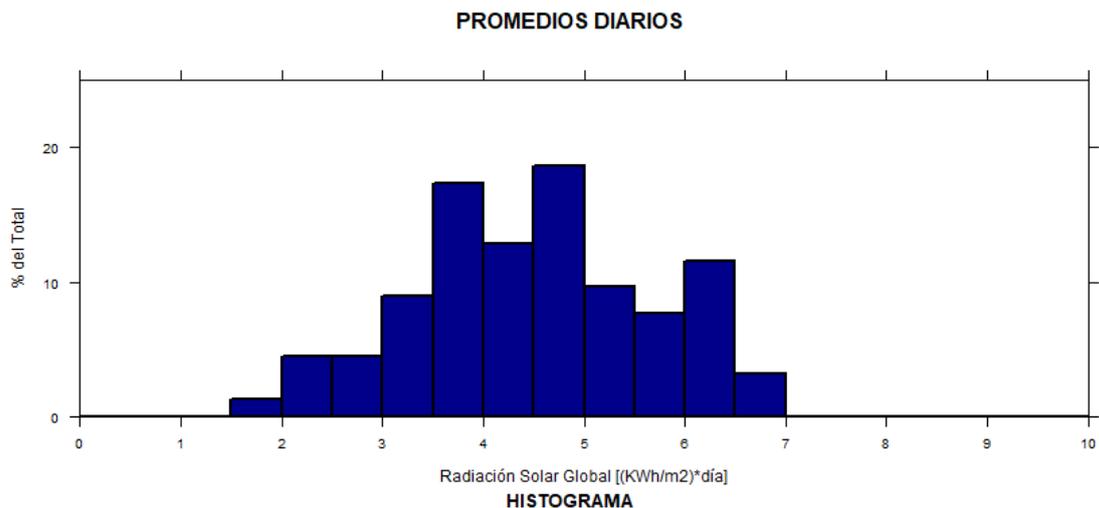


Figura 26. Histograma de la radiación solar diaria media desde febrero hasta julio del 2019.

Fuente: Autor.

## 2.5.2. Cálculos y dimensionamiento de la instalación fotovoltaica

El dimensionamiento de la instalación solar fotovoltaica llevada a cabo, entre otras cosas, se enfoca en la micro generación con conexión a la red para autoconsumo parcial de electricidad en el edificio de CIELE. El criterio de diseño es maximizar la energía generada por el sistema y que la instalación dependa menos de la red.

### 2.5.2.1. Ángulo de inclinación y orientación del módulo fotovoltaico

La posición del sol varía a lo largo del día y del año, es por esta razón que se debe determinar un ángulo óptimo de inclinación y orientación de los paneles que será un valor constante y que dependerá de la latitud, para así obtener la mayor cantidad de energía solar.

#### - **Determinación de la orientación de los paneles**

La instalación fotovoltaica está ubicada a una latitud norte 0.35° y longitud oeste -78.11°, tal como se indica en la TABLA 2.1. Por tal motivo los paneles se deben ubicar con un azimut de 180° con respecto al norte, es decir, se deben orientar hacia el sur. De esta manera se obtiene el máximo rendimiento de los módulos fotovoltaicos, ya que recibe una mayor

cantidad de energía solar cuando el sol alcanza el punto más alto de su recorrido al medio día (Alvarez, 2017).

- **Determinación de la inclinación de los paneles**

Para determinar la inclinación óptima de una superficie fija se puede utilizar la Ecuación (2. 1), basada en análisis estadísticos de radiación solar anual sobre superficies con diferentes inclinaciones situadas en lugares de diferentes latitudes:

$$\beta_{opt} = \emptyset \pm 10 \quad (2. 1)$$

$$\beta_{opt} = 0,35 + 10$$

$$\beta_{opt} = 10,35^\circ$$

Donde:

$\beta_{opt}$  = Es la inclinación óptima para los paneles solares

$\emptyset$  = Es la latitud del lugar

$\pm 10$  = Invierno (+) o Verano (-)

La Ecuación (2. 1) es válida para aplicaciones de utilización anual que busquen la máxima captación solar a lo largo del año. Para determinar el ángulo de inclinación de los paneles solares se lo realiza mediante la fórmula mencionada anteriormente, obteniendo así una inclinación de  $10,35^\circ$  sobre la horizontal con dirección Norte – Sur, para asegurar mayor impacto de la radiación y a la vez a que el agua de las lluvias se drene fácilmente lavando los polvos o sólidos impregnados por suspensión en el aire.

### **2.5.2.2. Características de la estructura soporte**

Los paneles solares irán fijados a una estructura soporte de acero galvanizado (Figura 27), la cual es una estructura metálica especialmente diseñada para facilitar el montaje de los módulos fotovoltaicos, para su construcción se empleó el metal, ya que es un material ligero y capaz de soportar pesos enormes.

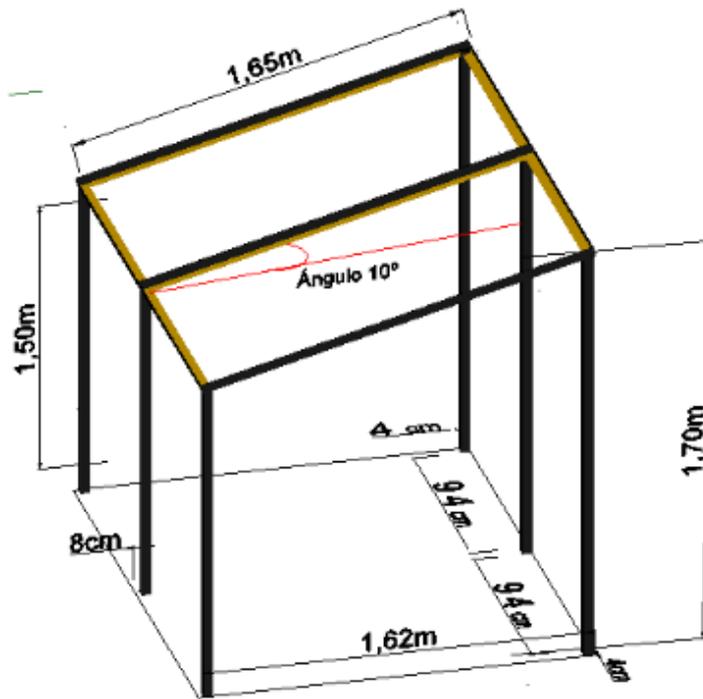


Figura 27. Estructura soporte.  
Fuente: Autor.

En la Figura 27 se presenta la estructura de los paneles, la cual será la base de apoyo del módulo fotovoltaico. La estructura solar es de acero galvanizado por su gran resistencia y alta fiabilidad. Se construyó de 1,70m de altura, ya que se instalará cerca de una turbina eólica, la cual tiene la misma altura, esto se hace para evitar posibles sombras que puedan afectar al sistema fotovoltaico y cuenta con una inclinación de 10° para su fácil mantenimiento.

### 2.5.2.3. Dimensionamiento de los paneles solares

La instalación será de 520 W<sub>p</sub> el cual constará de 2 paneles fotovoltaicos, contando cada uno de ellos con una potencia pico de 260 W<sub>p</sub>. Además, cabe recalcar que el generador fotovoltaico no se ha dimensionado en función de las necesidades energéticas del edificio, si no que el diseño está condicionado a conseguir la máxima producción posible.

#### - **Cálculo del número de módulos fotovoltaicos**

El número de paneles a instalar se calcula teniendo en cuenta que se desea tener una instalación híbrida con una potencia de 1kW, en la cual el sistema fotovoltaico aportará con 520 W<sub>p</sub> y lo restante será aportado por el sistema eólico. Considerando las especificaciones técnicas del módulo FV se procede con el cálculo respectivo utilizando la Ecuación (2. 2).

$$N_p = \frac{P_i}{P_p} \quad (2. 2)$$

$$N_p = \frac{520 \text{ Wp}}{260 \text{ Wp}} = 2 \text{ paneles}$$

Donde:

$N_p$  = Número total de paneles fotovoltaicos.

$P_i$  = Potencia de la instalación.

$P_p$  = Potencia pico de cada panel.

De acuerdo con el cálculo realizado se tiene que utilizar 2 paneles solares para cubrir la carga que se desea instalar, con esto se cubrirá un 15% del total de la carga del edificio de la carrera de Electricidad.

- **Conexión de los módulos fotovoltaicos**

Para determinar la conexión en paralelo de los módulos fotovoltaicos se calcula con la Ecuación (2. 3).

$$N_{PARALELO} = \frac{N_P}{N_{SERIE}} \tag{2. 3}$$

$$N_{PARALELO} = \frac{2}{1} = 2$$

Donde:

$N_{PARALELO}$  = Número de módulos en paralelo

$N_P$  = Número total de paneles fotovoltaicos

$N_{SERIE}$  = Número de módulos en serie

Así pues, conectaríamos 2 ramas en paralelo con un panel por rama, ya que se procura mantener el voltaje y aumentar la corriente, de tal manera se obtiene mayor potencia.

**2.5.2.4. Dimensionamiento del inversor con conexión a red**

Para el dimensionamiento del inversor se utilizará la Ecuación (2. 4), la cual consta de la potencia de la instalación fotovoltaica y un factor de seguridad.

$$P_{inversor} = 1,25 * P_i [W] \quad (2.4)$$

$$P_{inversor} = 1,25 * 520W = 650 [W]$$

Donde:

$P_{inversor}$  = Potencia adecuada del inversor.

Factor de seguridad = 1,25

$P_i$  = Potencia de la instalación

Se eligió utilizar 3 inversores monofásicos de 300 W cada uno, con estos dispositivos se obtendrá un sistema trifásico. El valor de la potencia total de los 3 inversores (900 W) es mayor que la potencia total de los 2 paneles fotovoltaicos y el aerogenerador eólico por lo que el número de inversores es el adecuado para el sistema híbrido.

#### 2.5.2.5. Dimensionamiento del sistema de acumulación

Para el dimensionamiento del sistema de baterías, se calculó de la siguiente manera:

- **Se cálculo el rendimiento de la batería con la Ecuación (2. 5).**

$$\eta_B = 100\% - k_b \quad (2.5)$$

$$\eta_B = 100\% - 05\%$$

$$\eta_B = 95\%$$

Donde:

$\eta_B$  = Rendimiento de la batería

$k_b$  = Pérdidas de rendimiento del acumulador

- **Capacidad de acumulación de la batería  $Q_{Ah}$  se obtuvo mediante la Ecuación (2. 6).**

$$Q_{Ah} = \frac{E_T}{V_{BAT}} [Ah] \quad (2.6)$$

$$Q_{Ah} = \frac{21.76kWh}{12} = 1,813[Ah]$$

Donde:

$Q_{Ah}$  = Capacidad de acumulación de la batería

$E_T$  = Energía o demanda total

$V_{BAT}$  = Voltaje de la batería

Es importante mencionar que solo se utilizará una batería, ya que no se pretende tener días de autonomía, sino proteger al sistema, es decir estabilizarlo cuando se presenten variaciones de voltaje. Se ha seleccionado una batería con capacidad de 102 Ah, la cual almacenara un 5.62% de la demanda total del edificio de la carrera.

#### **2.5.2.6. Dimensionamiento del regulador**

Se debe calcular el valor de la corriente del regulador con la Ecuación (2. 7), para lo cual se requiere la corriente de cortocircuito de cada panel y el número de paneles.

$$I_R = I_{SC} * Np * 1.25 [A] \tag{2. 7}$$

$$I_R = 9.01A * 2 * 1.25$$

$$I_R = 22.52 A$$

Donde:

$I_R$  = Corriente del regulador

$I_{SC}$  = Corriente de cortocircuito

$Np$  = Número de paneles

Factor de seguridad = 1.25

### 2.5.2.7. Dimensionamiento de los conductores

Para calcular el calibre del conductor, sea en  $mm^2$  o AWG primero se calcula la caída de tensión con la Ecuación (2. 8). En el Anexo B, se muestra el procedimiento y resultados respectivos.

$$\Delta V = R * l * I \quad (2. 8)$$

Donde:

$\Delta V$  = Caída de tensión entre los extremos de los conductores.

$R$  = Resistencia del conductor en  $[\Omega/m]$ .

$l$  = Longitud entre componentes en  $[m]$ .

$I$  = Corriente  $[A]$ .

Para calcular el porcentaje de caída de tensión en los conductores se utiliza la Ecuación (2. 9) como se indica a continuación. En el Anexo B, se muestra el procedimiento y resultados respectivos.

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V}{V_n} * 100 \quad (2. 9)$$

Donde:

$\Delta V\%$  = Porcentaje de caída de tensión.

$\Delta V$  = Caída de tensión entre los extremos de los conductores.

$V_n$  = Voltaje nominal.

#### - **Cálculo de las secciones de las líneas de corriente continua**

El cableado de continua circulará sobre la azotea, a la intemperie y fijado al muro del edificio y llegará hasta los inversores situados dentro del Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Por estar a la intemperie se debe tener en cuenta que tiene que ser protegido contra los rayos ultravioleta, ya que podría alcanzar altas temperaturas.

Para el dimensionamiento de los conductores se requiere las distancias entre cada uno de los componentes, con lo cual se considerará la capacidad de corriente de conductores. La corriente del regulador se usará en las conexiones: Panel – disyuntor DC, disyuntor DC – regulador y regulador – batería (Ver TABLA 2. 4).

La conexión batería – barra DC y barra DC - inversores, se considerará la mediante la Ecuación (2. 10).

$$I_{inversor} = \frac{P_{carga AC}}{V_{Batería}} \quad (2. 10)$$

$$I_{inversor} = \frac{520}{12} = 43.33 A$$

- **Cálculo de las secciones de las líneas de corriente alterna**

El recorrido de la línea de alterna se lo realizará lo más corto y rectilíneo posible. El trayecto del cableado será desde los inversores hasta las barras de generación en corriente alterna.

La conexión Inversores – Disyuntor AC y Disyuntor AC – Barras AC se considerará mediante la Ecuación (2. 11).

$$I_{carga AC} = \frac{P_{carga AC}}{V_{AC}} \quad (2. 11)$$

$$I_{carga AC} = \frac{520}{120} = 4.33 A$$

En la TABLA 2. 4 se resume los cálculos realizados y el calibre del conductor seleccionado para emplearse en los diferentes tramos de la instalación fotovoltaica. Además, se debe considerar que las caídas de tensión no sobrepasen los límites establecidos, para lo cual las caídas de voltaje que se tienen entre los equipos instalados serán las siguientes.

TABLA 2. 4. CAÍDAS DE TENSIÓN EN CONDUCTORES.

	Distancia [m]	Número conductores	AWG	Resistencia [Ω/m]	Corriente [A]	Voltaje [V]	$\Delta V$ %	Límite permitido
Paneles – Disyuntor DC	20	2	10	5,26	22,52	12	1,97	< 3%
Disyuntor DC - Regulador	0,5	2	10	5,26	22,52	12	0,04	< 3%
Regulador - Batería	2	2	10	5,26	22,52	12	0,19	< 1%
Batería – Barra DC	2	2	6	1,32	43,33	12	0,09	< 1%
Inversores – Disyuntor AC	1	4	14	8,17	4,33	120	0,02	< 5%
Disyuntor AC – Barras AC	1	4	14	8,17	4,33	120	0,02	< 5%

Fuente: Autor

En la TABLA 2. 4 se muestra el calibre de conductor adecuado para la instalación fotovoltaica en el tramo de corriente continua. Desde los paneles hasta los inversores en DC de acuerdo con los cálculos realizados se ha empleado un calibre 10 AWG tipo THHN. Es importante mencionar que en el tramo de generación desde los paneles hasta el disyuntor DC se ha utilizado un calibre 6 AWG tipo SGT-6 SAE J1127, ya que estará a la intemperie y este conductor tiene un aislamiento de PVC resistente a altas temperaturas. También se ha empleado el calibre 6 AWG en el tramo de la batería hasta la Barra DC, ya que en esta sección se realiza almacenamiento de energía por lo que existen corrientes elevadas.

En el tramo de corriente alterna desde los inversores en AC hasta la Barra AC de acuerdo con los cálculos realizados se utilizará el calibre 14 AWG tipo THHN. Es importante mencionar que se ha utilizado un calibre 10 AWG, ya que este es recomendado para instalaciones en lugares donde se requiere una mayor temperatura ambiente, resistencia mecánica y extraflexibilidad en la instalación.

### 2.5.2.8. Protecciones

#### - **Cálculo de las protecciones en la red de corriente continua**

En la parte de corriente directa se tiene un interruptor general de continua integrado en el inversor por lo que podría ser suficiente con instalar un fusible para proteger contra sobreintensidades, sin embargo, se utilizará un interruptor termomagnético que protegerá tanto de sobreintensidades como sobretensiones, además de poder realizar cortes en carga de la línea con seguridad.

Las protecciones que se emplearan en la sección de DC será un interruptor termomagnético de 32 A, ya que la corriente máxima de generación es de 22,52 A, además la protección debe contar con una corriente nominal de al menos 1.25 mayor a la corriente de cortocircuito. El interruptor se instalará entre el módulo fotovoltaico y el controlador de carga, para comprobar su correcto dimensionamiento se utiliza la Ecuación (2. 12).

$$I_{max} = I_{sc} * 1.25 \quad (2. 12)$$

$$I_{max} = 18.02 * 1.25$$

$$I_{max} = 22.52 \text{ A}$$

Donde:

$I_{max}$  = Corriente máxima que soportar.

$I_{sc}$  = Corriente de cortocircuito de cada panel solar.

Factor de seguridad = 1.25

#### - **Cálculo de las protecciones en la red de corriente alterna.**

Para evitar sobreintensidades que puedan dañar el circuito se instalará en el cuadro de salida de alterna una protección magnetotérmica. El interruptor será de accionamiento manual. Este dispositivo protege frente a sobrecargas y sobreintensidades, permitiendo separar la instalación fotovoltaica de la red eléctrica para trabajos de mantenimiento.

El valor de la intensidad normal de funcionamiento que circulará por el tramo vendrá dado por la potencia máxima que el inversor puede entregar a la red, que es de 900W y la tensión a la cual se realizará la conexión 120V, teniendo en cuenta que el factor de potencia proporcionado por las instalaciones solares fotovoltaicas debe ser igual a la unidad. Para dimensionar el correcto funcionamiento del interruptor magnetotérmico se utiliza la Ecuación

(2. 13). Dicho interruptor tendrá una intensidad nominal de 10 A entre los inversores y el punto de conexión a la red de baja tensión, ya que en el mercado local no existen interruptores de 5.41 A.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos\varphi} * 1.25 \quad (2. 13)$$

$$I = \frac{900}{\sqrt{3} \cdot 120 \cdot 1} * 1.25 = 5.41 \cong 10$$

### 2.5.2.9. Estimación de pérdidas del sistema fotovoltaico

En la TABLA 2. 5 se muestran los datos de estimación de pérdidas del sistema fotovoltaico que se implementará en el edificio de la carrera de Ingeniería en Electricidad.

TABLA 2. 5. COEFICIENTES DE PÉRDIDAS DEL SISTEMA.

Pérdidas de rendimiento del acumulador	kb	0,05
Coeficiente de pérdidas del inversor	kc	0,005
Coeficiente de pérdidas por calor	kv	0,15
Coeficiente por autodescarga	ka	0,005
Número de días de autonomía	N	1
Profundidad de descarga	Pd	0,5

Fuente: Autor

### 2.5.2.10. Rendimiento global de la instalación fotovoltaica

Mediante la Ecuación (2. 14) se obtiene el valor de rendimiento global estimado de la instalación fotovoltaica.

$$R_G = (1 - k_b - k_c - k_v) * \left(1 - \frac{k_a * N}{P_d}\right) \quad (2. 14)$$

$$R_G = (1 - 0,05 - 0,005 - 0,15) * \left(1 - \frac{0,005 * 1}{0,5}\right)$$

$$R_G = 78 \%$$

Donde:

$R_G$  = Rendimiento global de la instalación fotovoltaica.

$k_b$  = Pérdidas de rendimiento del acumulador.

$k_c$  = Coeficiente de pérdidas del inversor.

$k_v$  = Coeficiente de pérdidas por calor.

$k_a$  = Coeficiente por autodescarga.

$P_d$  = Profundidad de descarga.

$N$  = Número de días de autonomía.

### 2.5.2.11. Selección de los equipos del sistema fotovoltaico.

En la TABLA 2. 6 se muestra los equipos utilizados en el diseño e implementación del sistema de generación fotovoltaica con conexión a la red eléctrica, también se indican las características técnicas de los mismos equipos (Ver Anexo C).

TABLA 2. 6. EQUIPOS EMPLEADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
Paneles solares policristalinos	El módulo de la serie de células DHP60 de DAH Solar es un módulo sin PID bajo la condición de 85°C / 85% RH. Puede utilizarse para todas las aplicaciones, incluidas las centrales eléctricas civiles y comerciales (Ver Anexo C1).	Potencia máxima (Pmax): 260W Voltaje de circuito abierto (Voc): 38.1V. Voltaje máximo de potencia (Vmp): 30.6V. Corriente de cortocircuito (Isc): 9.01A
Regulador de carga solar MPPT	Es un controlador de carga MPPT compatible con PWM, es inteligente, eficiente y tiene ahorro de energía. Tiene una eficiente función de carga de controlador MPPT para rastrear automáticamente el punto de máxima potencia (Ver Anexo C2).	Corriente máxima de potencia: 60A Potencia máxima del panel solar: 800W. Configuración de capacidad de batería: 600Ah.

Batería de ácido de plomo	Las baterías Genesis TD incorporan características de diseño seleccionadas para el usuario consciente del costo, al tiempo que conserva un rendimiento superior en peso y volumen (Ver Anexo C3).	Rango de capacidad: 50 – 150Ah. Voltaje nominal: 12V. Capacidad de la batería: 102Ah. Vida útil: 15 años a 20°C.
Inversores con conexión a red	El inversor Grid Tie Inverter tiene la función MPPT y APL y ajusta automáticamente los paneles solares de máxima potencia. Cuando la red pública falla o está apagada, el inversor utilizará la protección anti-isla para apagar el sistema automáticamente (Ver Anexo C4).	Potencia de entrada máxima de CC: 400W. Potencia de salida de AC: 300W Rango de voltaje CC: 10.5 - 30 VDC. Rango de voltaje AC: 90–140 / 180~260 VAC.

Fuente: (DAH Solar, 2019); (Y-SOLAR, 2019); (EnerSys, 2019); (inverter.com, 2019).

### 2.5.3. Diseño del sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica

Una vez conocido los parámetros del rendimiento requerido, especificaciones técnicas y las características de cada uno de los equipos se realizó el diseño del sistema fotovoltaico con conexión a la red eléctrica mediante el software AutoCad, en el cual destacan las conexiones eléctricas; de módulos fotovoltaicos, disyuntores, controladores de carga, batería, inversores y analizadores de red (Ver Anexo D).

## CAPÍTULO 3

### Implementación de un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica

#### 2.1. Puesta en marcha del sistema de generación solar fotovoltaica

La implementación del sistema fotovoltaico debe ejecutarse de tal forma que el sistema sea seguro, confiable y eficiente. A continuación, se describe el procedimiento a seguir para la instalación del sistema fotovoltaico, además se diseñó en AutoCad el posicionamiento de los equipos que conforman el tablero eléctrico (Figura 28).

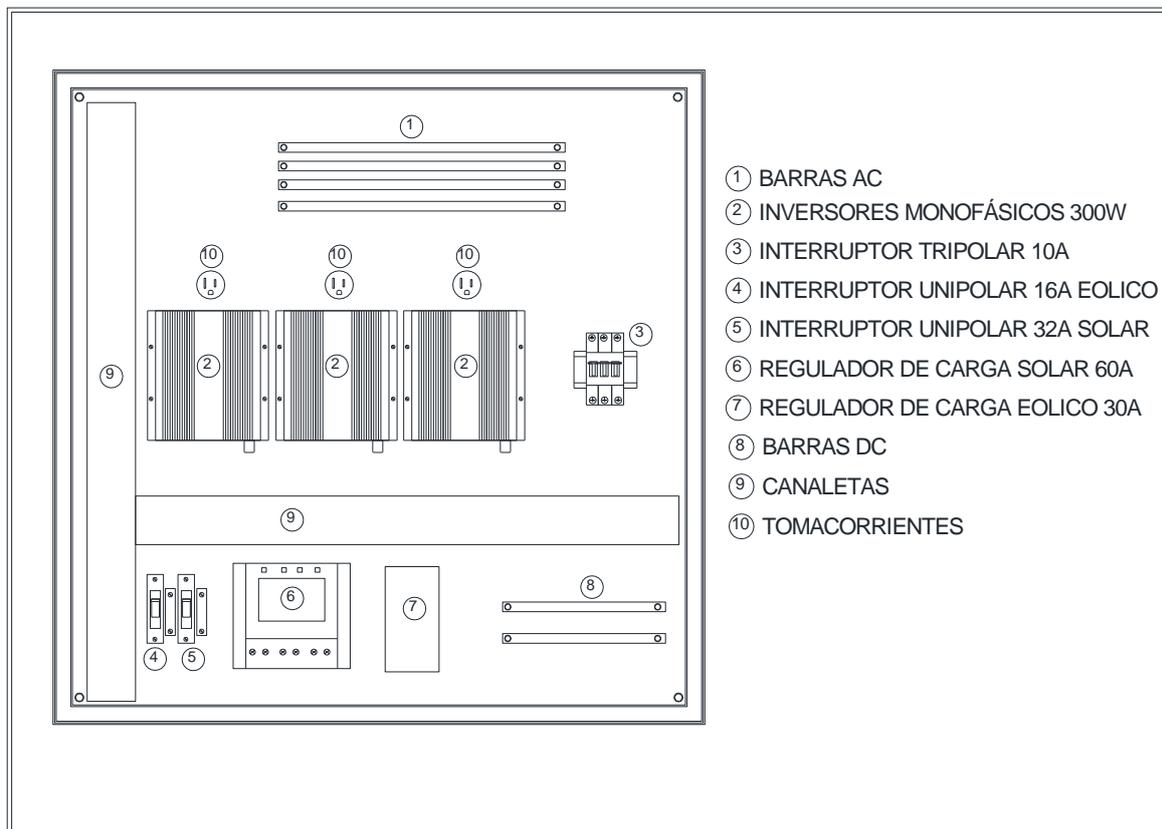


Figura 28. Diseño de posición de equipos.

Fuente: Autor.

#### 2.1.1. Recepción e inspección de los equipos

Se recibieron los equipos provenientes de Estados Unidos y Chile, entre estos se encuentran los 3 inversores, los 2 paneles fotovoltaicos, los 2 reguladores de carga, una

batería y una turbina eólica. También se ha verificado el número, el estado y los modelos de cada equipo. (Figura 29).



Figura 29. Recepción e inspección de los equipos.

Fuente: Autor.

### 2.1.2. Construcción de la estructura y montaje de los paneles solares

Se inspeccionó todo el proceso de construcción de la estructura soporte y se realizó el correcto montaje de los paneles fotovoltaicos. También se verificó que la estructura cumpliera con el diseño propuesto y que los paneles estuvieran bien ubicados, de acuerdo con los cálculos realizados en el capítulo anterior los paneles tienen un ángulo de inclinación de  $10^\circ$  y una orientación de Norte a Sur (Figura 30). También se realizó la instalación del cableado de generación, el cual llega hasta el tablero de control que está ubicado en la parte interior del Laboratorio de Máquinas Eléctricas en el Edificio CIELE.



Figura 30. Construcción de la estructura y montaje de los paneles solares.

Fuente: Autor.

### 2.1.3. Conexión de los paneles solares

Se realizó la conexión en paralelo de los paneles solares, utilizando conectores tipo MC4, tomando como base el diseño expuesto en el presente trabajo (Figura 31). Además, una vez realizado las conexiones correctamente del panel, se procedió con la conexión paneles – regulador, es decir, conectar los cables de los paneles a las entradas del regulador, positivo – positivo y negativo – negativo.



Figura 31. Conexión eléctrica de los paneles solares.

Fuente: Autor.

#### 2.1.4. Colocación de canaletas en el tablero de control

Una vez ya conectados los paneles solares en paralelo, se procede al montaje de canaletas en la placa interna del tablero (Figura 32), haciendo sus respectivas perforaciones y ajustes.



Figura 32. Posición de las canaletas.  
Fuente: Autor.

#### 2.1.5. Instalación las protecciones de DC (Interruptor termomagnético de 1x32 A).

El interruptor termomagnético en DC cumple la función de proteger de cortocircuitos y sobrecargas a la instalación fotovoltaica. Se instaló un interruptor de marca SIEMENS (Figura 33).



Figura 33. Interruptor Térmico-magnético de 32A.  
Fuente: Autor.

### 2.1.6. Instalación del regulador de carga solar

Para colocar el regulador en el tablero de control, se verificó que debe ir ubicado de tal forma que exista espacio suficiente para poder realizar el cableado adecuadamente. Se colocó el regulador de carga en la plancha del tablero y se ajustó firmemente con los pernos (Figura 34). Posteriormente se realizó la conexión entre el regulador y la batería, para lo cual igualmente se conectó, positivo con positivo y negativo con negativo, en las conexiones del regulador como en los terminales de la batería.



Figura 34. Instalación del regulador de carga solar.

Fuente: Autor.

### 2.1.7. Instalación y conexión de batería de 12V DC

La batería se instaló en el laboratorio de Máquinas Eléctricas al igual que los demás equipos, donde no llegan los rayos del sol y tampoco llega la lluvia (Figura 35). Una vez instalada la batería y conectadas las borneras, los extremos libres se conectan al controlador de carga. El inversor también se conectó a la batería para protegerle de descargas profundas mediante una barra DC.



Figura 35. Instalación de la batería solar con el regulador de carga.  
Fuente: Autor.

### 2.1.8. Instalación de las Barras DC

Una vez ya montado el interruptor DC, la batería y el regulador de carga, se procede al montaje de las barras DC para su posterior conexión con todos los equipos que funcionan con corriente directa a 12V (Figura 36). También se pintó dichas barras para su respectiva identificación fase (rojo) y neutro (blanco).



Figura 36. Instalación y pintado de Barras DC.  
Fuente: Autor.

### 2.1.9. Instalación y conexión del inversor

Se montaron los inversores al tablero eléctrico, las entradas de DC se conectaron en paralelo con la Barra DC, ya que en esa parte se maneja 12VDC. La salida de los inversores se conectó en paralelo con la Barra AC, ya que en esa parte se manejan 120VAC (Figura 37).



Figura 37. Instalación de los inversores.

Fuente: Autor.

#### 2.1.10. Instalación de tomacorrientes

Previo a la instalación de los tomacorrientes, es necesario realizar el cableado de los inversores. Se pasó los conductores por los bornes posteriores y se ajustó adecuadamente. Por último, se conectó las tapas de los tomacorrientes y se ajustó a la plancha del tablero (Figura 37).



Figura 38. Instalación de tomacorrientes.

Fuente: Autor.

### 2.1.11. Instalar las protecciones de AC (Interruptor termomagnético de 3x10 A).

El interruptor termomagnético en AC cumple la función de proteger de cortocircuitos y sobrecargas a la instalación eléctrica. Se instaló un interruptor de marca CAMSCO y modelo C60K-63 (Figura 39).



Figura 39. Interruptor Térmico-magnético de 10A.  
Fuente: Autor.

### 2.1.12. Montaje del tablero de generación

Se instaló el tablero DC y AC, donde se conectarán los paneles solares con los inversores, los inversores con la red pública de baja tensión y con las cargas del edificio de CIELE. (Figura 40). Durante la instalación del tablero, se tuvo en consideración el fácil acceso y seguridad del usuario, al momento de operar los dispositivos.



Figura 40. Montaje del tablero e instalación de los equipos.  
Fuente: Autor.

### 2.1.13. Conexión de generación fotovoltaica con la red eléctrica de distribución

La conexión de generación híbrida con la red pública de distribución se la realizó mediante una Barra AC. El equipo que hace posible esta integración es el inversor, el cual es el encargado de igualar los parámetros eléctricos entre estas dos fuentes eléctricas (Figura 41).



Figura 41. Conexión de generación eléctrica con la red de distribución.

Fuente: Autor.

## 2.2. Presupuesto

En la TABLA 3. 1 se muestra el presupuesto invertido en la implementación del sistema híbrido solar-eólico.

TABLA 3. 1. PRESUPUESTO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
3	Inversores con conexión a red 300W	\$ 85.00	\$ 255.00
2	Paneles solares policristalinos 260W	\$ 150.00	\$ 300.00
1	Batería Ciclo Profundo 102Ah	\$ 200.00	\$ 200.00
1	Regulador de carga solar 60A	\$ 84.00	\$ 84.00
1	Regulador de carga eólico 30A	\$ 61.53	\$ 61.53

1	Tablero metálico SBOX 80x80x30cm	\$ 99.88	\$ 99.88
1	Breaker Riel CSC 3P 10A	\$ 6.10	\$ 6.10
1	Breaker Riel Din 1P 40A	\$ 10.36	\$ 10.36
1	Conjunto eléctrico (cable, platina de cobre, aisladores, etc.)	\$ 44.73	\$ 44.73
1	Micro generador eólico eje vertical 250W	\$ 2,907.47	\$ 2,907.47
<b>VALOR TOTAL (USD)</b>			<b>\$ 3.967,07</b>

Fuente: Autor

### 2.3. Pruebas de funcionamiento del sistema fotovoltaico

Luego de realizar todas las instalaciones se procede con las pruebas de funcionamiento, estas son necesarias para comprobar el correcto funcionamiento de los equipos instalados en el sistema fotovoltaico.

#### 2.3.1. Módulo Fotovoltaico

En los paneles fotovoltaicos se midió el voltaje en los terminales, cuando estos están expuestos a una radiación solar suficiente para obtener valores de voltaje semejantes a los datos de placa (Figura 42).



Figura 42. Mediciones de voltaje en circuito abierto.

Fuente: Autor.

En la Figura 42 se muestran mediciones de voltaje en circuito abierto (Voc), dando como resultado 35.51V que son similares a los de la placa de datos del módulo fotovoltaico. En conclusión los módulos funcionan correctamente.

### 2.3.2. Regulador de carga solar

Se revisó el funcionamiento de los paneles y también se visualizó el estado de la batería desde el regulador, para ello se utilizó un multímetro colocando las puntas respectivas en la conexión que tiene el regulador de carga con los cables provenientes de los paneles solares o a su vez mirando la pantalla del mismo controlador (Figura 43).



Figura 43. Revisión de funcionamiento en paneles y batería.

Fuente: Autor.

En la Figura 43 se muestran los valores de voltaje y corriente, se puede observar datos de paneles solares y datos de la batería. Se puede concluir que estos dos equipos funcionan correctamente.

### 2.3.3. Batería

Utilizando un multímetro, se seleccionó la variable voltaje en corriente continua (DC) y lo ubicamos en un rango de 20VDC. Por último, se midió el voltaje de la batería, lo cual se puede hacer directamente en los bornes de la batería o en los terminales del regulador de carga conectados al acumulador (Figura 44).



Figura 44. Prueba de voltaje en batería.

Fuente: Autor.

En la Figura 44 se muestra la prueba de funcionamiento de la batería, la cual consiste en medir el voltaje en sus terminales. El resultado es de 11.38V, el cual significa que funciona correctamente, ya que sigue cargándose paulatinamente mediante los paneles solares.

#### 2.3.4. Inversor con conexión a red

Para verificar el funcionamiento del inversor, hay que medir el voltaje y la frecuencia a la salida del inversor, si estos parámetros están dentro del rango de operación, el inversor funciona correctamente (Figura 45).

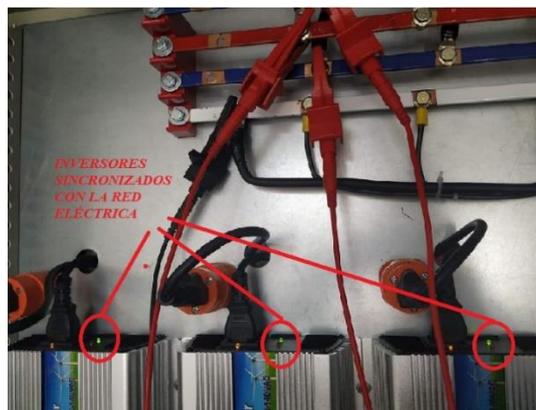


Figura 45. Prueba de funcionamiento del inversor.

Fuente: Autor.

En la Figura 45 se muestran los tres inversores conectados en paralelo, de esta manera se configura un sistema trifásico. En la prueba de funcionamiento los inversores se energizan tanto en DC como en AC. Se pueden observar los leds indicadores de color verde encendidos,

esto significa que están sincronizados con la red de distribución tanto en voltaje como en frecuencia.

## 2.4. Resultados

Para obtener la información referente al funcionamiento del sistema fotovoltaico implementado, se realizó la lectura de los datos registrados por el regulador de carga solar, los que corresponden a: porcentaje de carga de la batería (%), temperatura del sistema (°C), voltaje de la batería (Vcc), voltaje de generación los paneles solares (Vcc), corriente generada por los paneles (A), corriente de recarga de la batería (A), corriente de consumo (A) y potencia generada (W).

Mediante la utilización de un multímetro se realizó la comprobación de los valores de voltaje y corriente para comprobar el funcionamiento del sistema fotovoltaico. En la TABLA 3. 2 se muestra los valores obtenidos por el regulador de carga solar. Estas mediciones se realizaron el día 9 de diciembre del 2019.

TABLA 3. 2. DATOS OBTENIDOS POR EL REGULADOR DE CARGA.

<b>Hora</b>	<b>% Carga Batería</b>	<b>V. Bat (V)</b>	<b>I. Carga Bat. (A)</b>	<b>Generador FV (V)</b>	<b>Generador FV (A)</b>	<b>I. Consumo (A)</b>
10:00	100	12,48	17,84	34,77	20,67	18,49
11:00	99	12,46	17,76	34,57	20,80	18,94
12:00	98	12,47	17,97	34,75	22,17	20,53
13:00	97	12,47	16,40	34,40	19,13	19,15
14:00	96	12,44	13,13	34,17	14,77	18,10
15:00	94	12,24	4,52	33,95	4,77	16,20
16:00	95	12,18	4,9	34,8	5	15,57
<b>Promedio</b>	97	12,39	13,21	34,48	15,33	18,14
<b>Máximo</b>	100	12,48	17,84	34,8	22,17	20,53
<b>Mínimo</b>	94	12,18	4,52	33,95	5	15,57

Fuente: Autor

### 2.4.1. Gráficas de los datos registrados por el regulador de carga

Las siguientes gráficas fueron realizadas mediante el software Matlab utilizando los datos registrados por el regulador de carga solar. Las mediciones se hicieron en la parte de DC, cada 5 minutos para obtener resultados más precisos, con ayuda de una piza amperimétrica. Las mediciones se realizaron en un día despejado con una fuerte insolación, lo que ayudó a conocer cuál es la generación total del sistema fotovoltaico en condiciones favorables.

#### - **Porcentaje de carga de la batería**

En la Figura 46 se muestra el estado de carga de la batería, está expresado en (%): el máximo valor registrado es 100%, el mínimo 94% y con un valor promedio de 97%. Esto significa que con una radiación solar constante, la batería se mantiene en carga profunda.

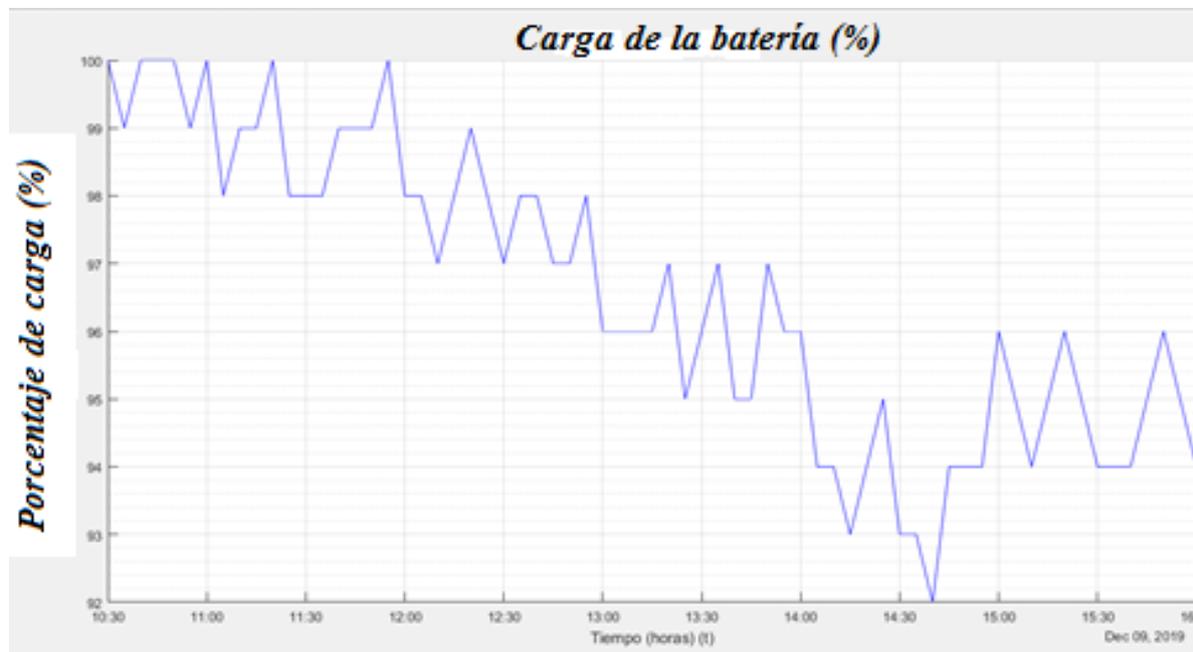


Figura 46. Porcentaje de carga de la batería.

Fuente: Autor.

#### - **Voltaje de la batería**

En la Figura 47 se muestra el voltaje de la batería, expresado en (Vcc). El máximo valor registrado es 12,48 Vcc, el mínimo es 12,18 Vcc y un promedio de 12,39 Vcc. Estos valores significan que la batería está funcionando normalmente, sin ningún tipo de fallas.

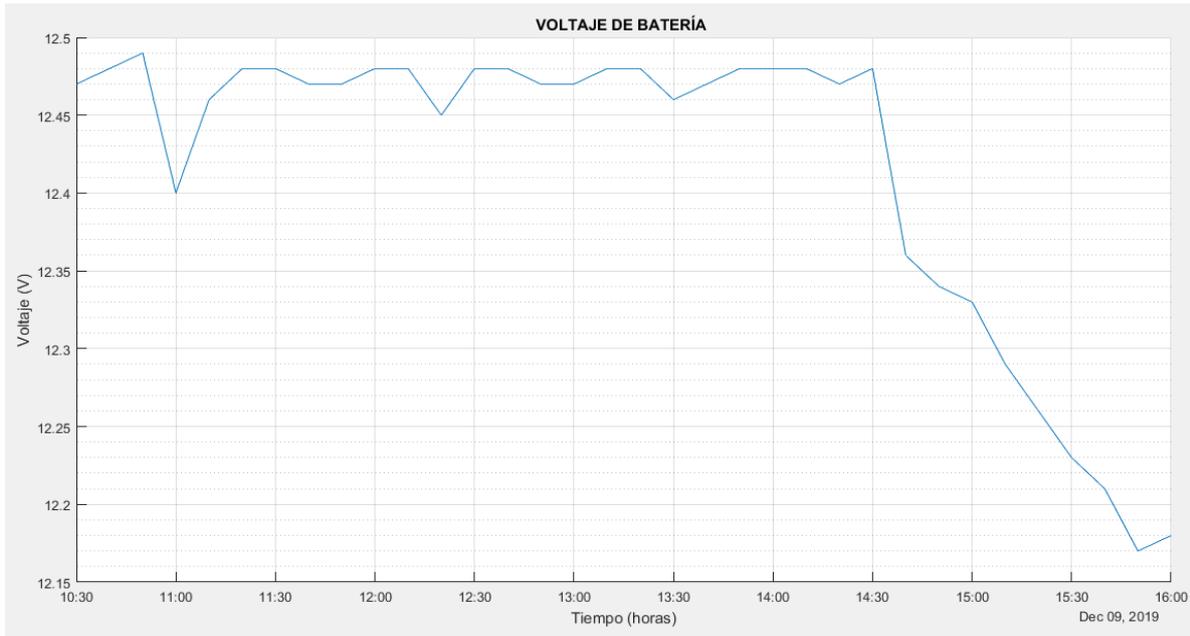


Figura 47. Voltaje de la batería (Vcc).  
Fuente: Autor.

- **Corriente de recarga de la batería**

En la Figura 48 se muestra la corriente de recarga de la batería, en (A). El máximo valor es 17,84 A, el mínimo es 4,52 A, este valor se registró con la batería cargada al 100%, con un valor promedio de 13,21 A.

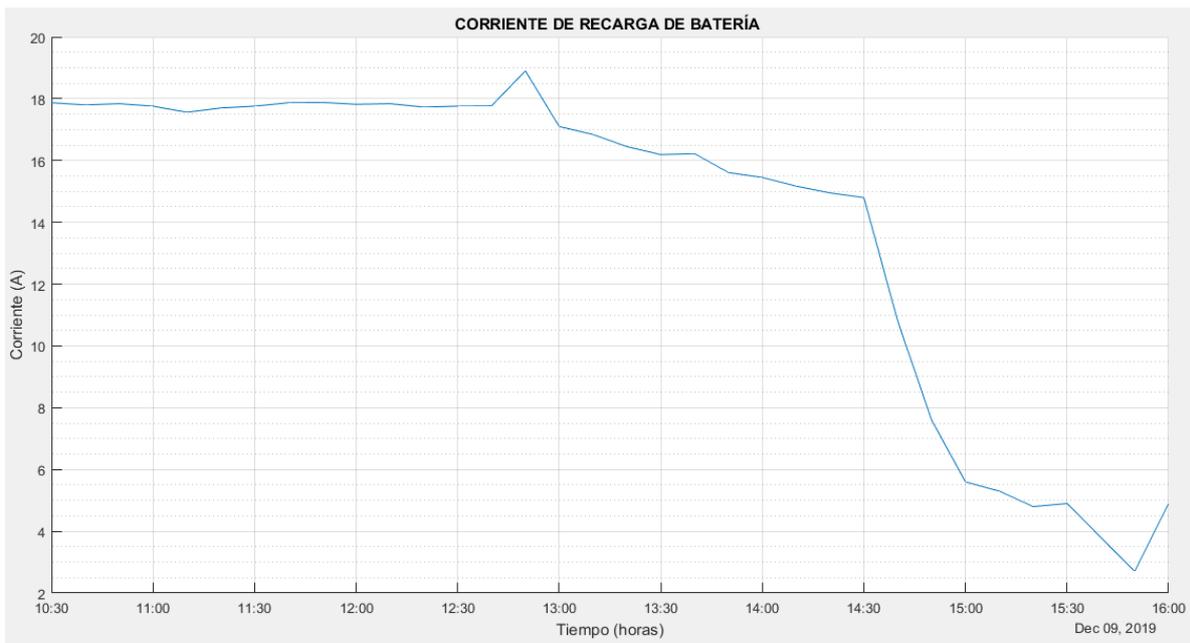


Figura 48. Corriente de recarga de la batería (DC).  
Fuente: Autor.

- ***Voltaje de generación de los paneles***

En la Figura 49 se muestra el voltaje generado por los módulos fotovoltaicos en (Vcc). El máximo valor es 34,8 Vcc, el mínimo es 33,95 Vcc, estos valores se registraron durante el día cuando existía radiación solar. El voltaje promedio es 34,48 Vcc.

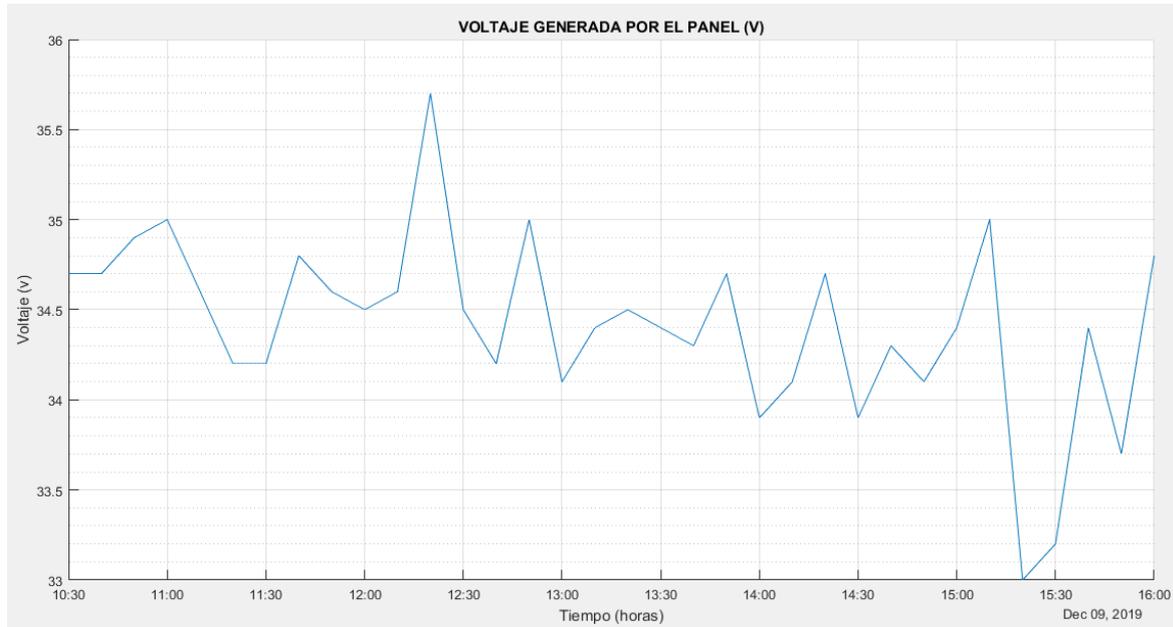


Figura 49. Voltaje de generación de los paneles.

Fuente: Autor.

- ***Corriente de generación de los paneles***

En la Figura 50 se muestra la corriente generada por los módulos fotovoltaicos en (A). El máximo valor es 22,17 A, el mínimo es 4,77 A, estos valores se registraron durante el día cuando existía radiación solar, con un promedio de 15,33 A.

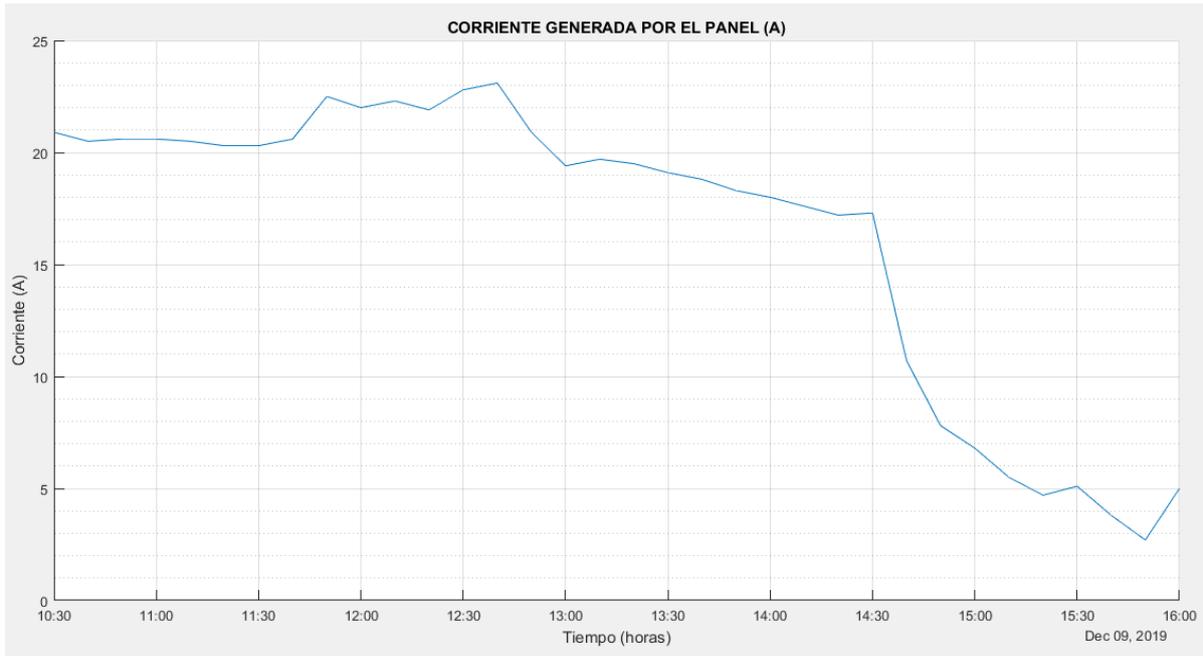


Figura 50. Corriente generada por los paneles.

Fuente: Autor.

- **Corriente de consumo**

En la Figura 51 se muestra la corriente de consumo. El máximo valor registrado es 20,53 A, generalmente ocurre cuando se están alimentando a los inversores. El mínimo es 15,57 A, este valor se registró cuando la batería se estaba descargando. El promedio es 18,14 A.

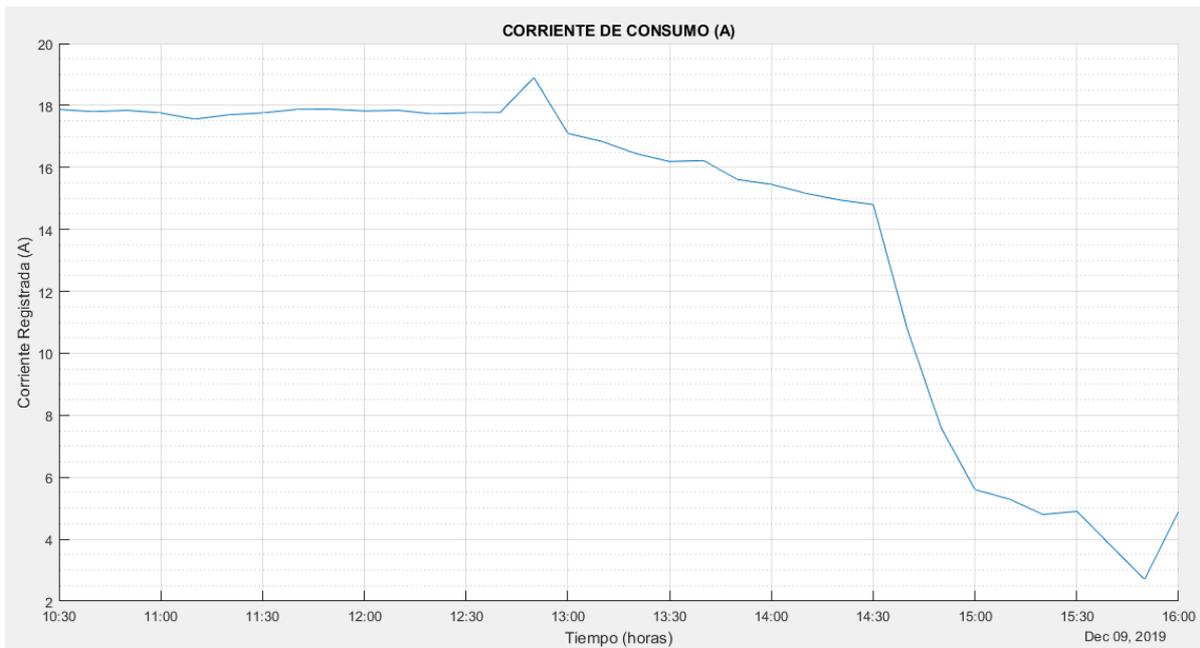


Figura 51. Corriente de consumo.

Fuente: Autor.

### 2.4.2. Potencia generada

En la TABLA 3. 3 se muestra la hora del día y la potencia promedio generada por la instalación fotovoltaica. El máximo valor registrado es 770,40 W, el mínimo es 161,94 W, y un promedio de 529,54 W. Estas mediciones se realizaron el día 9 de diciembre del 2019.

TABLA 3. 3. POTENCIA GENERADA POR EL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

<b>Hora</b>	<b>Potencia Generada (W)</b>
10:00	718,69
11:00	719,05
12:00	770,40
13:00	658,07
14:00	504,69
15:00	161,94
16:00	174
<b>Promedio</b>	529,54
<b>Máximo</b>	770,40
<b>Mínimo</b>	161,94

Fuente: Autor

En la Figura 52 se puede observar que el valor promedio de potencia generada es de 529,54W siendo este un 100% de la potencia nominal que se obtiene con una irradiancia de  $1000 W/m^2$  esto indica una alta eficiencia del sistema fotovoltaico. Por lo que se puede decir el sistema fotovoltaico ha tenido un correcto funcionamiento

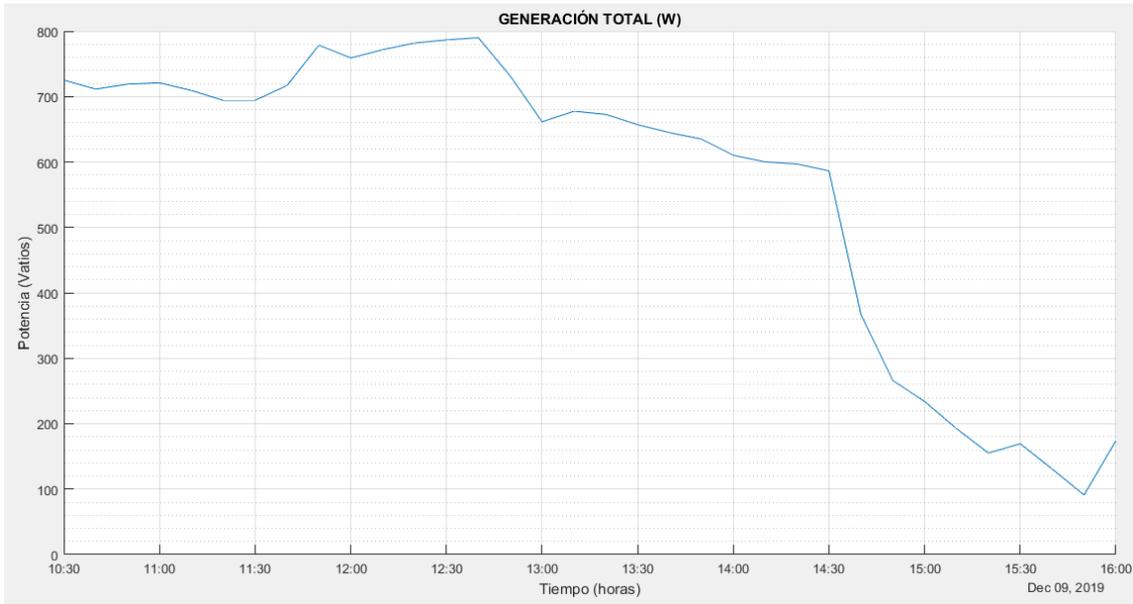


Figura 52. Potencia generada por los paneles.

Fuente: Autor.

### 2.4.3. Requerimientos técnicos para la conexión con el sistema de distribución

Para comprobar el correcto funcionamiento entre la red eléctrica de distribución y la red eléctrica de generación, se deben comparar ciertos parámetros eléctricos. Según la REGULACIÓN (Arconel 003/18, 2018), los requerimiento técnicos para la conexión son los que se mencionan a continuación:

- a) El consumidor con  $\mu$ SFV (Microgeneración Fotovoltaica) deberá operar en el rango de voltaje entre un 90% y 110% del voltaje nominal de la red. En caso de operar fuera de este rango, se deberá calibrar las protecciones considerando un tiempo máximo para el despeje de 1 segundo.

En la TABLA 3. 4 se muestran los valores de voltaje entre la red de distribución y la red de generación fotovoltaica. Estas mediciones se realizaron el día 9 de diciembre del 2019.

TABLA 3. 4. VALORES DE VOLTAJE DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN Y EL SISTEMA DE GENERACIÓN.

Hora	Voltaje de la Red (V)			Voltaje de Generación (V)		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
10:00	129,15	124,22	127,12	125,92	123,03	128,77
11:00	129,79	125	127,78	126,02	123,02	128,41
12:00	130,10	125,88	128,24	128,11	126,02	130,09
13:00	130,32	125,59	128,35	128,48	127,18	129,85

14:00	131,09	126,16	129,20	128,21	126,50	129,61
15:00	130,98	125,86	128,67	128,75	126,01	130,16
16:00	131,61	126,54	129,19	130	127,10	131,15
<b>Promedio</b>	130,43	125,60	128,36	127,93	125,73	129,72
<b>Máximo</b>	131,61	126,54	129,20	130	127,18	131,15
<b>Mínimo</b>	129,15	124,22	127,12	125,92	123,02	128,41

Fuente: Autor.

En la TABLA 3. 4 se puede comprobar que el voltaje del sistema de generación fotovoltaica no supera los límites de voltaje nominal de la red de distribución, ya que está operando en los rangos establecidos por la regulación (Arconel 003/18, 2018).

- b) La puesta en paralelo con el sistema no deberá generar variaciones en el voltaje de la red superiores a  $\pm 5\%$ .

A continuación, se indican los valores de voltaje del sistema fotovoltaico integrado en la red eléctrica de bajo voltaje en distribución (TABLA 3. 5). Estas mediciones se realizaron el día 6 de diciembre del 2019.

TABLA 3. 5. VOLTAJE DEL SISTEMA INTEGRADO A LA RED ELÉCTRICA.

<b>Voltaje del sistema conectado a la red eléctrica</b>			
<b>Hora</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>
10:00	127,20	124,30	129,80
11:00	127,04	124,10	129,58
12:00	128,15	125,98	130,36
13:00	129,20	127,62	131,07
14:00	129,35	127,58	130,93
15:00	129,73	127,35	132,09
16:00	130,35	128,10	132,85
<b>Promedio</b>	128,71	126,43	130,95
<b>Máximo</b>	130,35	128,10	132,85
<b>Mínimo</b>	127,04	124,10	129,58

Fuente: Autor.

En la TABLA 3. 5 se muestran los valores de voltaje del sistema fotovoltaico integrado a la red eléctrica. Se puede comparar estos datos con los datos de la red de baja tensión y se llega a la conclusión de que no existen variaciones de voltaje, ya que no hay caída de tensiones ni sobretensiones.

- c) La variación máxima de la frecuencia permitida en la operación en sincronismo con la red será de  $\pm 0,5\text{Hz}$ .

A continuación, se presenta los datos de frecuencia del sistema fotovoltaico en sincronismo con la red de distribución (TABLA 3. 6). Estas mediciones se realizaron el día 6 de diciembre del 2019.

TABLA 3. 6. FRECUENCIA DE OPERACIÓN EN SINCRONISMO CON LA RED ELÉCTRICA.

<b>Hora</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>
10:00	60,05
11:00	60,04
12:00	60,05
13:00	60,05
14:00	60,04
15:00	60,05
16:00	60,04
<b>Promedio</b>	60,04
<b>Máximo</b>	60,05
<b>Mínimo</b>	60,04

Fuente: Autor.

En la TABLA 3. 6 se muestran los datos de frecuencia del sistema de generación con la red de baja tensión, dichos valores son positivos, ya que no existen variaciones de frecuencia. La frecuencia se encuentra dentro del margen de tolerancia, no excede el  $\pm 0,5\text{Hz}$ .

Con respecto a las gráficas obtenidas en las mediciones de corrientes y voltajes en DC, voltajes y frecuencia en AC, se puede analizar lo siguiente; el sistema fotovoltaico genera potencia cuando se cuenta con el recurso solar suficiente, caso contrario el sistema deja de generar. Además, se puede observar que el sistema de generación fotovoltaico no genera armónicos en la red eléctrica de distribución. Otro aspecto importante para mencionar es que se realizaron cálculos para cubrir la demanda total del edificio, como resultado se obtuvo que con 15 módulos solares se cubre 21.76 *kWh* que es la demanda energética del edificio y con 2 módulos se cubre el 15% de esa demanda energética (Ver Anexo E).

## Conclusiones

- ❖ La implementación de sistemas fotovoltaicos integrados a la red eléctrica requiere un análisis de las diferentes tecnologías para la generación solar fotovoltaica, como son energía consumida, radiación solar, conexión de paneles, caída de tensión, entre otros conceptos. En este caso se ha realizado un proyecto paso a paso, de los cálculos que se debe realizar para dimensionar adecuadamente el sistema fotovoltaico.
- ❖ Al diagnosticar el recurso de radiación solar existente en el Campus de la Universidad Técnica del Norte se determinó que el rango está entre  $4,48 - 6,71 \text{ kWh/m}^2$ . Se observó un comportamiento uniforme durante el tiempo que se realizó las mediciones, el cual beneficia el uso de la energía solar como fuente de generación alternativa.
- ❖ El diseño del sistema fotovoltaico permitió la selección de los equipos adecuados acorde a las características de los cálculos realizados, esto permite captar la energía solar de mejor manera para generar electricidad. Con respecto a la integración a la red de distribución el mismo diseño no permite inconvenientes al momento de sincronizarse, ya que el inversor seleccionado se encarga de sincronizar los parámetros eléctricos de voltaje y frecuencia.
- ❖ Con la implementación del sistema fotovoltaico se minimiza los costos de operación y mantenimiento, así como reducir el costo de energía eléctrica convencional del sistema interconectado a la red pública. En las pruebas de funcionamiento de los equipos se puede observar que los niveles de carga y descarga de la batería depende de la radiación solar del lugar, el voltaje de generación de los paneles está dentro del rango de fabricación y el regulador de carga aprovecha al máximo la potencia generada por los paneles.

## Recomendaciones

- ❖ Concientizar a la sociedad en general que la implementación de los sistemas fotovoltaicos, son fuentes alternativas que dan soluciones integras con beneficios particulares y sociales que deben ser aprovechados.
- ❖ Se sugiere la implementación de un sistema fotovoltaico con conexión a red, ya que no se utilizan bancos de baterías y la energía que se produce durante las horas de insolación se dirigen directamente a la carga. No contar con un sistema de almacenamiento aporta a la disminución de gastos de inversión.
- ❖ Para la selección de los equipos se recomienda que se tenga como preferencia la relación costo – beneficio, ya que por la utilización de equipos de menor costo se arriesgará en el funcionamiento del sistema, teniendo a futuro una instalación deficiente. Una correcta inversión inicial garantizará el correcto funcionamiento del sistema fotovoltaico integrado a la red eléctrica.
- ❖ Realizar la instalación del sistema fotovoltaico de acuerdo con el diseño planteado en este proyecto, se debe verificar las características técnicas de cada equipo y al momento de ejecutar las conexiones de los dispositivos comprobar las polaridades, de esta manera se evitará posibles cortocircuitos.
- ❖ Es necesario facilitar a empresas nacionales la importación de productos de generación solar fotovoltaica, ya que adquirirlos en otro país resulta costoso, además con esto se evitaría estafas por parte de empresas internacionales. Al realizar la compra de los equipos se recomienda asesorarse con una persona experta en el tema para evitar inconvenientes en envíos del producto.
- ❖ Se recomienda evitar que las baterías lleguen a un punto crítico de descarga, con lo que su vida útil se prolongará. Es importante respetar los niveles de carga y descarga de la batería mediante un regulador de carga. Con relación al regulador, se debe elegir un MPPT, ya que es capaz de aprovechar al máximo un panel fotovoltaico y permite producir más energía respecto a un regulador PWM.

## Referencias

- Abella, M. (2016). *Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos*. Obtenido de Departamento de Energías Renovables, Ciemat: [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/)
- Acevedo, F. de J. (2016). *Diseño de una instalación solar fotovoltaica con capacidad para 3 kilovatios (Universidad Nacional Abierta y a Distancia Cead José Acevedo y Gómez)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666>
- Acosta, R., Martínez, E., & Riveros, J. (2015). *Estudio de factibilidad técnica de una solución eléctrica de uso residencial con paneles solares en el municipio Sahagún departamento de Córdoba de la costa norte colombiana*. Universidad Santo Tomas de Aquino, Bogotá.
- Alvarez, D. (2017). *Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiación solar en Cuenca - Ecuador (Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca)*. <https://doi.org/10.1128/JB.186.8.2402>
- Arconel 003/18. (2018). *Codificación-Regulación-No.-ARCONEL-003-18* (p. 41). p. 41. Quito.
- Ardila, M. (2017). *Análisis en la ejecución de un sistema de energía solar fotovoltaico en una vivienda de la ciudad de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás.
- Banggood. (n.d.). *L60 60A 12V/24V Auto LCD MPPT Solar Battery Charge Controller High Efficiency Solar Tracking System with USB 5V 1500mA Solar Regulator*. Retrieved from [Banggood.com](http://Banggood.com).
- Bayegan, M. (2001). Vision of the Future Grid IEEE Power Engineering Review.
- Cepeda, J., & Sierra, A. (2016). *Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones*.
- Cheng, D. (2014). *Desarrollo E Implementación De Aplicaciones Domóticas Controladas Con Dispositivo Android*. Retrieved from [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/470/3/obregon\\_al.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/470/3/obregon_al.pdf)
- Constante Segura, J., & Palacios Chacón, E. (2014). *El Recurso Solar Para Generación De Energía. Universidad Politécnica Salesiana*. Retrieved from <http://www.dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6791>
- Cornejo, H. (2013). *Sistema solar fotovoltaico de conexión a red en el Centro Materno Infantil de la Universidad de Piura*. Universidad de Piura.

- Cruz, E., & de la Fuente, P. (2012). *INVERSORES EN APLICACIONES FOTOVOLTAICAS* (Universidad de Valladolid). Retrieved from <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/2561/1/PFC-P 43 %3B 44.pdf>
- DAH Solar. (2019). *Módulo Solar Polivinílico 60 Celdas Serie 260/265/270 /275w*. Retrieved from Anhui Daheng Energy Technology Co., Ltd website: [https://es.dahsolarpv.com/poly-solar-panel-60-cells-series\\_p13.html](https://es.dahsolarpv.com/poly-solar-panel-60-cells-series_p13.html)
- DAISA. (2019). *Catálogo DAISA Energías Renovables*. DAISA.
- Departamento de construcción UTN. (2019). *Universidad Técnica del Norte*. Retrieved from [www.utn.edu.ec](http://www.utn.edu.ec)
- Domínguez, H. (22 de Noviembre de 2012). *Diseño de un sistema fotovoltaico para la generacion de energía eléctrica en el Cobaev 35 Xalapa*. Xalapa Enríquez, México: Universidad Veracruzana.
- Dongguan Maywah Co., L. (2019). *Grid tie inverter GTI300W 10.5-30V*. Retrieved from MAY WAH website: <http://www.maywahcn.com/gti300w/>
- EnerSys. (2019). *Battery Range Summary*. Retrieved from EnerSys Power/Full Solutions website: [www.enersys.com](http://www.enersys.com)
- Erenovable. (2015). *Energía solar ventajas y desventajas*. Retrieved from Colombia website: <http://erenovable.com/energia-solar-ventajas-y-desventajas/>.
- Escamilla, J., & Tovar, D. (2011). *Sistema fotovoltaico de 8kW interconectado a la red. Santiago de Cali, Colombia*: Universidad del Valle.
- Fajardo, J. (2016). *Potencial de la implementación de la energía solar a gran escala en Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: Fundación Universidad de América.
- Gamez, D., & Guama, E. (2015). *Desarrollo de un prototipo electrónico para la interconexión de un sistema fotovoltaico con la red eléctrica*. Universidad de Nariño.
- García, A. (2017). ( *Energy storage technologies in the electricity grid* ). Universidad de Cantabria.
- Gómez, P. (2017). *Viabilidad de la implementación de un sistema fotovoltaico para el suministro eléctrico de una mina en el municipio de Sardinata*. *Revista Mundo Fesc*.
- Google Maps. (2019). *Google Maps*. Retrieved from [google.com.ec](http://google.com.ec)
- Gozalbes, M. (2015). *Estudio comparativo de tres sistemas aislados de diferente configuración*. Universidad Carlos III de Madrid.

- Hernández, J., & Martínez, V. (2007). *Estudio de factibilidad de la implementación de paneles fotovoltaicos para alimentar un sistema de bombeo de casa habitación*. México, D.F., México: Instituto Politécnico Nacional.
- Inverter.com. (2019). *300W Solar Grid Tie Inverter, 24V/48V DC to 120V/230V AC*. Retrieved from inverter.com website: [www.inverter.com](http://www.inverter.com)
- Issa, D. (2013). *Estudio técnico - económico para la implementación masiva de sistemas solares fotovoltaicos para los estratos cinco y seis de la ciudad de Cali*. Universidad Autónoma de Occidente.
- José de Castro, N., Brandão, R., Rosental, R., & Dorado, P. (2015). *Integración eléctrica internacional de Brasil: Antecedentes, situación actual y perspectivas*. Río de Janeiro.
- Lora, D. P., & Ortega, L. J. (2012). *ESTUDIO DE UN SISTEMA INTEGRAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA CONECTADO A LA RED PARA LA FACULTAD DE EDUCACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, E IMPLEMENTAR UN MODELO DEMOSTRATIVO CON ACUMULACIÓN DE ENERGÍA*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Loza, R., & Palacios, A. (2014). *Propuesta de reducción del consumo eléctrico residencial mediante un Sistema Solar Fotovoltaico conectado a la red eléctrica*. Retrieved from <http://tesis.bnct.ipn.mx/handle/123456789/13221>.
- Martínez, J. (2011). *Evaluación económica de un sistema fotovoltaico en Punta Arenas con diseño de emulación de potencia suministrada por paneles solares*. Punta Arenas, Chile: Universidad de Magallanes.
- Martínez, M. (2016). *Radiación Solar – Conceptos Y Aplicaciones*. (2006), 1–4.
- Miranda, M. (2016). *Diseno de sistema de generacion fotovoltaica para viviendas conectadas a la red de distribucion en el contexto de la Ley N° 20.571*. Universidad de Chile.
- Nuñez, F. (2013). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA DE 1MW CON CONEXIÓN A LA RED DE M.T. EN LA ESPOCH*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Onset Computer Corporation. (2014). *HOBO Weather Station User 's Guide*. 52.
- Onset Computer Corporation. (2019). S-LIB-M003 Sensor. *ONSET*, 2–3. Retrieved from <https://www.onsetcomp.com/datasheet/S-LIB-M003>
- Ormaechea, C. (2012). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS DE CONEXIÓN A RED CON POTENCIA IGUAL O SUPERIOR A 100 kW*. Universidad

Carlos III de Madrid.

- Quinche, J., & Soto, F. (2012). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA VIVIENDA SOSTENIBLE DE INTERÉS SOCIAL DEL AEIRNNR* (Universidad Nacional de Loja). Retrieved from [http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/17025/1/TESIS WILSON FERNANDO.pdf](http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/17025/1/TESIS_WILSON_FERNANDO.pdf)
- RIKA. (2015a). RK200-03 Pyranometer. *Hunan Rika Electronic Technology Co., Ltd*Rika, 3. Retrieved from [www.rikasensor.com](http://www.rikasensor.com)
- RIKA. (2015b). *RK600-02/02B Data Logger of Automatic Weather Station. Hunan Rika Electronic Technology Co., Ltd*, 1–10. Retrieved from [www.rikasensor.com.cn](http://www.rikasensor.com.cn)
- RIKA. (2017). *RIKA Environmental & Weather Monitoring*. Retrieved from [www.rikasensor.com.cn](http://www.rikasensor.com.cn)
- Romero, J. (2015). *Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las regiones de la costa y sierra del Ecuador*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Sánchez, S., & Franco, J. (2016). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A RED CON SOPORTE DE ALMACENAMIENTO EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Santillán, A. (2016). *Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos*. Universitat de Barcelona.
- Tenorio, P. H., Rivas, J. J. R., Castillo, O. C., & González, R. O. (2018). *Control Del Flujo De Potencia Hacia La Red Eléctrica De Un Sistema De Generación Eólica Empleando Un Generador De Inducción De Doble Alimentación*. *Pistas Educativas*, 39(128), 749–766. Retrieved from <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1187>
- Tesillo, R. (2016). *ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD COMO MEDIO DE OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A LA RED*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Toapanta Aguilar, R., & Hidalgo Guerrero, J. (2014). *ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HÍBRIDA SOLAR EÓLICA PARA GENERAR 500W EN LA HACIENDA “LA MERCED” UBICADA EN EL BARRIO SANTA ANA DEL PEDREGAL, PARQUE NACIONAL COTOPAXI EN EL PERIODO 2014*. Universidad Técnica de Cotopaxi.

- Torres, V., & López, E. (2014). *Análisis del sistema de generación de energía eléctrica solar fotovoltaica y su incidencia en el consumo eléctrico del Centro de Rehabilitación y Educación Especial Avinnfa. Milagro, Ecuador: Universidad Estatal de Milagro.*
- Tu Tiempo. (2019). *Información geográfica de Cantón Ibarra.* Retrieved from <https://tierra.tutiempo.net/ecuador/canton-ibarra-ec007454.html>
- Uzquiano Camilo, Sullivan Mike, & Ximena, S. (2015). *Capacitación e instalación de Sistemas Fotovoltaicos en las comunidades de Carmen del Emero y Yolosani. Wildlife Conservation Society, 15.* Retrieved from <http://energiayambienteandina.net/pdf/WCS - CAPACITACION E INSTALACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.pdf>.
- Valdivia, C. (2012). *Factibilidad técnico-económica de la instalación de energía solar fotovoltaica en la comuna de Pucón.* Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Vega, R. (2013). *Estudio comparativo de distintas tecnologías fotovoltaicas.* Universidad Carlos III de Madrid.
- Vela, M. (2015). *Implementación y ejecución de un sistema de energía alternativa (fotovoltaica) para incrementar la calidad de vida de sus moradores en la comunidad de Palmeras. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia .*
- Velásquez, A. (2013). *Manual de instalación de un sistema fotovoltaico domiciliario fotovoltaica.* Oviedo.
- WccSolar. (2018). *Batería solar AGM 100Ah/12V Genesis 12TD100F4.* Retrieved from WccSolar website: <https://www.wccsolar.net/product-page/bateria-agm-100ah-12v-enersys-12td100f4>.
- Yahyaoui, I., Chaabene, M., & Tadeo, F. (2015). Evaluation of Maximum Power Point Tracking algorithm for off-grid photovoltaic pumping. *Sustainable Cities and Society, 25-73.*
- Y-SOLAR. (2019). *User's Manual L60/L80.* Retrieved from Shenzhen Hehejin Industrial Co., LTD website: [www.y-solar.com](http://www.y-solar.com)

## Anexos

### Anexo A. Equipos utilizados en la medición de radiación solar.

#### Anexo A1. Piranómetro RK200-03



Sensor de radiación solar RK200-03.

Fuente: (RIKA, 2015a).

#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PIRANÓMETRO.

Ítem	Especificaciones
Rango espectral	300-3200nm
Suministro	12-24VDC
Rango	0-2000W/m <sup>2</sup>
Salida	0-20mV, 0-5V, 4-20mA, RS485
Sensibilidad	7-14μV*W <sup>-1</sup> *m <sup>2</sup>
Resistencia interna	350Ω
No linealidad	<±2%
Ángulo de medición	2π ángulo sólido
Tiempo de respuesta	≤35s (99%)
Estabilidad	±2%/año

Fuente: (RIKA, 2015a).

## Anexo A2. Piranómetro S-LIB-M003



Sensor de radiación solar S-LIB-M003.

Fuente: (Onset Computer Corporation, 2019).

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PIRANÓMETRO S-LIB-M003.

Ítem	Especificaciones
Rango de medición	0 a 1280 W/m <sup>2</sup> .
Rango de temperatura de funcionamiento	-40° a 75°C (-40° a 167°F)
Exactitud	± 10 W / m <sup>2</sup> o ± 5%
Resolución	1.25 W/m <sup>2</sup>
Deriva	<± 2% por año
Rango espectral	300 a 1100 nm
Error de respuesta de coseno	± 5%, 0 ° a 70 °; ± 10%, 70 ° a 80 °
Error de acimut	± 2% de error a 45 ° desde la vertical
Calibración	Recalibración de fábrica disponible
Cubierta	Carcasa de aluminio anodizado con difusor acrílico y junta tórica
Dimensiones	4.1 cm de alto x 3.2 cm de diámetro (1 5/8 pulg. X 1 1/4 pulg.)
Peso aproximado	120 g (4 onzas)
Longitud del cable	3 m (9,8 pies)
Longitud del cable de red del sensor inteligente	3 m

Fuente: (Onset Computer Corporation, 2019).

### Anexo A3. Data Logger RK600-02/02B



Registrador de datos RK600-02/02B.

Fuente: (RIKA, 2015b).

#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE REGISTRADOR DE DATOS.

Ítem	Especificaciones
LCD	192 * 64
Almacenamiento externo	usar un disco U especial para almacenar datos (función opcional).
Interfaz de datos	RS232, RS485, USB.
Protocolo de comunicación	MODBUS-RTU (Protocolo de comunicación abierto, el usuario puede convenir para el desarrollo secundario).
Suministro	12VDC, AC100V, AC220V, sistema de alimentación de energía solar opcional.
Intervalo de registro	1min-240min ajustable.
Parámetros de entrada	16 máx.
Consumo de poder	<2W
Temperatura de operación	-40 - +75°C.
Peso (sin empaquetar)	3.2kg
Dimensión	310*218*120mm
Material de la cáscara	RK600-02: ABS (Instalado en la caja protectora, la caja protectora es opcional). RK600-02B: Aleación de aluminio (uso exterior directamente).
Software de monitoreo meteorológico	Se utiliza para visualizar, analizar y almacenar datos en la PC.

Autor: (RIKA, 2015b).

## Anexo A4. HOBO Micro Station



Registrador de datos HOBO Micro Station.

Fuente: (Onset Computer Corporation, 2014).

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE REGISTRADOR DE DATOS HOBO.

Ítem	Especificaciones
Rango de operación	-20 ° a 50 ° C (-4 ° a 122 ° F) con pilas alcalinas, -40 ° a 70 ° C (-40 ° a 158 ° F) con pilas de litio.
Entradas de sensor	Hasta cuatro sensores inteligentes.
Comunicación	Puerto serie de 3,5 mm o utilice un cable adaptador de serie a USB (ADAP-SER-USB).
Dimensiones	8,9 cm de alto x 11,4 cm de profundidad x 5,4 cm de ancho (3,5 x 4,5 x 2,125 pulgadas).
Peso	0,36 kg (0,8 lb)
Memoria	Almacenamiento de datos flash no volátil de 512 K.
Modos de memoria	Pare cuando esté lleno, envuélvase cuando esté lleno.
Indicador de operación	Siete luces proporcionan registro y estado de la red del sensor
Intervalo de registro	1 segundo a 18 horas, intervalo especificado por el usuario.
Duración de la batería	Uso típico de 1 año (hasta 4 sensores con registro de 1 minuto o más intervalo).

Autor: (Onset Computer Corporation, 2014).

## Anexo B. Cálculos de caída de tensión y porcentaje de caída de tensión

### Anexo B1. Caída de tensión

#### **Formula:**

$$\Delta V = R * l * I$$

#### - **Paneles – Disyuntor DC**

$$\Delta V = 5.26 * 20 * 22.52$$

$$\Delta V = 2,369$$

#### - **Disyuntor DC – Regulador**

$$\Delta V = 5.26 * 0.5 * 22.52$$

$$\Delta V = 59.22$$

#### - **Regulador – Batería**

$$\Delta V = 5.26 * 2 * 22.52$$

$$\Delta V = 236.91$$

#### - **Batería – Barra DC**

$$\Delta V = 1.32 * 2 * 43.33$$

$$\Delta V = 114.39$$

#### - **Inversores – Disyuntor AC**

$$\Delta V = 8.17 * 1 * 4.33$$

$$\Delta V = 35.37$$

#### - **Disyuntor AC – Barras AC**

$$\Delta V = 8.17 * 1 * 4.33$$

$$\Delta V = 35.37$$

## Anexo B2. Porcentaje de caída de tensión

### **Formula:**

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V}{12} * 100$$

#### - ***Paneles – Disyuntor DC***

$$\Delta V\% = \frac{2,369}{12} * 100$$

$$\Delta V\% = 1.97$$

#### - ***Disyuntor DC – Regulador***

$$\Delta V\% = \frac{59.22}{12} * 100$$

$$\Delta V\% = 0.04$$

#### - ***Regulador – Batería***

$$\Delta V\% = \frac{236.91}{12} * 100$$

$$\Delta V\% = 0.19$$

#### - ***Batería – Barra DC***

$$\Delta V\% = \frac{114.39}{12} * 100$$

$$\Delta V\% = 0.09$$

#### - ***Inversores – Disyuntor AC***

$$\Delta V\% = \frac{35.37}{120} * 100$$

$$\Delta V\% = 0.02$$

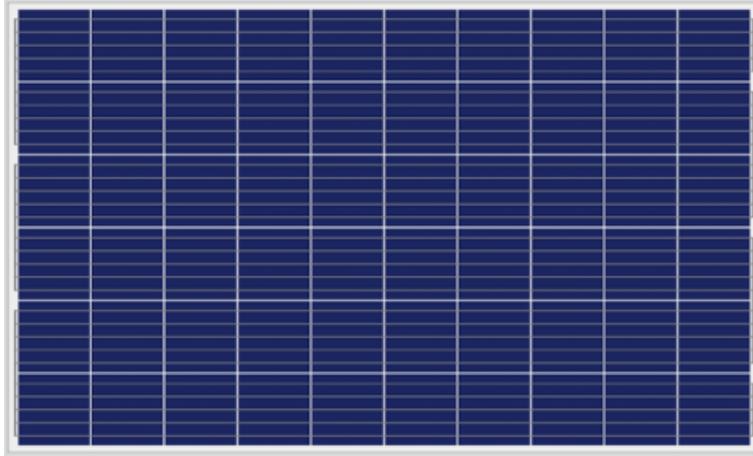
#### - ***Disyuntor AC – Barras AC***

$$\Delta V\% = \frac{35.37}{120} * 100$$

$$\Delta V\% = 0.02$$

## Anexo C. Equipos seleccionados en la implementación del sistema fotovoltaico

### Anexo C1. Selección de los paneles fotovoltaicos



Módulo Solar Polivinílico 60 Celdas Serie 260W.

Fuente: (DAH Solar, 2019).

#### ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS DEL PANEL SOLAR.

Ítem	Características Eléctricas (STC)
Potencia máxima (Pmax)	260W
Voltaje de circuito abierto (Voc)	38.1V
Voltaje de potencia máxima (Vmp)	30.6V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.01 A
Corriente máxima de potencia (Imp)	8.50 A
Eficiencia del módulo (%)	15.90%
Tolerancia de potencia	0 ~ + 5W
Coefficiente de temperatura de Isc	0.05% / °C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0.32% / °C
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0.41% / °C
Entorno de prueba estándar	Irradiancia 1000W/m <sup>2</sup> , temperatura de la celda 25 °C, espectro 1.5 AM.

Fuente: (DAH Solar, 2019).

## Anexo C2. Selección del regulador de carga solar



Regulador de carga solar MPPT L60.

Fuente: (Banggood, n.d.).

### PARÁMETROS TÉCNICOS DEL REGULADOR DE CARGA SOLAR.

Ítem	Características Técnicas
Modelo	MPPT L60
Voltaje de la batería	12V/24V auto
Corriente de carga	60 A
Potencia pico del panel de células solares	800W
Entrada solar máxima	<=48V
Voltaje de flotación de la batería	13.8V(12V sistema) /27.6V (24V sistema)
Protección de batería (bajo voltaje)	10.6V(12V sistema) /21.2V (24V sistema)
Voltaje de recuperación de batería (bajo voltaje)	12.6V(12V sistema) /25.2V (24V sistema)
Configuración de la capacidad de la batería	600Ah
Tensión máxima de circuito abierto del panel solar.	18V~24V (12V sistema) 36V~48V (24V sistema)

Fuente: (Banggood, n.d.).

### Anexo C3. Selección de la batería



Batería de 12V y 100Ah de ciclo profundo.

Autor: (WccSolar, 2018).

#### PARÁMETROS TÉCNICOS DE LA BATERÍA.

Ítem	Características Técnicas
Modelo	12TD100F4
Marca	Genesis TD
Peso típico	32.4 kg
Dimensiones	39,4 x11,1x 28,6cm (Larga*Ancho*Alta)
Vida útil	15 años a 20°C
Voltaje nominal	12V
Capacidad de la batería	102Ah
Voltaje flotante	2.280Vpc a 20°C
Fuerza de conexión	6.8 ± 0.6 Nm

Fuente: (WccSolar, 2018).

## Anexo C4. Selección de los inversores con conexión a red



Grid Tie Inverter GTI300W 10.5-30V.

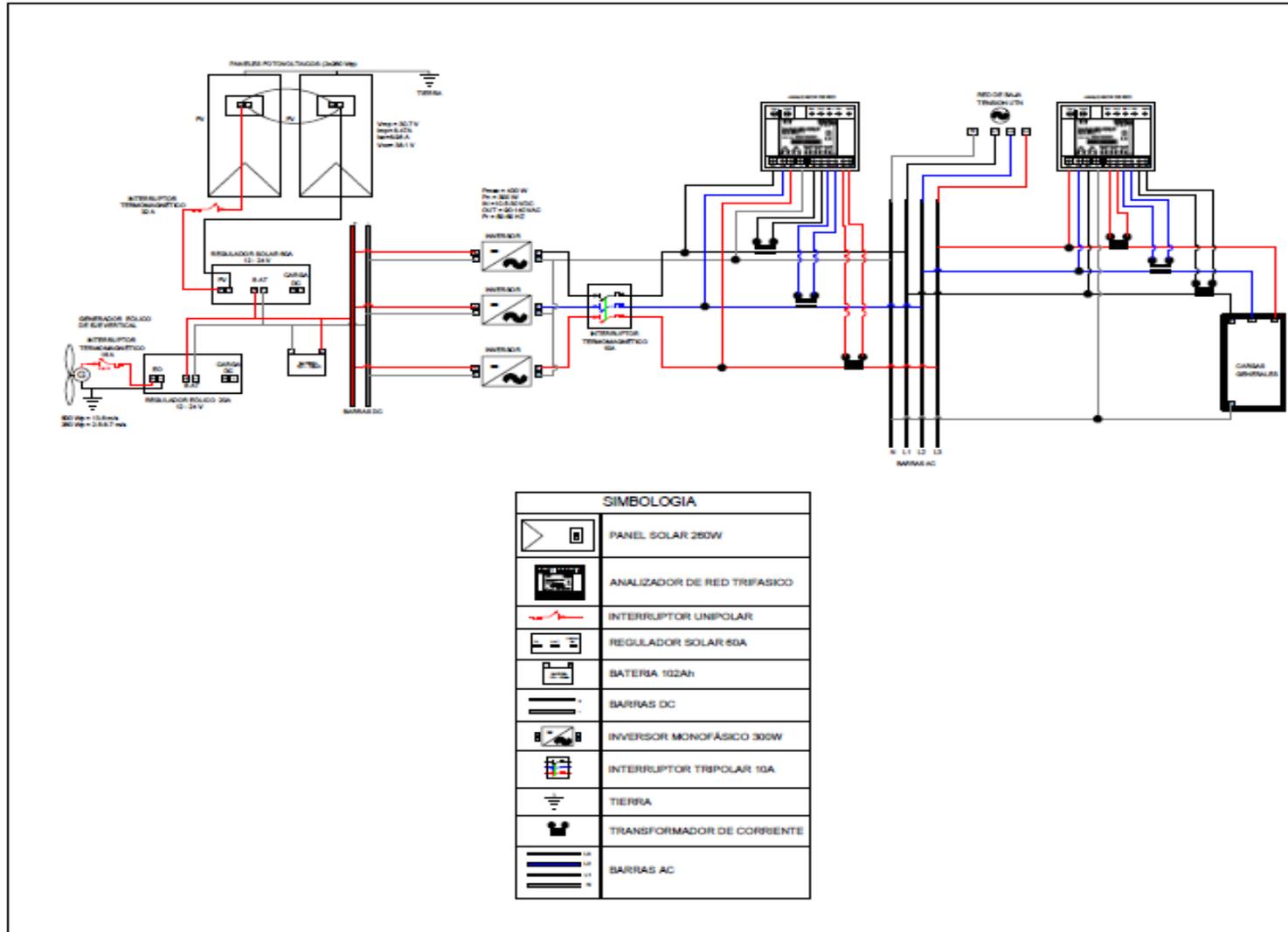
Fuente: (Dongguan Maywah Co., 2019).

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL INVERSOR.

Ítem	Características Técnicas
Modelo	Grid Tie Inverter GTI300W 10.5-30V
Marca	Maywah
Recomendar el uso de paneles solares	420W
Potencia de entrada máxima de CC	400W
Voltaje máximo de corriente continua	30.2VDC
Rango de voltaje DC	10.5-30 VDC (Recommend PV Vmpp14-22V)
Potencia de salida de CA	300W
Protección anti-voltaje	Fusible
Rango de voltaje estándar de CA	90V-140/180~260VAC
Rango de frecuencia de CA	55Hz~63Hz/ 45Hz-53Hz
Corriente de salida distorsión armónica total	THDIAC <5%
Fase	<1%
Protección de la isla	VAC; f AC

Fuente: (Dongguan Maywah Co., 2019).

## Anexo D. Diagrama multifilar del sistema fotovoltaico



**UBICACIÓN**

TEMA: "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE"

1/1	CONTIENE: DIAGRAMA MULTIFILAR DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO	AUTOR: SEBASTIÁN CRISTÓBAL FERRER C.I. 040128849
FECHA:	DICIEMBRE 2018	TUTOR:
DISEÑO:	EDISON OLIVERA	
ESCALA:	1:1	ING. EDUARDO DÍAZ M.C.

Activar W  
Ir a Configur

## **Anexo E. Demanda energética del edificio CIELE**

### **Anexo E1. Energía Consumida en CIELE**

Con el fin de conocer el estado de las instalaciones eléctricas del edificio de CIELE en la Universidad Técnica del Norte, se realizó un análisis de cargas en el edificio en mención. Se instaló un analizador de red en el lado de baja tensión, más específicamente en el tablero principal del edificio, en el cual se ha adquirido información de curvas de potencia, tensión, armónicos, corriente y energía del sistema trifásico general. Las mediciones se realizaron en los meses de julio y agosto del 2019. El analizador estuvo adquiriendo datos durante una semana aproximadamente, la cual se consideró relevante debido a la carga académica en esas fechas.



Analizador de red trifásico instalado en el tablero de CIELE.

Fuente: Autor.

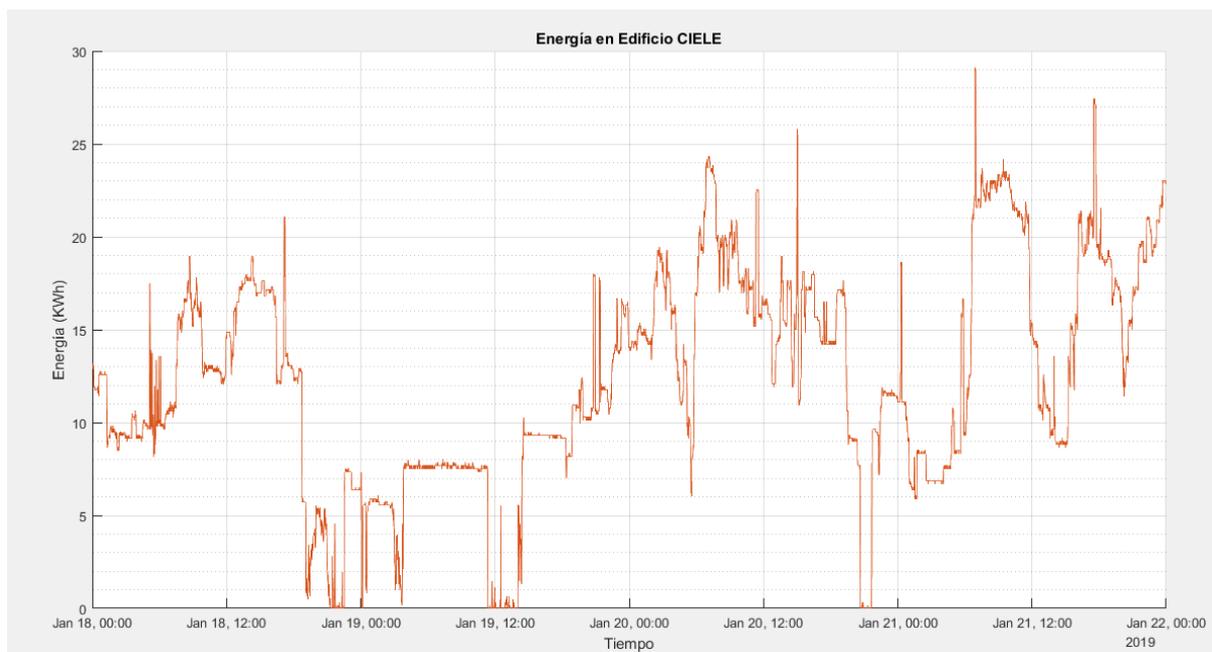
En las mediciones realizadas desde el 29 de julio hasta el 02 de agosto también se puede observar la energía (kWh) consumida por el edificio, se observa la energía media diaria, dando como resultado 21,76 kWh al día.

DEMANDA ENERGÉTICA DIARIA EN EL EDIFICIO CIELE.

DÍAS (kWh)	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	MEDIA
<b>Total energía</b>	23,99	24,93	15,32	27,09	17,50	<b>21,76</b>

Fuente: Autor.

El watt-hora, con su símbolo Wh, es una unidad de energía en forma de unidades por tiempo, con lo que se llega a entender que la cantidad de energía de la que se habla es capaz de producir y mantener una cierta potencia durante un tiempo determinado. A continuación, se indica el resultado de los datos medidos con el analizador de red.



Comportamiento de la Energía total de la L1, L2 y L3.

Fuente: Autor.

## Anexo E2. Potencia activa consumida en CIELE

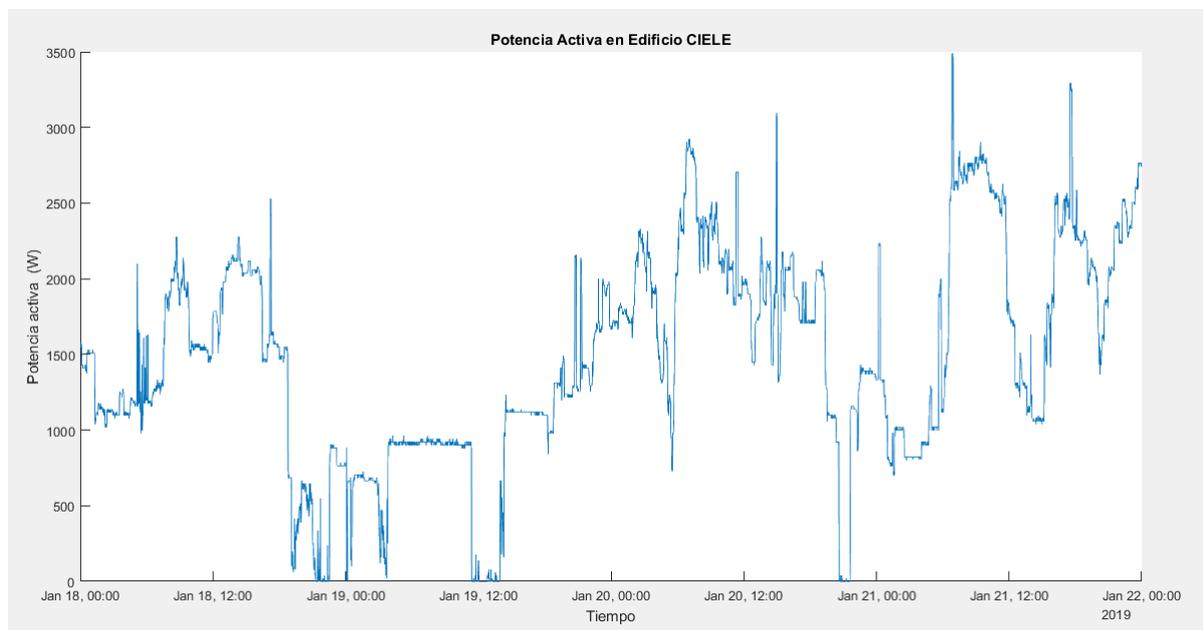
En las mediciones realizadas desde el 29 de julio hasta el 02 de agosto del 2019 se puede observar la potencia activa trifásica media diaria, dando como resultado 1,30 kW.

CÁLCULO DE POTENCIA ACTIVA TRIFÁSICA DIARIA EN EDIFICIO CIELE.

DÍAS	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	MEDIA
<b>(kW)</b>						
<b>P total medio</b>	1,44	1,50	0,92	1,63	1,05	<b>1,30</b>

Fuente: Autor.

La potencia activa trifásica es la que se aprovecha como potencia útil. También es conocida como media, real o verdadera y su unidad de medida es el vatio (W). A continuación, se indica el resultado de los datos medidos con el analizador de red trifásico.



Comportamiento de la Potencia Activa trifásica media total.

Fuente: Autor.

## Anexo F. Prácticas de Laboratorio

### PRÁCTICA # 1

#### 1. Tema

Tensión del panel sin carga.

#### 2. Objetivo

Determinar la medida de la tensión del panel solar fotovoltaico sin carga.

#### 3. Materiales y Equipos

- 2 paneles de diferente potencia
- 1 multímetro digital
- 1 pinza de electricista
- 2 puntas de caimán

#### 4. Introducción

El estudiante deberá realizar una previa investigación bibliográfica, que le permita adquirir los conocimientos técnicos necesarios, acerca de paneles solares.

#### 5. Desarrollo

A continuación se establece el desarrollo que llevará el alumno para cada una de las actividades.

5.1 Arme el circuito de la Figura 1.

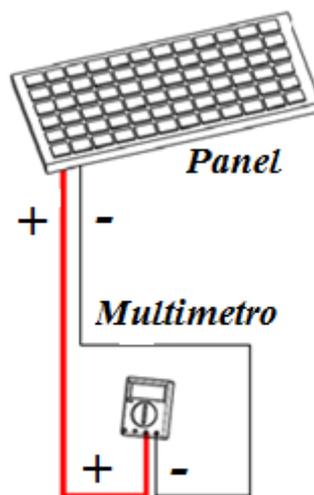


Figura 1. Circuito

5.2 Coloque el multímetro (paralelo) en posición para medir voltaje en corriente directa (DC).

5.3 Coloque las puntas del multímetro según corresponda la polaridad para la medición sobre el panel es decir la terminal positiva del panel con la terminal positiva del multímetro, la terminal negativa del panel con la terminal negativa del multímetro.

5.4 Realice la misma medición para medir distintas posiciones con ángulos de 0, 30 y 45 grados para cada uno de los paneles.

5.5 Escriba los valores en la Tabla 1. Tipo de panel y tensión para cada uno de los paneles fotovoltaicos.

**TABLA 1. LA TENSIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS PARA ÁNGULOS 0, 30 Y 45 GRADOS.**

<b>Potencia máxima del panel</b>	<b>0 grados</b>	<b>30 grados</b>	<b>45 grados</b>	<b>Tensión máxima</b>	<b>Tensión mínima</b>

¿Hubo variación significativa en el voltaje a diferentes ángulos del panel fotovoltaico?

¿Cuál es el ángulo óptimo de colocación del panel?

## **6. Conclusiones**

## **7. Recomendaciones**

## **8. Bibliografía**

## PRÁCTICA # 2

### 1. Tema

Conexión del panel solar a un regulador de carga.

### 2. Objetivo

El alumno realizará la conexión de los paneles solares con el controlador de carga y verificará la configuración en la pantalla LCD de este para el voltaje de entrada y de salida así como para diferentes parámetros del controlador.

### 3. Materiales y equipos

- 2 paneles solares fotovoltaicos de 260W
- 1 regulador de carga de 60A
- 1 multímetro
- 1 manual de operación del regulador MPPT L60
- Herramienta en general

### 4. Introducción

El estudiante deberá realizar una previa investigación bibliográfica que le permita adquirir los conocimientos teóricos necesarios, acerca de la forma de utilización de un multímetro y la forma de conexión de un panel solar y un regulador de carga.

### 5. Desarrollo

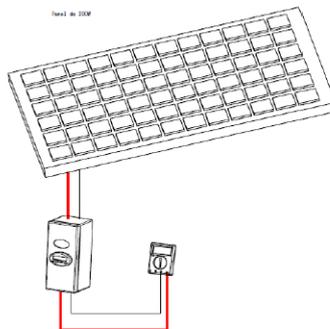
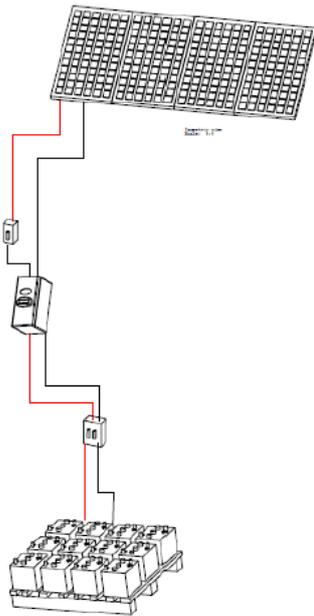


FIGURA 1 Conexión de panel o arreglo fotovoltaico con controlador de carga.



**FIGURA 2. Conexión de arreglo fotovoltaico al controlador y baterías.**

5.1 Conectar el circuito como se muestra en la Figura 1.

5.2 Realizar la medición del voltaje de entrada al sistema como se muestra en la Figura 1.

5.3 Conectar batería la batería a 12V como se muestra en la Figura 2 con su respectiva protección.

## **6. Resultados**

## **7. Conclusiones**

## **8. Recomendaciones**

## **9. Bibliografía**

## PRÁCTICA # 3

### 1. Tema

Conexión de batería a un regulador de carga

### 2. Objetivo

Realizar la conexión de la batería con el regulador de carga, según las especificaciones eléctricas de voltaje establecidas por el fabricante y sus protecciones eléctricas correspondientes.

### 3. Materiales y equipos

- 1 regulador de carga
- Batería de 12V para sistemas fotovoltaicos
- Protección eléctrica de 80A
- Herramienta en general

### 4. Introducción

El estudiante deberá realizar una previa investigación bibliográfica que le permita adquirir los conocimientos teóricos necesarios, acerca de la forma de utilización de un multímetro y la forma de conexión de un panel solar y un regulador de carga.

### 5. Desarrollo

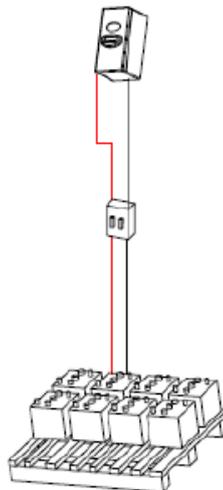


FIGURA 1 Controlador conectado a las baterías

5.1 Conecte la batería para lograr una tensión de 12V.

5.2 Siga el procedimiento del manual de operación del regulador MPPT L60 antes de colocar en marcha el equipo.

5.3 Configure el voltaje correspondiente de la batería.

## **6. Resultados**

## **7. Conclusiones**

## **8. Recomendaciones**

## **9. Bibliografía**

## PRÁCTICA # 4

### 1. Tema

Arreglos serie, paralelo de paneles solares.

### 2. Objetivo

Verificación de parámetros de un arreglo de paneles solares cuando se conectan en serie, y cuando se conectan en paralelo.

### 3. Materiales y equipos

- 2 paneles con  $P_p = 260W$  y una tensión de  $30.7V$
- 2 puntas de caimán Cable calibre 18AWG
- 3m de cable calibre 18AWG
- 1 desarmador estrella y plano
- 1 pinza de electricista
- Multímetro

### 4. Introducción

El estudiante deberá realizar una previa investigación bibliográfica, que le permita adquirir los conocimientos teóricos necesarios, acerca de las conexiones tanto en serie, paralelo y mixto, además de la forma de utilización de una pinza amperimétrica para la medición de las magnitudes eléctricas, como son en este caso voltaje y corriente.

### 5. Desarrollo

- a) Utilice las medidas de seguridad correspondientes y realice la conexión serie como se muestra en la Figura 1 para cuando se tiene un arreglo de 3 paneles solares y un multímetro para realizar la medición.

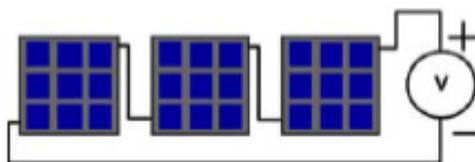


Figura 1

- b) Realice la medición de la tensión eléctrica de salida del arreglo y haga sus anotaciones correspondientes.
- c) Conecte un panel más al arreglo del punto (a) y verifique la tensión de salida con un multímetro.

- d) Explique cuál es el comportamiento del voltaje, la corriente y la potencia para un arreglo serie.
- e) Utilice las medidas de seguridad correspondientes y realice la conexión paralela como se muestra en la Figura 2 para cuando se tiene un arreglo de 2 paneles solares y un multímetro para realizar la medición.

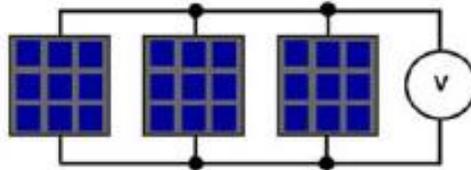
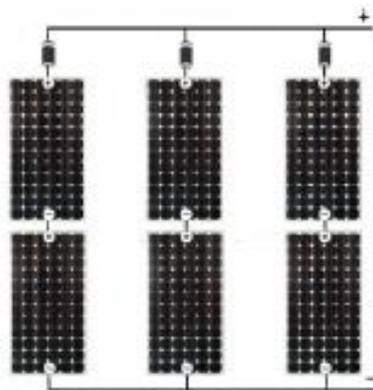


Figura 2

- f) Realice la medición de la tensión eléctrica de salida del arreglo y haga sus anotaciones correspondientes.
- g) Conecte un panel más al arreglo del punto (e) y verifique la tensión de salida con un multímetro.
- h) Explique cuál es el comportamiento del voltaje, la corriente y la potencia para un arreglo paralelo.
- i) Realice los mismos puntos que se realizaron para arreglos serie y paralelo, pero ahora para un circuito mixto de la siguiente figura.



## 6. Resultados

## 7. Conclusiones

## 8. Recomendaciones

## 9. Bibliografía

## PRÁCTICA # 5

### 1. Tema

Datos técnicos de un panel fotovoltaico

### 2. Objetivo

Identificar y familiarizarse con los datos técnicos proporcionados por los fabricantes de los paneles fotovoltaicos en la placa posterior de los paneles. Por mencionar  $P_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{max}$  y  $I_{max}$ .

### 3. Materiales y equipos

- 2 paneles de diferentes potenciales
- 1 multímetro digital
- 1 pinza de electricista
- Puntas de caimán

### 4. Introducción

El estudiante deberá realizar una previa investigación bibliográfica, que le permita adquirir los conocimientos técnicos necesarios, acerca de paneles solares.

### 5. Desarrollo

5.1 Observe la Figura 1 y 2 correspondientes a los datos técnicos de los paneles solares.



Figura 1 y 2 Datos técnicos de paneles fotovoltaicos.

5.2 Escriba los datos observados en la Tabla 1, parámetros y valores de cada panel fotovoltaico.

TABLA 1. VALOR DE LOS PARÁMETROS POR PANEL FOTOVOLTAICO.

Parámetro	Panel 1	Panel 2
Pmax		
Voc		
Isc		
Vmax		
Imax		

5.3 Realice los cálculos de la Potencia máxima para cada uno de los paneles fotovoltaicos proporcionados en la Figura 1 y 2.

## 6. Resultados

## 7. Conclusiones

## 8. Recomendaciones

## 9. Bibliografía