

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

*Trabajo de titulación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero Eléctrico*

**PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO**

**“MODELACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO  
CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA EN LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE  
CUENCA”**

**AUTORES:**

CARLOS OMAR BUELE AVILA  
ANDRÉS MARCELO CHAZI SOLIS

**TUTOR:**

ING. JULIO VIOLA, PhD

CUENCA – ECUADOR

2019

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Carlos Omar Buele Avila con documento de identificación N° 0106499122 y Andrés Marcelo Chazi Solis con documento de identificación N° 0105420020, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“MODELACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Eléctrico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2019



Carlos Omar Buele Avila

C.I.: 0106499122




Andrés Marcelo Chazi Solis

C.I.: 0105420020

## CERTIFICACIÓN

Yo, Julio Cesar Viola, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“MODELACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA”**, realizado por Carlos Omar Buele Avila y Andrés Marcelo Chazi Solis, obteniendo el *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2019



Ing. Julio Cesar Viola, PhD  
C.I.: 0151422953

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Carlos Omar Buele Avila con documento de identificación 0106499122 y Andrés Marcelo Chazi Solis con documento de identificación 0105420020, autores del trabajo de titulación: **“MODELACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, diciembre del 2019



Carlos Omar Buele Avila  
C.I.: 0106499122



Andrés Marcelo Chazi Solis  
C.I.: 0105420020

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer, a mi madre, familia y amigos por brindarme su apoyo incondicional en cada momento y ser un pilar fundamental durante la carrera universitaria.

*Carlos Omar Buele Avila*

En primer lugar, quiero agradecer al Divino Niño Jesús, por permitirme cumplir una meta académica más, a mis padres y familia que fueron el apoyo incondicional en toda la carrera universitaria. Agradecer de manera sincera al Ing. Julio Viola, quien fue el tutor de nuestro proyecto técnico, y por la ayuda que nos brindó: consejos y conocimientos, fueron de suma importancia para poder culminar con éxito nuestro proyecto de titulación.

*Andrés Marcelo Chazi Solis*

## **DEDICATORIAS**

A mis familiares, por brindarme su apoyo incondicional en cada momento y ser pilar fundamental para llegar a esta etapa de formación académica, siendo la motivación para seguir adelante y convertirme en un profesional, a mis amigos y compañeros, por brindar gratas experiencias a lo largo de la carrera universitaria, y a los profesores que han logrado impartir sus conocimientos valiosos para aplicarlos al beneficio de la sociedad.

*Carlos Omar Buele Avila*

A mi Madre, Padre, hermanos y amigos, que son mi pilar fundamental, gracias a su apoyo incondicional pude culminar esta etapa de formación académica, ciertamente los consejos que me brindaban y las palabras de aliento, se convirtieron en la motivación necesaria para convertirme en un excelente profesional, a los compañeros que, a lo largo de la carrera universitaria, se convirtieron en amigos y cuya amistad se sigue manteniendo, gracias al lema de Don Bosco “Honrados ciudadanos y buenos cristianos”.

*Andrés Marcelo Chazi Solis*

## Índice General

AGRADECIMIENTOS .....	I
DEDICATORIAS .....	II
Índice General .....	III
Índice de Figuras .....	VI
Índice de Tablas.....	IX
Índice de Anexos de Tablas .....	X
Resumen .....	XI
Introducción.....	XII
Antecedentes del Problema de Estudio .....	XIII
Justificación .....	XIV
Objetivos .....	XV
Objetivo General .....	XV
Objetivos Específicos .....	XV
Glosario .....	XVI
Capítulo 1.....	1
1. Marco Teórico .....	1
1.1. Energía Solar Fotovoltaica .....	1
1.2. Mercado Fotovoltaico .....	1
1.3. Capacidad Solar Fotovoltaica .....	2
1.4. Radiación Solar .....	3
1.5. Sistemas Fotovoltaicos .....	4
1.6. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos .....	4
1.6.1. Sistemas Conectados a la Red Eléctrica (SFCR).....	4
1.6.1.1. SFCR instalados sobre el Suelo .....	5
1.6.1.2. SFCR instalados sobre Edificaciones.....	6
1.6.2. Sistemas Aislados.....	7
1.7. Módulos Fotovoltaicos .....	7
1.7.1. Paneles Monocristalinos .....	8
1.7.1.1. Ventajas de los Paneles Monocristalinos.....	9
1.7.1.2. Desventajas de los Paneles Monocristalinos.....	9
1.7.2. Paneles Policristalinos.....	9

1.7.2.1.	Ventajas de los Paneles Policristalinos .....	10
1.7.2.2.	Desventajas de los Paneles Policristalinos.....	10
1.8.	Regulador.....	10
1.8.1.	Características de los Reguladores Fotovoltaicos.....	11
1.8.2.	Configuraciones de los Reguladores Fotovoltaicos .....	12
1.8.2.1.	Reguladores de Carga con Modulación por Ancho de Pulsos (PWM, por sus siglas en inglés).....	12
1.8.2.2.	Reguladores de Carga con Seguidor de Punto Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) .....	13
1.9.	Inversor .....	15
1.9.1.	Características de los Inversores Fotovoltaicos.....	15
1.9.1.1.	Eficiencia.....	15
1.9.2.	Topologías de Inversores Fotovoltaicos.....	16
1.9.2.1.	Inversor Tipo Puente H .....	16
1.9.2.1.1.	Puente H Modulado por Ancho de Pulso Bipolar (BPWM, por sus siglas en inglés) .....	16
1.9.2.1.2.	Puente H Modulado por Ancho de Pulso Unipolar (UPWM, por sus siglas en inglés) .....	17
1.9.2.1.3.	Puente H con Derivación Libre.....	18
1.10.	Hora Solar Pico.....	18
1.10.1.	Hora Solar Pico a una Inclinación $\beta$ <i>HSP<math>\beta</math></i> .....	18
1.11.	Armónicos .....	20
1.12.	Distorsión Armónica Total .....	21
Capítulo 2.....		22
2.	Levamiento de la Instalación Fotovoltaica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.....	22
2.1.	Paneles Fotovoltaicos .....	22
2.2.	Inversor .....	23
2.3.	Estación de Carga.....	24
2.4.	Conexión a Red.....	25
2.5.	Esquema de Conexión.....	25
2.6.	Análisis de Resultados Obtenidos .....	27
Capítulo 3.....		31
3.	Levantamiento de los Datos Meteorológicos de la Zona.....	31
3.1.	Estación Meteorológica.....	31
3.2.	Módulo de Expansión.....	32



3.3.	<b>Registrador de Datos</b> .....	32
3.4.	<b>Sensores de Medición</b> .....	33
3.4.1.	<b>Sensor de Presión Barométrica</b> .....	33
3.4.2.	<b>Sensor de Radiación</b> .....	33
3.4.3.	<b>Sensor de Temperatura y Humedad</b> .....	34
3.5.	<b>Regulador</b> .....	35
3.6.	<b>Panel Fotovoltaico</b> .....	35
3.7.	<b>Baterías</b> .....	36
3.8.	<b>Datos de la Estación</b> .....	36
3.9.	<b>Monitoreo de Datos</b> .....	37
3.10.	<b>Análisis de Resultados Obtenidos</b> .....	38
<b>Capítulo 4</b> .....		42
4.	<b>Modelación del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red Eléctrica</b> .....	42
4.1.	<b>Etapa de Generación</b> .....	42
4.2.	<b>Etapa de Inversión</b> .....	43
4.3.	<b>Etapa de Generación de C.A. E Inyección a la Red Eléctrica</b> .....	47
4.4.	<b>Comprobación de la Inyección de Energía en la Red Eléctrica</b> .....	49
4.4.1.	<b>Potencia Inyectada al Variar el Ángulo de Desfase</b> .....	50
4.4.2.	<b>Potencia Inyectada al Variar la Irradiancia Solar</b> .....	51
4.4.3.	<b>Potencia Inyectada con los Datos Obtenidos en la Estación Meteorológica</b>	53
<b>Capítulo 5</b> .....		61
5.	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	61
5.1.	<b>Conclusiones</b> .....	61
5.2.	<b>Recomendaciones</b> .....	62
<b>REFERENCIAS</b> .....		64
<b>ANEXOS</b> .....		68
I.	<b>Anexo 1</b> .....	68
II.	<b>Anexo 2</b> .....	72

## Índice de Figuras

Figura 1. Generación solar fotovoltaica global (2000-2017) [10].	2
Figura 2. Comparación de la generación solar mundial y la de China (2005-2017) [9].	3
Figura 3. Radiación solar directa, difusa y reflejada [6].	4
Figura 4. Esquema de un SFCR [14].	5
Figura 5. SFCR instalada sobre suelo con sistema de seguimiento (a) y sistema estático (b) [13].	6
Figura 6. SFCR instalado sobre una edificación [13].	6
Figura 7. Sistema fotovoltaico aislado [17].	7
Figura 8. Componentes de un módulo fotovoltaico [18].	8
Figura 9. Módulo monocristalino formado por células de silicio [19].	9
Figura 10. Módulo policristalino formado por células de silicio [19].	10
Figura 11. Esquema general de un SF con regulador solar. Fuente: Autores	11
Figura 12. Controlador de carga y cableado de la batería. Fuente: Autores	12
Figura 13. Diagrama de conexión del regulador PWM. Fuente: Autores	12
Figura 14. Curva de potencia de un panel fotovoltaico utilizando un regulador PWM [24].	13
Figura 15. Diagrama de bloques del regulador MPPT. Fuente: Autores	13
Figura 16. Diagrama de conexión del regulador MPPT. Fuente: Autores	14
Figura 17. Representación de la Curva de I-V (línea discontinua verde) y la Curva de P-V (línea discontinua azul) de un Panel Fotovoltaico [26].	14
Figura 18. Inversor tipo Puente H. Fuente: Autores.	16
Figura 19. Modelo de Simulink del Inversor BPWM [29].	17
Figura 20. Modelo de Simulink del Inversor UPWM [29].	17
Figura 21. Distribución horaria de la irradiancia solar en un día [31].	19
Figura 22. Ejemplo de distorsión armónica. Fuente: Autores	20
Figura 23. Espectro armónico de corriente de un transformador. [34]	21
Figura 24. (a) Panel monocristalino, (b) Panel policristalino. [36], [37]	23
Figura 25. Inversor Sunny Boy 5.0-US. Fuente: Autores	24
Figura 26. Estación de carga. Fuente: Autores.	24
Figura 27. Diagrama multifilar del sistema fotovoltaico. Fuente: Autores	25
Figura 28. Diagrama unifilar de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Fuente: Autores	26
Figura 29. Tensión C.C. de los paneles policristalinos medida. Fuente: Autores	27
Figura 30. Corriente C.C. de los paneles policristalinos medida. Fuente: Autores.	27
Figura 31. Potencia C.A. de los paneles policristalinos medida. Fuente: Autores	28
Figura 32. Tensión C.C. de los paneles monocristalinos medida. Fuente: Autores	28
Figura 33. Corriente C.C. de los paneles monocristalinos medida. Fuente: Autores	28
Figura 34. Potencia C.A. de los paneles monocristalinos medida. Fuente: Autores	29
Figura 35. Potencia de C.C. medida de los paneles fotovoltaicos. Fuente: Autores	29
Figura 36. Energía acumulada medida en el conjunto de paneles. Fuente: Autores	30
Figura 37. Energía acumulada medida a la salida de los inversores. Fuente: Autores.	30
Figura 38. Sistema Hidrometereológico MAWS110CP. Fuente: Autores.	32
Figura 39. Módulo de expansión QMI118. Fuente: Autores	32
Figura 40. Registrador de datos QML201C. Fuente: Autores	33

Figura 41. Sensor de presión barométrica BAROCAP. [43] .....	33
Figura 42. Piranómetro de clase A SR11. Fuente: Autores.....	34
Figura 43. Sensor de temperatura y humedad HMP155. Fuente: Autores.....	34
Figura 44. Regulador de tensión QBR101C. [46].....	35
Figura 45. Batería Bless Power. Fuente: Autores .....	36
Figura 46. Gráfica de comportamiento de la radiación solar. Fuente: Autores.....	38
Figura 47. Gráfica del comportamiento del recurso solar (16 de junio del 2019). Fuente: Autores .....	39
Figura 48. Gráfica del comportamiento de la temperatura (16 de junio del 2019). .....	39
Figura 49. Radiación solar obtenida a través de la estación meteorológica. Fuente: Autores...	40
Figura 50. Temperatura obtenida a través de la estación meteorológica. Fuente: Autores .....	40
Figura 51. Gráfica del promedio diario del recurso solar (semana completa). Fuente: Autores.	41
Figura 52. Gráfica del promedio diario de la temperatura (semana completa). Fuente: Autores	41
Figura 53. Modelo circuital de un panel fotovoltaico en Simulink. Fuente: Autores .....	42
Figura 54. Subsistemas de los bloques de generación. Fuente: Autores .....	43
Figura 55. Esquema eléctrico de un inversor H5. Fuente: Autores.....	44
Figura 56. Inversor monofásico en configuración puente H. Fuente: Autores .....	44
Figura 57. Circuito de control de los semiconductores IGBT. Fuente: Autores .....	45
Figura 58. Señal de activación de los IGBT. Fuente: Autores .....	45
Figura 59. Circuito de potencia controlado por el ángulo de fase. Fuente: Autores .....	46
Figura 60. Esquema de un inversor Sunny Boy. Fuente: Autores.....	46
Figura 61. Inversores Sunny Boy utilizados para las diversas tecnologías fotovoltaicas. Fuente: Autores .....	47
Figura 62. Transformador trifásico 19597P instalado en la cabina de transformación del edificio de Centro de Cómputo. Fuente: Autores.....	48
Figura 63. Modelamiento del sistema eléctrico con transformador trifásico en simulink. Fuente: Autores .....	49
Figura 64. Modelo circuital del SFCR de la Universidad Politécnica Salesiana. Fuente: Autores .....	50
Figura 65. Potencia inyectada a la red al variar el ángulo de desfase. Fuente: Autores.....	51
Figura 66. Corriente de los paneles monocristalinos al variar el ángulo de desfase. Fuente: Autores .....	51
Figura 67. Modelo para el comportamiento de la irradiancia vs el ángulo de desfase. Fuente: Autores .....	52
Figura 68. Potencia inyectada a la red al variar la irradiancia solar. Fuente: Autores .....	53
Figura 69. Corriente de los paneles monocristalinos al variar la irradiancia solar. Fuente: Autores .....	53
Figura 70. Potencia activa del SFCR con los datos de la estación meteorológica. Fuente: Autores .....	54
Figura 71. Irradiancia solar simulada a través de Simulink. Fuente: Autores.....	54
Figura 72. Temperatura ambiente simulada a través de Simulink. Fuente: Autores.....	55
Figura 73. Señal de Corriente en el conjunto de paneles monocristalinos en C.C. Fuente: Autores .....	55
Figura 74. Señal de Corriente en el conjunto de paneles policristalinos en C.C. Fuente: Autores .....	56
Figura 75. Señal de Voltaje en el conjunto de paneles monocristalinos. Fuente: Autores.....	56

Figura 76. Señal de Voltaje en el conjunto de paneles policristalinos. Fuente: Autores.....	57
Figura 77. Potencia de C.C. simulada de los paneles fotovoltaicos. Fuente: Autores .....	57
Figura 78. Señal de Corriente al momento de inyectar la energía en la red eléctrica. Fuente: Autores .....	58
Figura 79. Energía diaria simulada en los paneles. Fuente: Autores.....	58
Figura 80. Energía diaria simulada a la salida de los inversores. Fuente: Autores .....	59
Figura 81. Valores de tensión rms simulados en la red eléctrica con el sistema fotovoltaico. Fuente: Autores .....	59
Figura 82. Valores de corriente rms simulados en la red eléctrica con el sistema fotovoltaico. Fuente: Autores .....	60

## Índice de Tablas

Tabla 1. Control de un inversor tipo Puente H. Fuente: Autores .....	16
Tabla 2. Horas de Sol Pico para la Ciudad de Cuenca. [26] .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 3. Características de los dispositivos de la estación meteorológica ubicada en la sede Cuenca. Fuente: Autores. ....	31
Tabla 4. Características del panel fotovoltaico. Fuente: Autores .....	35
Tabla 5. Características de la batería usada en la estación meteorológica. Fuente: Autores.....	36
Tabla 6. Datos obtenidos del datalogger QML201C. Fuente: Autores .....	37
Tabla 7. Tabla de datos característicos de los paneles fotovoltaicos. Fuente: Autores.....	43
Tabla 8. Datos de la Placa del Transformador 19597P de 200kVA. Fuente: Autores. ....	48
Tabla 9. Mediciones de irradiancia con respecto al ángulo de desfase. Fuente: Autores .....	52

## Índice de Anexos de Tablas

Tabla A1. Datos obtenidos de la estación meteorológica. Fuente: Autores.....	68
Tabla A2. Mediciones de C.C. y C.A. del inversor 198 conectado a los paneles policristalinos. Fuente: Autores .....	72
Tabla A3. Mediciones de C.C. y C.A. del inversor 199 conectado a los paneles monocristalinos. Fuente: Autores .....	74

## **Resumen**

Los SFSCR, son sistemas que operan conectados a la red eléctrica existente, el diseño de estos sistemas tiene como meta el suministro energético de la fase, si excede los valores necesarios del aprovisionamiento, la energía producida se inyecta a la red eléctrica. Su propósito principal es intensificar su producción anual para tener una disminución en el consumo eléctrico. Los principales componentes de este tipo de sistema son los generadores fotovoltaicos, un inversor de corriente continua (C.C.) a corriente alterna (C.A.) y las protecciones necesarias para conectarlos a la red.

Se hizo un modelo circuital del sistema fotovoltaico conectado a la red de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, dado que el sistema analizado posee paneles fotovoltaicos de distintas tecnologías, se obtienen dos modelos independientes. El bloque "PV Array" simula un panel fotovoltaico por medio de su circuito eléctrico, el cual consta de una fuente de corriente dependiente de la radiación y de la temperatura del ambiente, además de un diodo y de dos resistencias internas. Para concluir el modelamiento del inversor se toma en cuenta que este posee dos entradas monofásicas, una para cada conjunto de paneles. La simulación del modelado final fue realizada en Matlab/Simulink.

La metodología empleada para cumplir con los objetivos establecidos en el trabajo de titulación es el método experimental y empírico. Fundamentado en mediciones obtenidas por medio de la estación meteorológica y del laboratorio de energía fotovoltaica. Con la modelación del sistema realizada, se procede a efectuar varias pruebas para determinar el funcionamiento de esta a partir de la variación de los parámetros de entrada como son: irradiancia, temperatura y ángulos de fase entre la tensión generada por el inversor y la tensión de la línea. Además, se utiliza un inductor de acoplamiento que cumple la función de permitir la interconexión entre la tensión de salida del inversor fotovoltaica la cual es conmutada y la tensión de línea que es sinusoidal. Además, con los datos suministrados por la estación meteorológica, fueron utilizados para la simulación de la potencia activa de la planta fotovoltaica.

## **Introducción**

Los sistemas fotovoltaicos transforman la radiación solar en energía eléctrica mediante paneles, los cuales captan esta radiación produciendo energía limpia reduciendo considerablemente las emisiones de CO<sub>2</sub>, los sistemas FV dependen de varios factores al momento de generar energía, por ejemplo: las horas de radiación solar que se produzcan durante el día, la orientación e inclinación en la que se instalen los paneles y la cantidad de paneles que se instalen dentro de este sistema. La energía generada por los paneles fotovoltaicos en los sistemas FV es acumulada en bancos de baterías. Los sistemas enlazados a la red no necesitan baterías, debido a que la energía se almacena en la propia red eléctrica.

El Capítulo 1 inicia con una descripción de la energía solar fotovoltaica, mercado fotovoltaico, radiación solar, los tipos de sistemas fotovoltaicos, desarrollo de los módulos fotovoltaicos, el regulador con sus diversas configuraciones, las características del inversor y sus diferentes topologías, etc.

El Capítulo 2 describe el levantamiento de la instalación fotovoltaica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, en donde se explican cada uno de los componentes utilizados en la misma. Además, se realiza el análisis de las mediciones obtenidas tanto de C.C. como de C.A del laboratorio de energía fotovoltaica.

El Capítulo 3 explica el levantamiento de los datos meteorológicos dentro de la zona de estudio, en donde se enuncian los elementos más relevantes de la estación meteorológica. También, se efectúa el filtrado y análisis de los datos obtenidos de la estación antes mencionada como, por ejemplo: presión atmosférica, radiación solar difusa, temperatura ambiente, etc.

El Capítulo 4 expone una simulación realizada con la finalidad de aprobar el sistema establecido. Este modelo servirá para experimentar la variación de la potencia inyectada con el ángulo de desfase, la irradiancia y los datos adquiridos en la estación meteorológica. En la modelación se explica las partes que la componen y los resultados obtenidos.

Por último, el Capítulo 5 muestra la interpretación de los resultados de las pruebas realizadas de simulación y pruebas de las mediciones de las secciones anteriores. Se expresa el efecto y la importancia que tuvieron para el diseño final del modelo circuital del SFCR. Sugerencias para nuevos estudios sobre este tema se exponen en este capítulo.



## **Antecedentes del Problema de Estudio**

El Ecuador al estar ubicado en la línea equinoccial tiene una gran ventaja en cuanto a la radiación solar, puesto que la radiación que se produce es prácticamente perpendicular, con variaciones mínimas durante el año, generando un gran potencial fotovoltaico [1].

Existen sistemas fotovoltaicos instalados en diferentes ciudades del Ecuador, el objetivo de estos desarrollos es reducir el uso de combustibles fósiles usados para la generación de energía eléctrica. Puesto que producen grandes cantidades de dióxido de carbono que contaminan el medio ambiente. Además, son desarrolladas para producir energía tanto en sectores industriales o viviendas que tienen un fácil acceso a la conexión de la red eléctrica, como en zonas aisladas para las cuales el acceso es limitado [1] [2].

Para el caso de la Universidad Politécnica Salesiana, se han efectuado trabajos previos para la recopilación de datos acerca de la radiación solar y la temperatura que tiene esta zona, a través de una estación meteorológica, con la cual ya se han realizado diversas investigaciones obteniendo parámetros válidos para un estudio de la generación fotovoltaica [2].

Cuando se consideran sistemas autónomos, para obtener la generación de energía y potencia, depende de la zona geográfica del sistema y de la configuración instalada. Actualmente, existen dos sistemas fotovoltaicos en la Universidad Politécnica Salesiana, los cuales serán tomados como objeto de estudio [3].

El primer sistema fotovoltaico consta de paneles solares monocristalinos como policristalinos. Tres paneles de cada tecnología antes mencionada son conectados en paralelo hacia un regulador independientemente y de este a su vez hacia un banco de baterías de 100 Ah [3].

El segundo sistema fotovoltaico, está conformado por paneles policristalinos y tiene por objeto ayudar a la movilidad eléctrica, fue instalado recientemente en la universidad en un área lateral a la cancha de fútbol, junto al estacionamiento de la universidad y tiene una capacidad instalada de 13,2 kWp en un área de 73,3 m<sup>2</sup> que sirve para el autoconsumo de la Universidad. Este sistema está diseñado para la recarga de dos motos y dos autos eléctricos que posee la universidad. Se han empleado módulos monocristalinos y policristalinos para el proyecto, pues la universidad pretende explorar las diferencias de generación de electricidad de estas dos tecnologías [4].

## **Justificación**

La razón por la que se optó este proyecto de titulación es fomentar el uso de la energía limpia, verde o renovable como lo es la energía solar, ya que se está ingresando en una nueva era en la cual se están desarrollando nuevas regulaciones y proyectos para este tipo de generación. En tanto que los próximos cuatro años, esta clase de energía significará la más grande adición anual de capacidad dentro de las energías renovables, por arriba de la energía hidráulica y eólica. Esto motivado por la constante disminución en los precios de la tecnología y la interacción del mercado chino como resultado de las modificaciones en las políticas empleadas [5].

Aunque actualmente la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos no es muy alta, esta tecnología reduce continuamente sus costos y es más utilizada cada día debido a la necesidad por obtener energía sin dañar al medio ambiente. Este proyecto aprovecha los conocimientos adquiridos en la formación académica, y desarrolla una aplicación de utilidad para obtener los beneficios de la radiación solar [5].

Dentro del campo de las energías renovables a largo plazo y la electromovilidad en el país, se ha construido un sistema para aprovechar la energía solar en la universidad. El proyecto en sí es positivo porque se tiene un auto consumo de energía menor, además disminuye el consumo de energía de la red convencional y las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera [4].

La generación fotovoltaica es una tecnología limpia, no necesitan de mucho mantenimiento. Prácticamente con el agua lluvia los paneles se limpian. Tienen más ventajas que desventajas, no genera un impacto visual fuerte y es amigable con el medio. Conjuntamente, la Universidad utiliza estas instalaciones para fines de investigación y enseñanza [4].

Los fabricantes de los paneles solares realizan pruebas en laboratorio para así tener ciertas condiciones de funcionamiento en las cuales los paneles funcionan de cierta manera. Al estar expuestos a condiciones ambientales diferentes a las que se realizaron las pruebas, los paneles tienden a tener un cambio en su generación, bien sea mejorando o reduciéndose su rendimiento, por lo cual se desea conocer los efectos que producen las condiciones normalizadas denominadas en inglés Stansdart Test Conditions (STC) para paneles en el Ecuador [4].

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Modelar y efectuar un análisis comparativo entre el sistema fotovoltaico instalado en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca y una modelación obtenida a partir de los datos nominales del fabricante y las medidas reales realizadas en las unidades instaladas.

### **Objetivos Específicos**

1. Realizar una revisión del estado de arte de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica.
2. Llevar a cabo el levantamiento de la instalación fotovoltaica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca y de los datos meteorológicos de la zona.
3. Modelar el sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica de la U.P.S.
4. Analizar los resultados de las simulaciones según los parámetros del fabricante y contrastarlos con los datos adquiridos en el laboratorio de energía fotovoltaica.
5. Evaluación del impacto del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

## **Glosario**

**CA:** Corriente Alterna.

**DC:** Corriente Continua.

**HSP:** Hora Solar Pico.

**FP:** Factor de Potencia.

**FPD:** Factor de Potencia de Desplazamiento.

**FV:** Fotovoltaico.

**RMS:** Root Mean Square (Valor Eficaz de Corriente o Voltaje).

**SFCR:** Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red.

**THD:** Total Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Total).

# Capítulo 1

## 1. Marco Teórico

### 1.1. Energía Solar Fotovoltaica

Los inicios del aprovechamiento de la energía solar se pueden situar en el año 1839, con el descubrimiento realizado por el físico francés Edmond Becquerel, denominado efecto fotovoltaico. Este impacto ocurre en los llamados paneles electrolíticos o solares, que son dos materiales semiconductores que transportan electricidad, los mismos que al ser expuestos a rayos solares generan una diferencia de potencial. Al no ser suficiente la liberación de electrones por parte de los rayos solares, es necesario que se genere un voltaje que pueda mover estos electrones en una dirección definida, de esta forma uno de ellos debe ceder electrones con facilidad y el otro debe receptor esos electrones, a estos componentes se los conoce también como materiales tipo N y P respectivamente [6]–[8].

El primer panel fotovoltaico funcional fue creado con selenio, la eficiencia que tenía este panel era baja, pero se planteó la idea de que se podía generar energía sin partes móviles. Años después se realizan investigaciones en los laboratorios Bell por parte del científico Gerald Pearson patentando así las células solares con semiconductores como el silicio, mejorando su eficiencia considerablemente. Las primeras aplicaciones representativas que se obtuvieron fueron durante el recorrido espacial entre la Unión Soviética y Estados Unidos, suministrando energía a los satélites que fueron lanzados al espacio [6]–[8].

### 1.2. Mercado Fotovoltaico

Desde su invención hasta el año de 1980 el desarrollo de la industria fotovoltaica se vio perjudicada por el costo de los materiales y el tamaño de los módulos. Mientras que las empresas ubicadas en Estados Unidos y Europa investigaban maneras más eficaces de producir paneles fotovoltaicos con elementos como el silicio amorfo “a-Si” y el seleniuro de cobre indio “CuInSe<sub>2</sub>”, las empresas japonesas revolucionaron el mercado con la producción de módulos convencionales de silicio cristalino y silicio amorfo, todo esto para aplicarse en equipos de menor tamaño como calculadoras, relojes ;etc., llegando así a producir hasta megavatios en el mercado al sumar la potencia de todos estos paneles fotovoltaicos [7].

En la actualidad este mercado se ha desarrollado de tal manera que existen paneles para su instalación en edificios, ya sea para abastecer la carga en horas pico de demanda o para reducir el consumo que se produce a la red eléctrica principal. Los paneles fotovoltaicos se han llegado a construir para instalarlos en cualquier parte de los edificios o viviendas, ya sean en los techos, ventanas o en la fachada de los mismos [7], [9].

El mercado fotovoltaico ha tenido su auge en los últimos años principalmente en China, la cual ha generado un aumento del 75% respecto a su generación fotovoltaica en el año 2012. Esto se debe en gran medida a sus políticas, mediante las cuales se ha disminuido considerablemente los precios de esta tecnología. Este tipo de política de apoyo se ha desarrollado en otros países como Estados Unidos y algunos de la Unión Europea generando así un crecimiento del 27% anual en los últimos cinco años con un costo promedio de \$100 por megavatio hora (MWh) [9].

### 1.3. Capacidad Solar Fotovoltaica

La generación fotovoltaica comenzó a producir valores considerables desde el año 2000 llegando a generar un Teravatio hora anual, como se puede observar en la Figura 1. En los siguientes años tuvo un incremento poco considerable hasta el año 2010 cuando se comenzaron a instalar centrales de generación solar. Este gran crecimiento en el 2010 se debe a la disminución de precios en los materiales de hasta un 70 %. La generación global que se presentó hasta el año 2017 es casi equivalente a un 2% de la generación eléctrica a nivel mundial [9], [10].

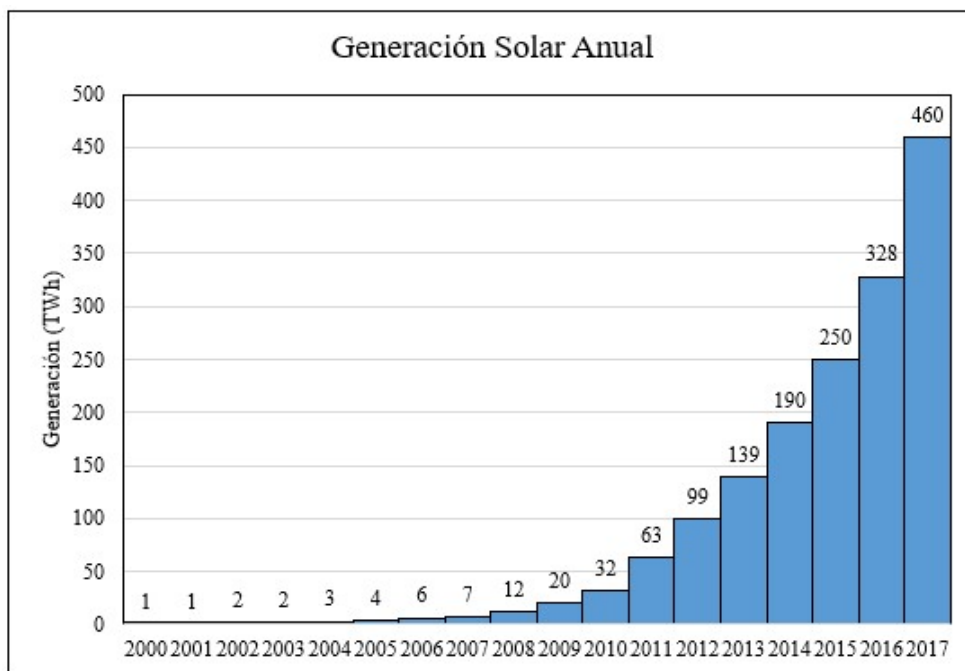


Figura 1. Generación solar fotovoltaica global (2000-2017) [10].

Con la disminución en los precios para instalaciones solares de gran escala, China empezó a realizar instalaciones para centrales solares subiendo su generación de 0.6 a 2.1 GW en tan solo un año, en los años siguientes se tuvo un aumento de casi el doble de generación exceptuando en el periodo del 2013-2014, tal como se observa en la Figura 2. Gracias a esta disminución en precios y a los desarrollos tecnológicos de las centrales solares, esta llegó a su punto más alto con una inversión aproximada de 146 mil millones de dólares, pese a que los nuevos proyectos reducirían su precio en un 13% [9], [10].

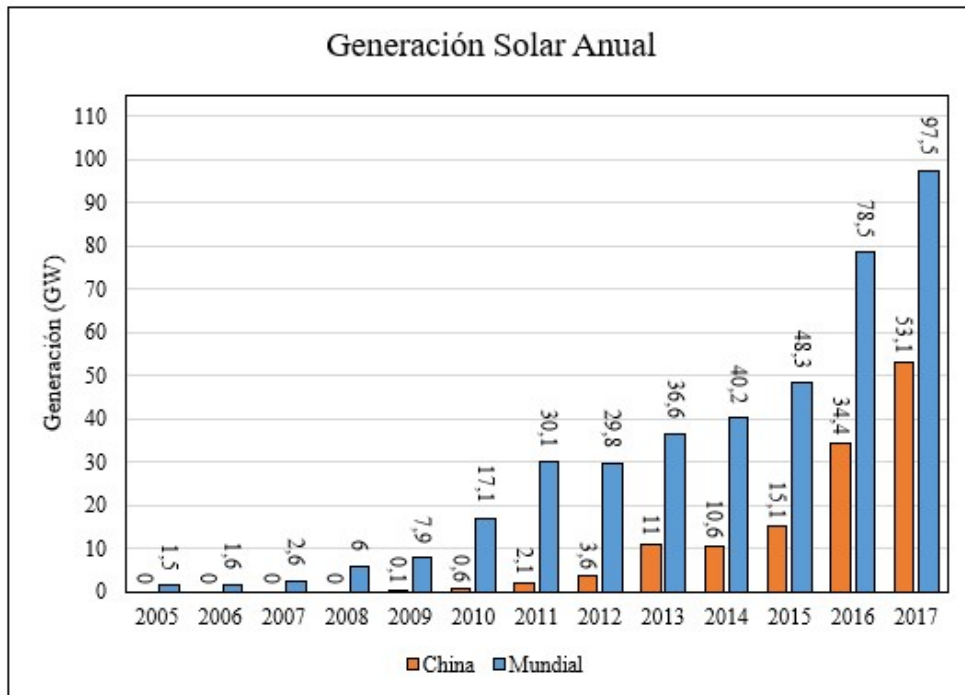


Figura 2. Comparación de la generación solar mundial y la de China (2005-2017) [9].

#### 1.4. Radiación Solar

El Sol es considerado una fuente de energía puesto que produce una radiación de  $62600 \text{ kW/m}^2$  por este motivo existe un gran potencial de utilización para la conversión en energía eléctrica. La radiación proviene de un proceso de fusión nuclear que ocurre en el Sol por medio de compuestos como: el hidrógeno y el helio, transmitiéndose a través de ondas electromagnéticas que poseen diferentes longitudes de onda. El espectro electromagnético se encuentra conformado por varias ondas electromagnéticas generadas por el Sol, las cuales viajan por el espacio para llegar a la Tierra con una velocidad de  $299.792 \text{ km/s}$  [8], [11], [12].

La Tierra recibe solo una pequeña cantidad de radiación del total producida por el Sol. Esta irradiación se encuentra dividida en tres tipos principalmente, los cuales con: radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada, las cuales se las puede observar de mejor manera en la Figura 3 [8], [11], [12].

**Radiación Directa:** Es la que incide directamente sobre el suelo u objetos, sin haber tenido ningún cambio en su trayecto.

**Radiación Difusa:** Sufre cambios en su dirección por acción de las nubes o es absorbida por estas al circular por la atmósfera. Los cambios que afectan a esta se caracterizan por no producir sombra sobre los objetos.

Radiación Reflejada: Es la que se refleja desde el suelo hacia los diferentes objetos que están a una altura superior.

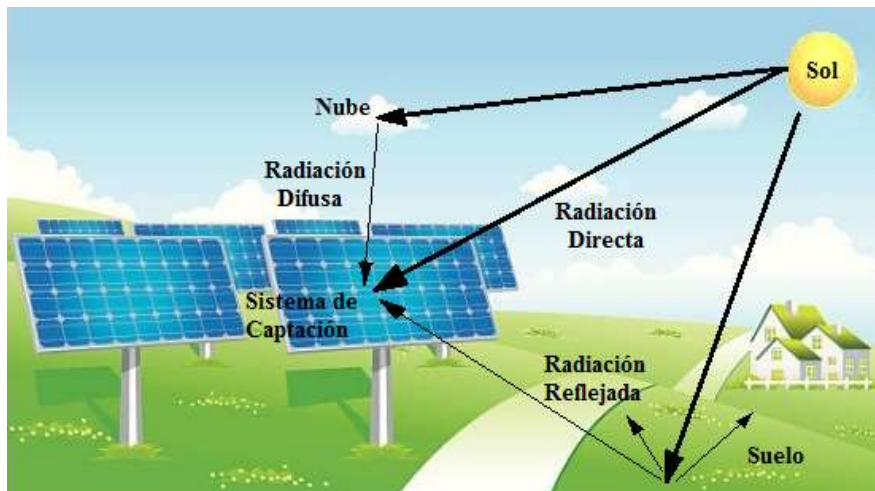


Figura 3. Radiación solar directa, difusa y reflejada [6].

## 1.5. Sistemas Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos son un conjunto de componentes con la función de transformar la radiación solar en energía eléctrica, estos sistemas a su vez se dividen en dos subconjuntos: los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica (SFCR) y los sistemas fotovoltaicos aislados. La configuración que pueden tener estos sistemas va a depender de la aplicación en la que vayan a ser utilizados, el tipo de carga que va a ser suministrada por los paneles y, lo más importante, el recurso solar que exista en la zona donde va a estar ubicado. Además, en base a la ubicación geográfica, se realizará el montaje de los paneles con la orientación que garantice el mejor aprovechamiento de la radiación solar [13].

## 1.6. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

### 1.6.1. Sistemas Conectados a la Red Eléctrica (SFCR)

Los SFCR, son sistemas que operan enlazados a la red eléctrica existente, su diseño tiene como meta el suministro energético de la fase, si excede los valores necesarios del aprovisionamiento, la energía producida es inyectada a la red eléctrica. Su propósito principal es intensificar su producción anual para tener una disminución en el consumo eléctrico. Los principales dispositivos de este tipo de sistema son los generadores fotovoltaicos, un inversor de C.C. a C.A., y las protecciones necesarias para conectarlos a la red, estos componentes se pueden observar de mejor manera en la Figura 4 [13]–[15].



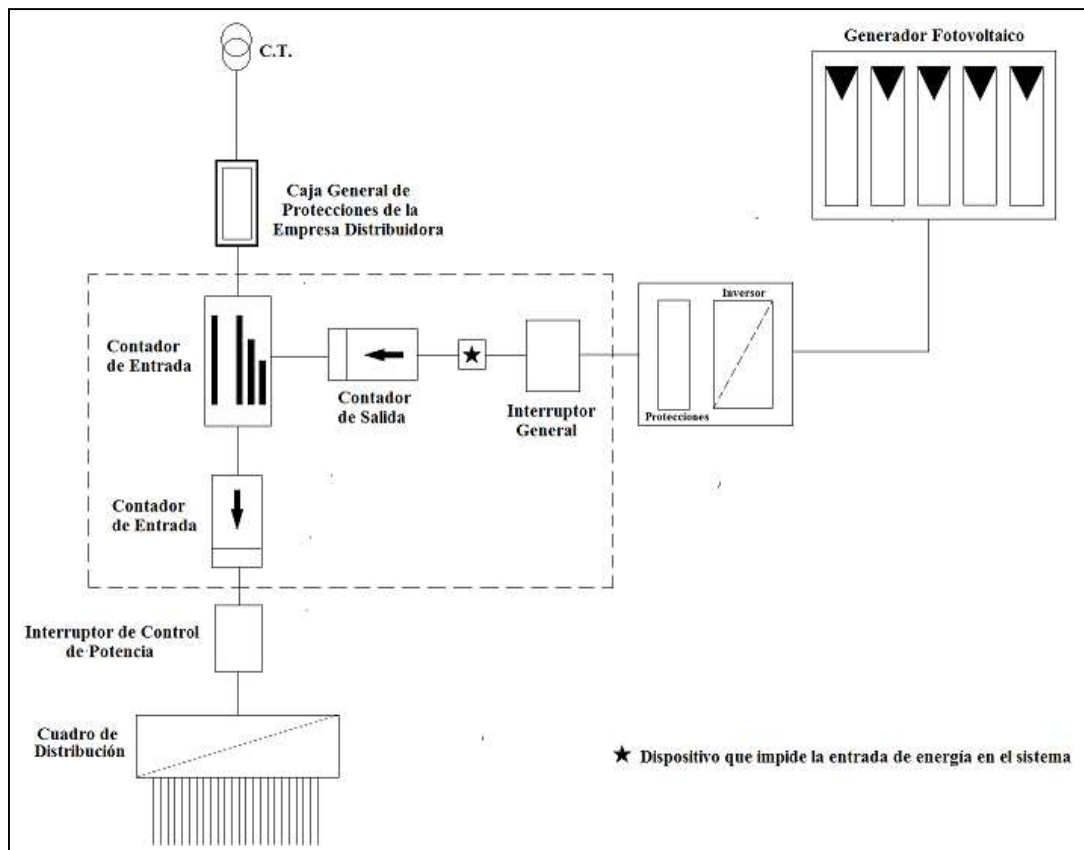


Figura 4. Esquema de un SFCR [14].

Los SFCR pueden ser instalados de dos maneras: Entronizaciones sobre el suelo o sobre edificaciones. Estas instalaciones se diferencian principalmente por el método de captación de la radiación solar sobre los paneles.

#### 1.6.1.1. SFCR instalados sobre el Suelo

La principal característica de esta configuración es maximizar la generación eléctrica anual con el menor uso de suelo y los costos más bajos. En esta clase de sistemas se utilizan tanto, sistemas de seguimiento como sistemas estáticos, los cuales deben ser configurados para tener la mayor absorción de radiación solar. Con los sistemas de seguimiento se utiliza un motor de C.C. para modificar el ángulo de inclinación de los paneles, teniendo casi siempre perpendicularidad de los rayos solares sobre los paneles, mientras que en los sistemas estáticos se busca una ubicación fija de los paneles en el cual se maximice la captación de la radiación. La Figura 5 muestra una aplicación de los SFCR con un sistema estático y con un sistema de seguimiento [13].



a)



b)

Figura 5. SFCR instalada sobre suelo con sistema de seguimiento (a) y sistema estático (b) [13].

#### 1.6.1.2. SFCR instalados sobre Edificaciones

La instalación sobre edificaciones tiende muchas veces a ser más complicada puesto que intervienen varios factores que limitan las posibilidades del montaje como son: la ubicación geográfica, la orientación y su inclinación. Por lo cual no se puede realizar un mejoramiento de generación con el ángulo de inclinación, dependiendo de los acoplamientos con relación a las condiciones de la edificación. Es de vital importancia la potencia que se vaya a instalar en el sistema, puesto que con ello se define la cantidad de paneles a ser utilizados y a su vez se define la cantidad de carga estructural adicional que puede soportar el edificio sin que sufra deterioro. La Figura 6 muestra una aplicación de los SFCR instalados sobre varias viviendas [13].

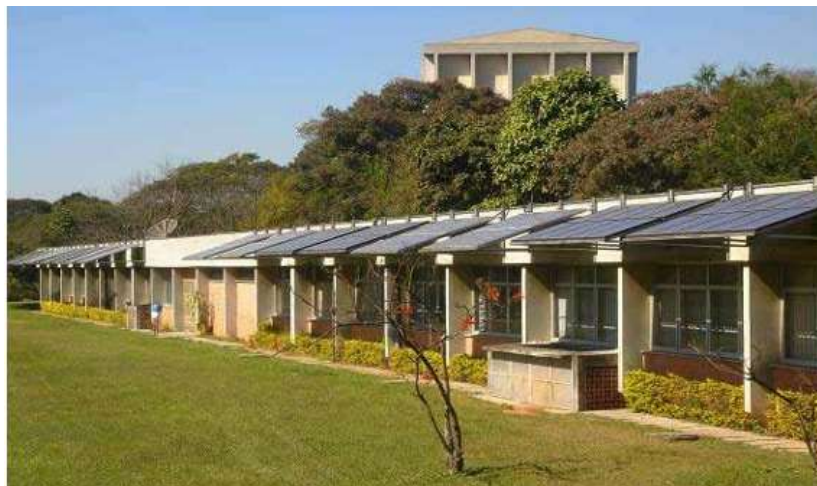


Figura 6. SFCR instalado sobre una edificación [13].

### 1.6.2. Sistemas Aislados

Este tipo de sistema se caracteriza principalmente por satisfacer toda la demanda energética de la estación, esto lo logra con la acumulación de energía en bancos de baterías y el uso de reguladores para mantener constante el despacho de esta energía. La Figura 7 muestra el esquema de conexión de este tipo de sistemas. Los sistemas aislados se usan comúnmente en zonas rurales o zonas alejadas completamente de las líneas de distribución del servicio eléctrico [16], [17].

Para este sistema se deben considerar varios aspectos al momento del diseño, tales como: la potencia instantánea, los días de autonomía, la cantidad de terreno. Se debe considerar, además, el día con menor radiación solar y con mayor carga eléctrica para poder satisfacer la demanda. La potencia instantánea es necesaria para el dimensionamiento de los inversores y el banco de baterías puesto que si se utilizan motores estos consumen una corriente de arranque mucho mayor a la nominal y los equipos deben soportar dicha corriente. Por otra parte, tenemos los días de autonomía que se ven reflejados en los bancos de batería ya que estos serán los que suministren la energía al sistema los días en que el tiempo no sea favorable para la absorción de la radiación solar. El último aspecto principal mencionado es la cantidad de terreno que se va a utilizar ya que se debe minimizar el área del suelo para así no tener longitudes muy extensas [16], [17].

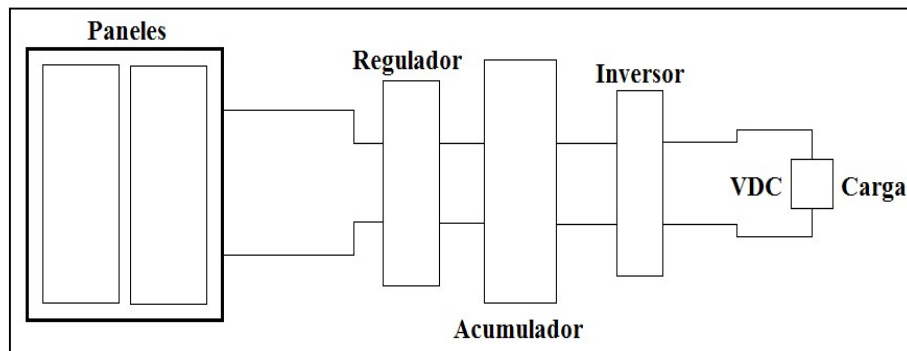


Figura 7. Sistema fotovoltaico aislado [17].

### 1.7. Módulos Fotovoltaicos

Como ya se ha mencionado el desarrollo de los módulos fotovoltaicos o paneles fotovoltaicos se ha incrementado considerablemente en los últimos diez años, utilizándose muchas clases de semiconductores para su construcción, siendo los basados en estructuras de silicio monocristalinas, policristalinas y amorfas, los que han presentado el mayor rendimiento. El 90% de las instalaciones actuales utilizan este tipo de paneles. Estos módulos contienen alrededor de 40 a 80 células fotovoltaicas para la generación eléctrica con un tamaño que varía entre los 80 cm<sup>2</sup> hasta los 2 m<sup>2</sup>. En la Figura 8 se observa la composición de un módulo fotovoltaico estando conformado por los siguientes elementos:

- **Cubierta Exterior:** Esta cubierta tiene la responsabilidad de resguardar a cada uno de los elementos internos de las inclemencias meteorológicas y autorizar la entrada de la radiación solar para la generación.
- **Capas Encapsulantes:** Compuestas principalmente de silicona u otro material que permita la transmisión de radiación solar, esta capa amortigua los posibles impactos producidos por objetos extraños o las vibraciones producidas por tormentas y adhiere las cubiertas de los semiconductores.
- **Protección Posterior:** Como su nombre lo indica protegen al panel en su parte posterior de las inclemencias meteorológicas, principalmente de la humedad que se pueda presentar, los materiales más utilizados para esta parte suelen ser los acrílicos y siliconas.
- **Marco de Soporte:** Comúnmente de acero inoxidable y como su nombre ya lo menciona dan soporte a los módulos y forman una unión mecánica entre ellos.
- **Contactos Eléctricos:** Son los terminales del panel, donde se envía la energía hacia los inversores o reguladores dependiendo de su conexión [18]–[20].

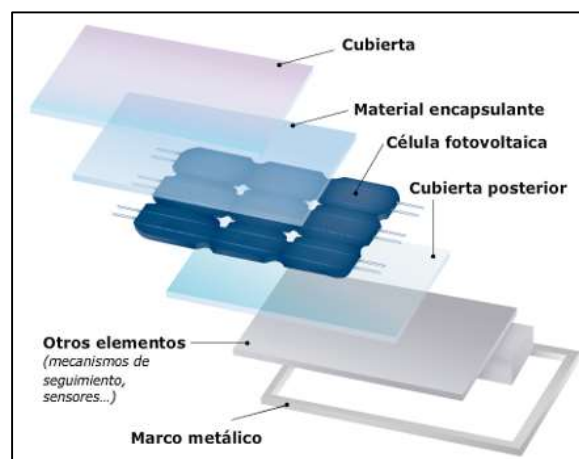


Figura 8. Componentes de un módulo fotovoltaico [18].

### 1.7.1. Paneles Monocristalinos

Este tipo de panel está conformado por un monocristal de silicio, el cual consiste en la fusión del semiconductor de silicio con una mínima parte de fósforo o boro en un crisol a 1425 °C. Es decir, se encuentran constituidos en unidades provenientes de una barra de silicio íntegramente materializado en un solo pedazo, como se puede observar en la Figura 9. Las diferentes pruebas realizadas en el laboratorio demuestran un rendimiento superior del 24,7% para dicho tipo de paneles, y para los modelos comerciales del 16% [19].

Si se desea mejorar el rendimiento y a su vez disminuir los costes en la producción de cada uno de los paneles fotovoltaicos monocristalinos, se deben reducir los cuatro lados de todos los

conjuntos cilíndricos para conseguir láminas de silicio, y de esta manera lograr esa apariencia muy característica que poseen con sus esquinas redondeadas [19].



Figura 9. Módulo monocristalino formado por células de silicio [19].

#### **1.7.1.1. Ventajas de los Paneles Monocristalinos**

Los paneles monocristalinos poseen unas de las tasas de mayor rendimiento debido a que están elaboradas con silicio altamente puro. Su vida útil es mucho más prolongada, haciendo que la mayoría de fabricantes de paneles monocristalinos ofrezcan garantías incluso hasta 25 años. Adicionalmente tienen un mejor funcionamiento en comparación con los paneles policristalinos de propiedades semejantes bajo escenarios de poca luz. No obstante, el rendimiento tiende a reducirse en todos los paneles debido a las altas temperaturas, esto sucede en menor proporción en los paneles policristalinos que en aquellos que son monocristalinos [18], [19].

#### **1.7.1.2. Desventajas de los Paneles Monocristalinos**

Un inconveniente que se tiene en dichos paneles es el exagerado costo de las células monocristalinas, debido al requerimiento de poseer más silicio que las policristalinas, derivando así en la pérdida del componente durante el proceso de elaboración, en vista de la clase de corte efectuada. Además, son perceptibles al sombreado parcial, por tanto, al permanecer sombreados lo más conveniente es utilizar micro inversores solares, asegurando que la mayoría de la instalación fotovoltaica no se encuentre afectada por un solo panel fotovoltaico [18], [19].

### **1.7.2. Paneles Policristalinos**

Inicialmente los paneles fotovoltaicos policristalinos de silicio fueron presentándose en el mercado a mediados de 1981, dichos paneles están basados en segmentos de una barra de silicio la cual se encuentra constituida desorganizadamente en forma de diminutos cristales. Una gran

diferencia con los paneles monocristalinos, es que el silicio que está en forma bruta es derretido y esparcido en un molde cuadrado. Posteriormente se lo deja enfriar para así dividirlo en láminas perfectamente cuadradas [19].

De manera visual se los puede reconocer muy rápidamente debido a que presentan un aspecto granulado dentro de su superficie. El rendimiento que se puede lograr con estos paneles es inferior en contraste con los monocristalinos, puesto que en el laboratorio se obtiene un rendimiento del 19.8% y para aquellos módulos es del 14%, influyendo así en la reducción de su precio. Una imagen de este tipo de panel se muestra en la Figura 10 [19].



Figura 10. Módulo policristalino formado por células de silicio [19].

#### **1.7.2.1. Ventajas de los Paneles Policristalinos**

El método de producción de los paneles fotovoltaicos policristalinos es mucho más sencillo, logrando que su costo económico sea menor. Además, la pérdida de silicio es más baja comparada con la utilizada en el proceso que se requiere para la elaboración del monocristalino [18], [19].

#### **1.7.2.2. Desventajas de los Paneles Policristalinos**

Los paneles policristalinos presentan una reducida resistencia ante el calor a diferencia de los paneles monocristalino, lo cual implica que un panel policristalino funcionará inapropiadamente al igual que un monocristalino en altas temperaturas. En general se puede afirmar que se requiere cubrir una zona más extensa con paneles policristalinos en lugar de paneles monocristalinos para obtener la misma potencia de generación [18], [19].

### **1.8. Regulador**

El regulador o controlador solar resulta indispensable en los sistemas fotovoltaicos que emplean baterías. Su función principal es la de manejar el proceso de carga a las baterías controlando la tensión y corriente que se entrega a estas. Su actividad elemental es la de impedir la sobrecarga

de la batería, y de esta manera impedir que su vida útil se reduzca. Un regulador de carga es capaz de detectar el voltaje que posee la batería, en función de esto, regular la corriente de carga. Esto es particularmente importante con aquellas baterías especiales como las de plomo ácido selladas en las cuales no se puede sustituir el agua perdida producto de la sobrecarga. La conexión de este producto se la puede observar en la Figura 11 [21], [22].

El regulador también tiene como función proteger contra cortocircuitos y conexiones con alteración de polaridad para el sistema solar en el que se encuentran instalados [21].

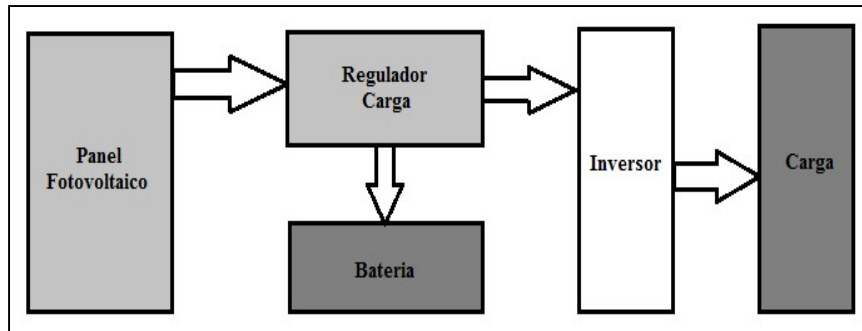


Figura 11. Esquema general de un SF con regulador solar. Fuente: Autores

### 1.8.1. Características de los Reguladores Fotovoltaicos

Los reguladores fotovoltaicos poseen típicamente seis entradas siendo dos de estas destinadas para su instalación, otras dos para el conjunto de paneles fotovoltaicos, una para el banco de baterías y la restante, para la carga del DC, como se puede observar en la Figura 12.

Los componentes de un regulador solar son:

- Intervalo de Histéresis Superior: Es la diferencia que se da entre la tensión que el regulador admite debido a la circulación de toda la corriente generada por los paneles fotovoltaicos y la tensión máxima de regulación [23].
- Tensión Máxima de Regulación: Esta es la cantidad de tensión máxima que el regulador tolera para entregarla a la batería [23].
- Intervalo de Histéresis Inferior: Es la diferencia que existe entre la tensión de desconexión y la tensión a la que se admite que las cargas de consumo se enlacen nuevamente con la batería [23].
- Tensión de Desconexión: Es la tensión a la que se desenchufan automáticamente las diferentes cargas de consumo con la finalidad de evitar una posible descarga excesiva en la batería [23].



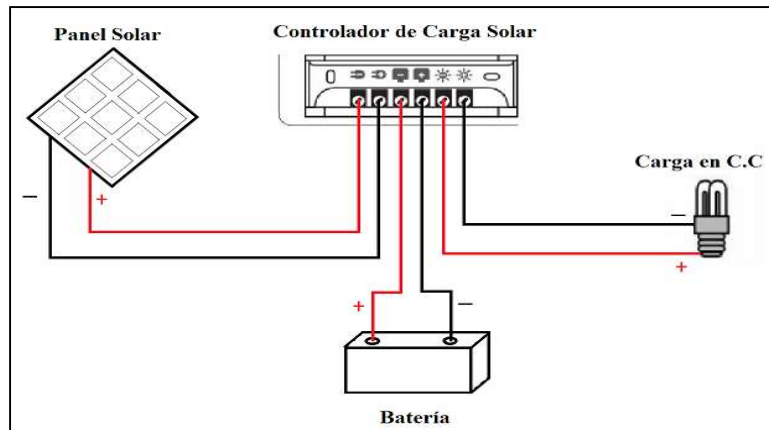


Figura 12. Controlador de carga y cableado de la batería. Fuente: Autores

### 1.8.2. Configuraciones de los Reguladores Fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos pueden ser conectados en diferentes configuraciones tales como: en paralelo o serie, dependiendo de las necesidades que se tengan para una mayor eficiencia del sistema fotovoltaico. El componente que hace de intermediario para conectar a los paneles fotovoltaicos con las baterías, es el controlador o regulador de carga, que está disponible en dos clases denominadas regulador PWM y regulador MPPT [22].

#### 1.8.2.1. Reguladores de Carga con Modulación por Ancho de Pulsos (PWM, por sus siglas en inglés)

Los reguladores PWM tienen la función de asistir en la regulación de la tensión que proviene del panel o paneles fotovoltaicos, para proteger de posibles sobrecargas a las baterías del sistema. Si se tiene conectado un regulador PWM, como se muestra en la Figura 13 [22].

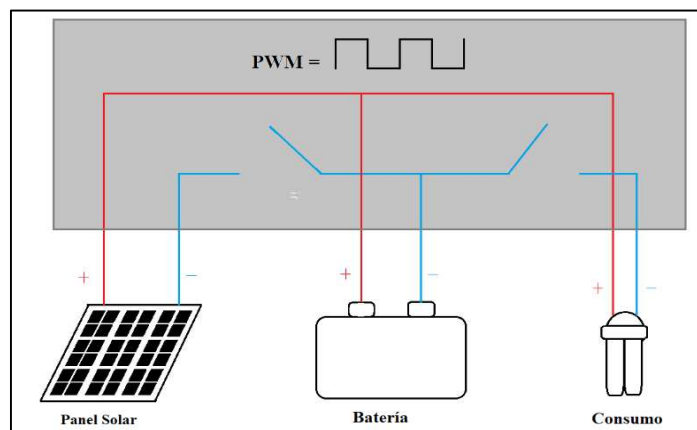


Figura 13. Diagrama de conexión del regulador PWM. Fuente: Autores

Como se ha dicho los reguladores PWM funcionan sin tener presente el punto de máxima potencia, y de este modo pueden encontrarse por debajo o por encima del mismo (dependiendo en



sí de la radiación que obtenga el panel fotovoltaico) [24]. Esto se lo puede apreciar a través de la Figura 14 ilustrada a continuación:

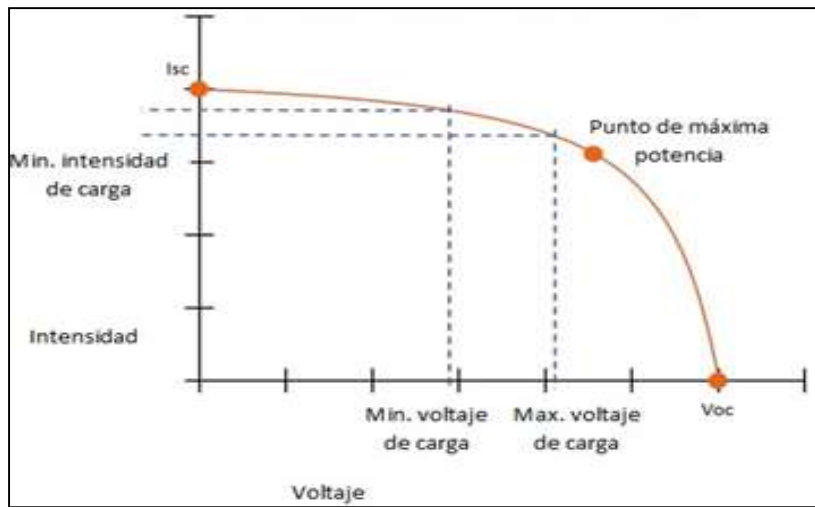


Figura 14. Curva de potencia de un panel fotovoltaico utilizando un regulador PWM [24].

### 1.8.2.2. Reguladores de Carga con Seguidor de Punto Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés)

Un regulador solar MPPT es un convertidor electrónico de C.C. a C.C. que tiene por objetivo mejorar el flujo eléctrico entre el banco de baterías y el panel fotovoltaico. Es decir, convierte una salida de C.C. de elevada tensión proveniente de los paneles fotovoltaicos a una tensión requerida para poder cargar las baterías [25]. En la Figura 15 se muestra el diagrama de bloques del regulador MPPT (Tipo Buck).

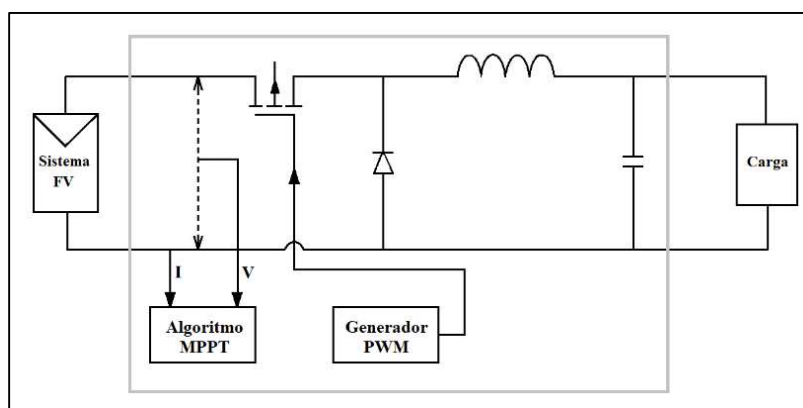


Figura 15. Diagrama de bloques del regulador MPPT. Fuente: Autores

Por lo tanto, el regulador MPPT es esencialmente un controlador de carga, el cual modifica su relación tensión de entrada – tensión de salida conforme se den las diferentes condiciones de

irradiancia, permitiendo que los paneles fotovoltaicos trabajen en su punto de máxima potencia [25]. En la Figura 16 se puede ver el diagrama de conexión del regulador MPPT.

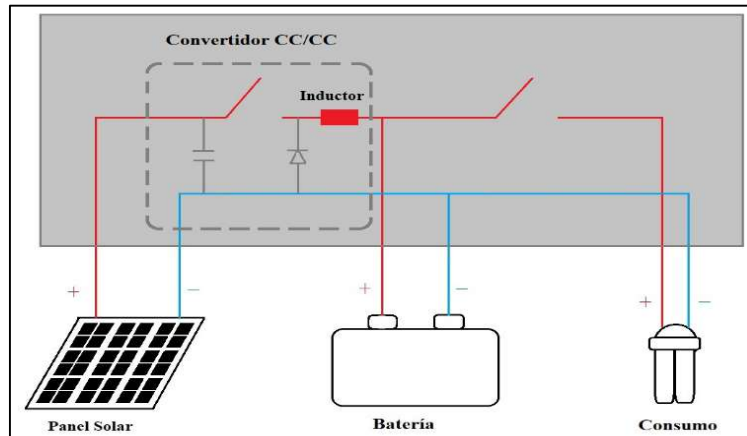


Figura 16. Diagrama de conexión del regulador MPPT. Fuente: Autores

En la Figura 17, se puede observar las curvas características de un panel fotovoltaico, que son conocidas como curvas de intensidad-voltaje (I-V) y curva de potencia-voltaje (P-V), dichas curvas expresan el comportamiento del panel fotovoltaico, fundamentándose en la relación de voltaje e intensidad con una definida radiación solar (STC 1000 W/m<sup>2</sup>). El punto óptimo de potencia que busca el balance entre la tensión y la intensidad se denomina “Punto de Máxima Potencia”, dicho punto cambia en relación de la radiación solar que recibe el panel fotovoltaico [26].

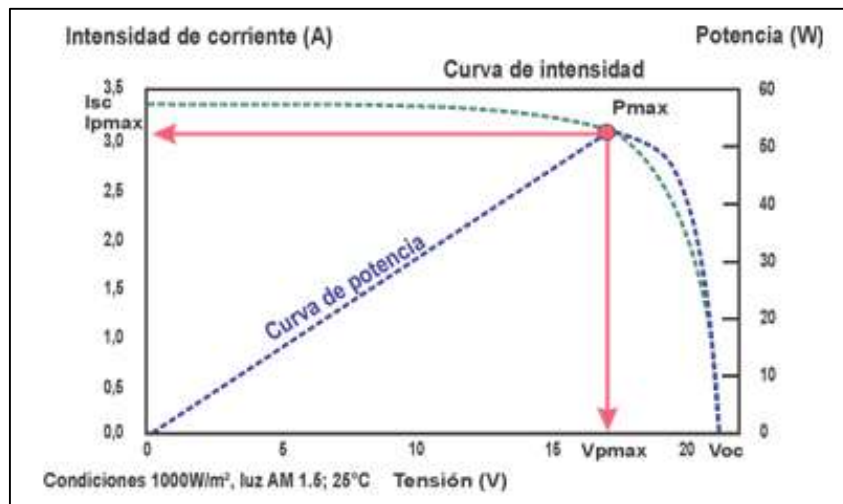


Figura 17. Representación de la Curva de I-V (línea discontinua verde) y la Curva de P-V (línea discontinua azul) de un Panel Fotovoltaico [26].

## 1.9. Inversor

Un inversor es un sistema que convierte voltaje continuo en voltaje alterno. Los inversores fotovoltaicos, deben ser eficientes al transformar la energía de C.C. a C.A. Estos dispositivos utilizan la electrónica de potencia para poder transformar y controlar voltajes y corrientes en un amplio rango de valores dependiendo de cada aplicación [27].

### 1.9.1. Características de los Inversores Fotovoltaicos

#### 1.9.1.1. Eficiencia

Viene definida como la relación, entre la potencia de salida ( $P_o$ ) y la de entrada ( $P_i$ ), expresándose como:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (1)$$

Para enunciarlo en % se multiplica el valor conseguido por 100, representando así el “tanto por ciento” obtenido de la potencia total suministrada por la carga, el cual es un número adimensional entre 0 y 1.0, o 0% a 100% [28].

La ecuación antes mencionada también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{P_i - P_{p\acute{e}rdidas}}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + P_{p\acute{e}rdidas}} \quad (2)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia general (%),  $P_i$  es la potencia de entrada del componente (W),  $P_o$  es la potencia de salida del componente (W), y  $P_{p\acute{e}rdidas}$  es la pérdida de potencia del inversor (W). Las pérdidas de los inversores fotovoltaicos provienen de los MOSFETs, IGBTs y de otros interruptores de potencia, teniendo así dos clases de pérdidas: la pérdida de conmutación y pérdida de conducción respectivamente [28].

Los inversores fotovoltaicos son sumamente eficientes, por lo regular del 93 al 96 por ciento dependiendo del modelo y la marca, de ningún modo serán del 100 por ciento pues usan parte de la potencia de C.C. de entrada para su funcionamiento, alrededor de 10-25 W [28]. Haciendo que en todo sistema fotovoltaico se cumpla la siguiente expresión:

$$P_i = P_o + P_{p\acute{e}rdidas} \quad (3)$$

## 1.9.2. Topologías de Inversores Fotovoltaicos

### 1.9.2.1. Inversor Tipo Puente H

El inversor puente H o de puente completo, como se aprecia en la Figura 18. Está compuesto por cuatro interruptores ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ), y define su proceso de control de la siguiente manera: los interruptores  $S_1$  y  $S_4$  se conmutan al mismo tiempo, el voltaje de entrada  $V_a$  se manifiesta por medio de la carga. Si los interruptores  $S_2$  y  $S_3$  se conmutan simultáneamente, se invierte el voltaje por medio de la carga y toma el valor de  $-V_a$  [29].

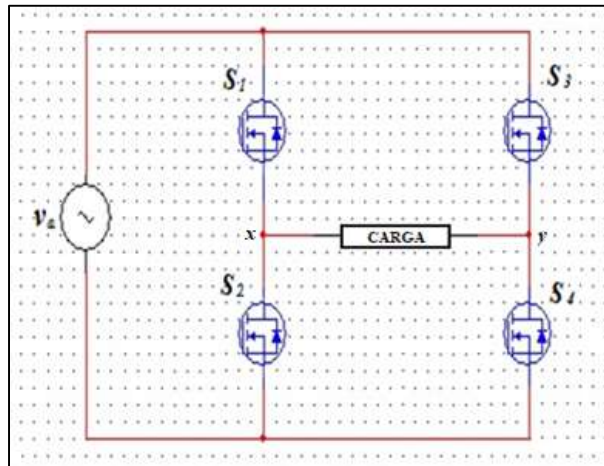


Figura 18. Inversor tipo Puente H. Fuente: Autores

Los posibles estados de conmutación se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Control de un inversor tipo Puente H. Fuente: Autores

Interruptores Cerrados	Voltaje $V_{xy}$
$S_1, S_4$	$+V_a$
Todos abiertos	0 (tiempo muerto)
$S_2, S_3$	$-V_a$

Existen algunas variantes de la topología anteriormente mencionada, que se serán detalladas a continuación.

#### 1.9.2.1.1. Puente H Modulado por Ancho de Pulso Bipolar (BPWM, por sus siglas en inglés)

Acá ( $S_1, S_4$ ) y ( $S_2, S_3$ ) conforman dos pares de conmutación y los interruptores respectivos de cada par se conmutan conjuntamente. Debido a la frecuencia de conmutación ambos pares están cambiando, dando como resultado un voltaje de salida modulado de dos niveles con la frecuencia de conmutación. El filtro de salida debe ser lo suficientemente grande como para demodular la

corriente de conmutación a una corriente sinusoidal que sea compatible con la red eléctrica. Teniendo como ventaja el no generar voltaje de modo común, favoreciendo enormemente a los inversores fotovoltaicos. El modelo de Simulink en MATLAB del inversor bipolar se muestra en la Figura 19 [29].

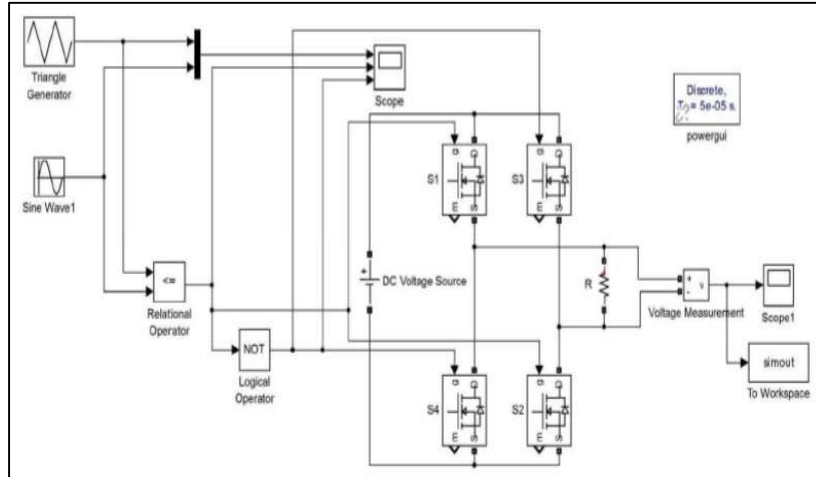


Figura 19. Modelo de Simulink del Inversor BPWM [29].

### 1.9.2.1.2. Puente H Modulado por Ancho de Pulso Unipolar (UPWM, por sus siglas en inglés)

Aquí S1 y S2 están cambiando con una frecuencia de 50 Hz; y S3, S4 cambian con la frecuencia de conmutación. Al ser una topología de tres niveles el resultado será un ruido de alta frecuencia más bajo (frecuencia de conmutación y sus armónicos). La ventaja de tener una mínima pérdida en la conmutación, es la compensación con el voltaje de modo común que esta topología genera. El modelo de Simulink en MATLAB del inversor unipolar se observa en la Figura 20 [29].

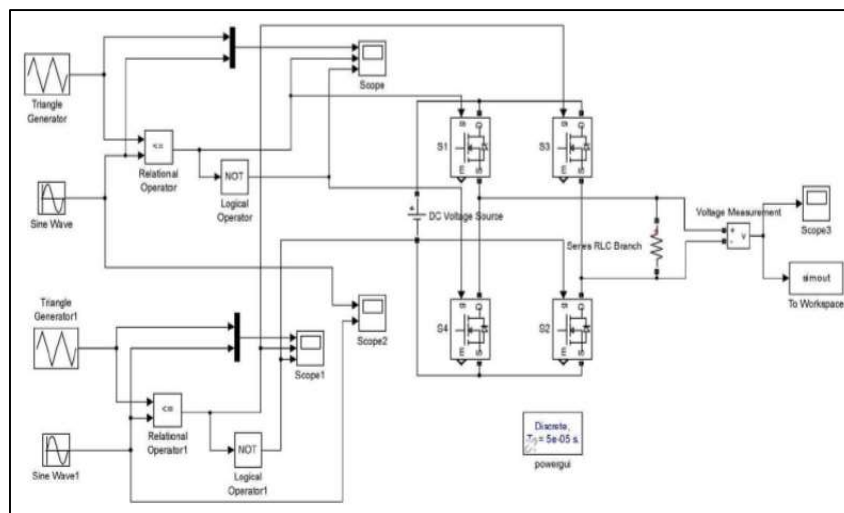


Figura 20. Modelo de Simulink del Inversor UPWM [29].

### 1.9.2.1.3. Puente H con Derivación Libre

Otra tendencia observada comúnmente en la industria, es la obtención de un voltaje modulado de tres niveles sin generar ningún modo común de alta frecuencia, esto se logra al desconectar la entrada (conexión de C.C.) del puente de conmutación durante el tiempo de funcionamiento libre [29].

### 1.10. Hora Solar Pico

La hora solar pico (HSP) es la unidad que mide la irradiación solar, definiendo como la energía por unidad de superficie que se tendría con una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m<sup>2</sup>, y es utilizada para estimar la energía que un panel fotovoltaico puede generar durante el día. En resumen, si en el lugar existen 4 HSP, se tendrán 4 horas de sol durante las que se transfieren 1000 W/m<sup>2</sup>, con lo que esta área habrá percibido ese día 4000 Wh/m<sup>2</sup>, que equivalen a 4 kWh/m<sup>2</sup> [29].

Una HSP equivale a 3,6 MJ/m<sup>2</sup> o a 1 kWh/m<sup>2</sup>, cómo se observa en la siguiente conversión:

$$1 \text{ HSP} = \frac{1000 \text{ W} * 1 \text{ h}}{\text{m}^2} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{1 \text{ J/s}}{1 \text{ W}} = 3,6 \text{ MJ/m}^2 \quad (4)$$

#### 1.10.1. Hora Solar Pico a una Inclinación $\beta$ ( $HSP_{\beta}$ )

El ángulo de inclinación  $\beta$ , se define como el ángulo entre la horizontal y el plano de la superficie del panel fotovoltaico, dicho ángulo es un parámetro para obtener la máxima cantidad de radiación solar que incide en los paneles [30]. La determinación de dicho ángulo viene dada por la siguiente ecuación:

$$HSP_{\beta} = \frac{R_B}{I_{\beta (CEM)}} = \frac{R_0 * K_{\beta}}{I_{\beta (CEM)}} \quad (5)$$

Donde:

- $\beta$ : Angulo de inclinación del panel en grados.
- $R_0$ : Valor medio mensual de radiación sobre la superficie horizontal (kWh/m<sup>2</sup> día).
- $R_B$ : Valor medio mensual de radiación sobre el panel fotovoltaico con un ángulo de inclinación  $\beta$  (kWh/m<sup>2</sup> día).
- $K_{\beta}$ : Coeficiente corrector en función de  $\beta$ .
- HSP: Hora Solar Pico, a 1000 W/m<sup>2</sup>
- $I_{\beta (CEM)}$ : Potencia de radiación incidente en (W/m<sup>2</sup>) para STC.

En donde STC son las siglas en inglés para Condiciones Estándar de Medida, utilizados para los diversos sistemas fotovoltaicos. Si se expone una representación gráfica de la distribución horaria de la irradiación incidente sobre la superficie terrestre se contempla que los niveles cambian durante el día. Gráficamente, la HSP es representada como una función de valor constante que define la misma área que la distribución anteriormente descrita, como se puede observar en la Figura 21 [31].

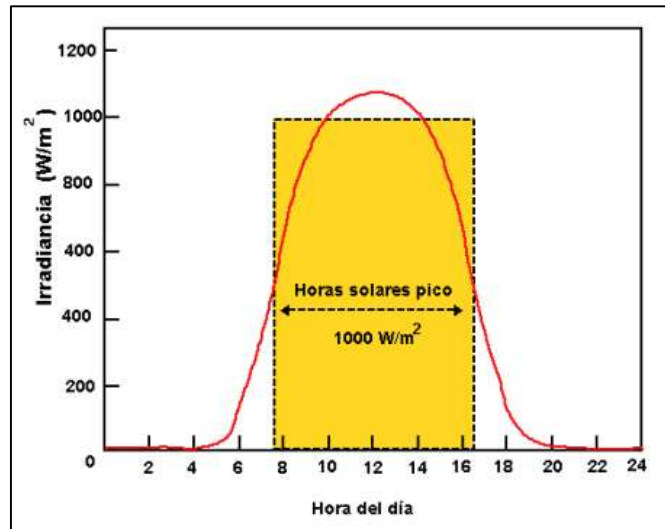


Figura 21. Distribución horaria de la irradiación solar en un día [31].

A continuación, se efectúa un cálculo a modo de ejemplo para obtener el promedio de la HSP en la ciudad de Cuenca durante todo un año. Con la ayuda del programa CENSOL 5.0, el mismo que proporciona los datos relacionados con la radiación de la ciudad en las distintas épocas del año; en la que la energía producida por el panel fotovoltaico es la más alta, obteniéndose así la Tabla 2 [31].

Tabla 2. Horas de Sol Pico para la Ciudad de Cuenca [31].

Mes	MJ/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>
Enero	16,5	4,6
Febrero	16,5	4,6
Marzo	16,4	4,6
Abril	15,4	4,3
Mayo	15,3	4,2
Junio	14,1	3,9
Julio	15,2	4,2
Agosto	15,8	4,4
Septiembre	15,8	4,4

<b>Octubre</b>	17,2	4,8
<b>Noviembre</b>	18,2	5,1
<b>Diciembre</b>	17,9	5,0
<b>Promedio</b>	<b>16,2</b>	<b>4,5</b>

En la Tabla 2 se analiza la potencia producida, registrando el promedio de todas las HSP obtenidas en la ciudad en el transcurso del año, obteniendo un HSP = 4,5 para la ciudad de Cuenca.

### 1.11. Armónicos

Los armónicos son componentes frecuenciales múltiplos de la frecuencia fundamental de la tensión de línea, por consiguiente generan varios inconvenientes como por ejemplo: incrementos de pérdidas de conductores y transformadores, deterioro en los aislamientos, sobretensiones en los condensadores, avería de dieléctricos, etc [32].

La onda de salida resultante se encuentra determinada por una cantidad de ondas sinusoidales que poseen diversas frecuencias, múltiplos de la frecuencia fundamental y a su vez esta no debe tener o poseer los mínimos contenidos en armónicos, como se puede observar en la Figura 22 [33].

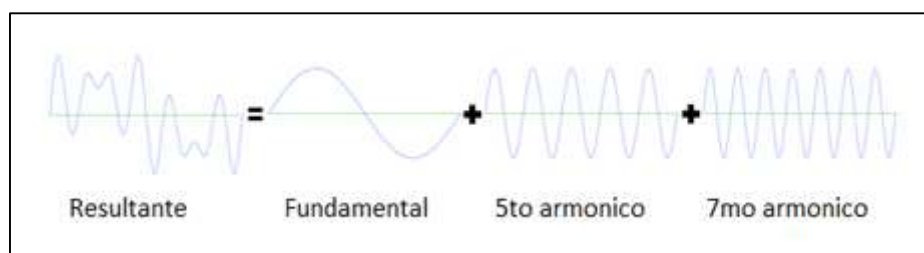


Figura 22. Ejemplo de distorsión armónica. Fuente: Autores

Los armónicos se definen por dos características relevantes:

- Orden: Indica el valor de su frecuencia referida hacia la fundamental (60 Hz).
- Amplitud: Indica la magnitud del armónico.

El espectro armónico es el conjunto de componentes armónicos presentes en una señal, el cual puede ser representado gráficamente mediante un gráfico de barras. En la Figura 23, se presenta un ejemplo del espectro armónico de la corriente de un transformador, el cual alimenta a una carga no lineal.



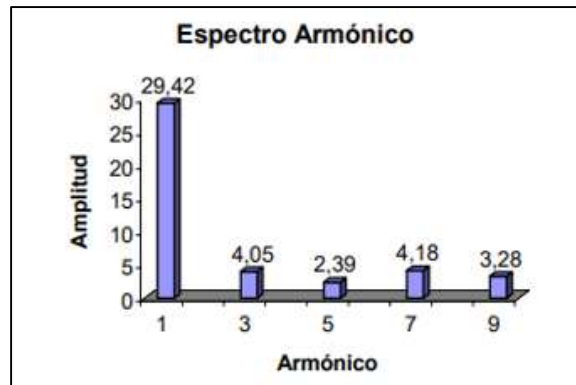


Figura 23. Espectro armónico de corriente de un transformador [34].

### 1.12. Distorsión Armónica Total

La distorsión armónica total (THD) es el factor que señala el porcentaje de contenido armónico de la onda de corriente o de voltaje de salida del inversor, eso dependerá del lugar en donde se mida la distorsión [35].

La fórmula para hallar la distorsión armónica de voltaje se la describe en la siguiente ecuación:

$$THD_{V\%} = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^k V_h^2} * 100\% \quad (6)$$

Donde:

- $THD_V$  = Distorsión Total de Armónicas de Voltaje.
- $V_h$  = Valor Individual de Voltaje de cada Componente.
- $h$  = Número de Armónico.
- $V_1$  = Valor del Voltaje Fundamental.
- $h$  = Número del Armónico Máximo (Máximo 40).

De la misma manera se utilizará la siguiente ecuación para hallar la distorsión armónica de corriente:

$$THD_{I\%} = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^k I_h^2} * 100\% \quad (7)$$

Donde:

- $THD_I$  = Distorsión Total de Armónicas de Corriente.
- $I_h$  = Valor Individual de Corriente de cada Componente.
- $h$  = Número de Armónico.
- $I_1$  = Valor de Corriente Fundamental.
- $h$  = Número del Armónico Máximo (Máximo 40).

## Capítulo 2

### 2. Levamiento de la Instalación Fotovoltaica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca

La instalación fotovoltaica se compone de cuatro elementos importantes que serán tratados en el desarrollo de este capítulo, además se debe tener presente que este sistema no posee un banco de baterías.

#### 2.1. Paneles Fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos instalados en la universidad, son de dos tipos de tecnologías: monocristalinos y policristalinos, estando instalados veintidós paneles de cada tipo. La implementación de estas tecnologías se dio principalmente con un fin investigativo, para que así los estudiantes puedan conocer y comprendan las diferencias que tienen los mismos.

Los paneles fotovoltaicos son fabricados por la empresa alemana “Solar-Fabrik”, la cual produce paneles tanto monocristalinos como policristalinos. La Figura 24 muestra las fotos de los paneles instalados. Estos poseen diferentes potencias de generación, en donde los paneles monocristalinos del modelo M-series tienen una gama de potencia, que varía desde los 270 W hasta los 300 W. Al cumplir los veinte años de funcionamiento, esta potencia se ve reducida hasta en un 80%, todo esto según datos del fabricante. Al realizar las diferentes pruebas en los laboratorios con dichos paneles se ha obtenido una tensión máxima de generación de 32,24 V, una corriente máxima de 9,41 A, así como una corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de 9,93 A y una potencia que está en un rango de tolerancia +/- 1,5% respecto al valor nominal [36].

De igual manera los paneles fotovoltaicos policristalinos de modelo M-series, poseen una gama de potencia que varía desde los 270 W hasta los 280 W. Por otra parte, con los diversos estudios realizados en laboratorios se ha determinado que la tensión máxima de generación es de 31,08 V, con una corriente máxima de 9,01 A, así como, una corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de 9,43 A y una potencia que está en un rango de tolerancia +/- 2% respecto al valor nominal. Ambos tipos de paneles tienen un peso similar, siendo de 18,5 kg para los monocristalinos y de 18,6 kg para los policristalinos. A su vez cada panel está compuesto por 60 celdas solares en serie [37].

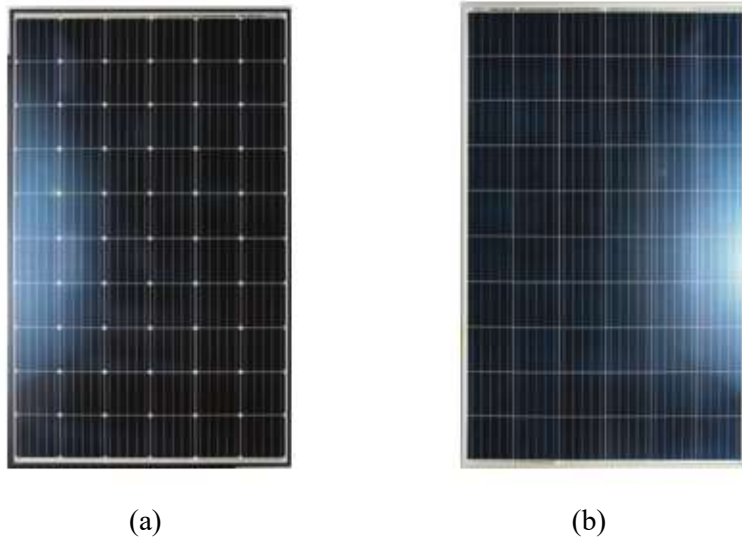


Figura 24. (a) Panel monocristalino, (b) Panel policristalino [36], [37].

## 2.2. Inversor

Los modelos de paneles fotovoltaicos antes mencionados están conectados a dos inversores independientemente, los cuales son fabricados por la empresa SMA bajo el modelo de Sunny Boy. Una imagen de este inversor se puede observar en la Figura 25. Este diseño se realizó con fines investigativos, de modo que se puedan analizar las potencias de generación de los paneles fotovoltaicos instalados, además de realizar comparaciones de estas potencias. El inversor Sunny Boy utilizado es un inversor monofásico conectado a la red que permite adaptar la energía solar suministrada por los paneles fotovoltaicos hacia la red eléctrica. Las potencias disponibles para modelos Sunny Boy Storage 7.0-US varían desde los 3000 W hasta los 5000 W, con una garantía de 5 años y un amplio rango de tensión de entrada, desde los 80 V hasta los 600 V [38].

El modelo del inversor utilizado es el 7.0-US, sin embargo, este modelo tiene dos gamas que se diferencian principalmente por la tensión, potencia y corriente que entregan en la salida de este dispositivo, las cuales son: el modelo de 208V con una potencia de 6660 W, una corriente de 9.2 A y el modelo de 240V con una potencia de 7000 W y una corriente de 32 A. En nuestro caso en particular se ha instalado el de 240V debido a que se necesita inyectar a la red eléctrica, la eficiencia con la que convierte la energía es del 97.5 %, siendo este modelo un poco más eficiente que el de 208V con un 0.04 %.

Es importante mencionar que las protecciones que tiene este dispositivo están instaladas en la sección de corriente continua como corriente alterna. Las protecciones que se tiene en C.C. son para la corriente de polaridad inversa que pueda afectar al panel fotovoltaico y para la desactivación de estos al momento de que ocurra una falla en la planta. Mientras que en C.A. se tienen contra cortocircuitos y contra sobrecargas que se puedan presentar. Es fundamental

mencionar la unidad de monitoreo de corriente residual conocido como “RCMU”, la cual es instalada como su nombre lo dice para monitorear la corriente residual al momento de desconectar la planta de la carga que consume la energía generada, esto mediante la conexión a tierra del propio inversor, además, si el sistema no posee esta conexión se tiene un sistema de monitoreo que informara la falta de la misma.



Figura 25. Inversor Sunny Boy 5.0-US. Fuente: Autores

### 2.3. Estación de Carga

La estación de carga para movilidad eléctrica, es fabricada por la empresa MENNEKES y distribuida por una división de esta, denominada Echarge. Esta empresa, además, se encarga de proveer accesorios adicionales para las estaciones, como son: sistemas de monitorización a través de aplicaciones celulares u otros dispositivos, pedestales y protectores para las paredes. Este dispositivo se presenta en la Figura 26, siendo instalado para la carga de un automóvil y tres motonetas eléctricas que son propiedad de la universidad, con una tensión de 240 voltios de C.A. o 500 voltios de C.C. [39].



Figura 26. Estación de carga. Fuente: Autores

## 2.4. Conexión a Red

La conexión del sistema fotovoltaico a la red eléctrica, se realiza por medio de un transformador, el cual suministra energía a varias edificaciones de la universidad, como, por ejemplo: el edificio Mario Rizzini, la capilla universitaria, el departamento de sistemas, entre otras. Debido a que la generación de los inversores fotovoltaicos es monofásica, cada inversor se está conectando entre 2 fases del sistema trifásico como se puede observar en la Figura 27.

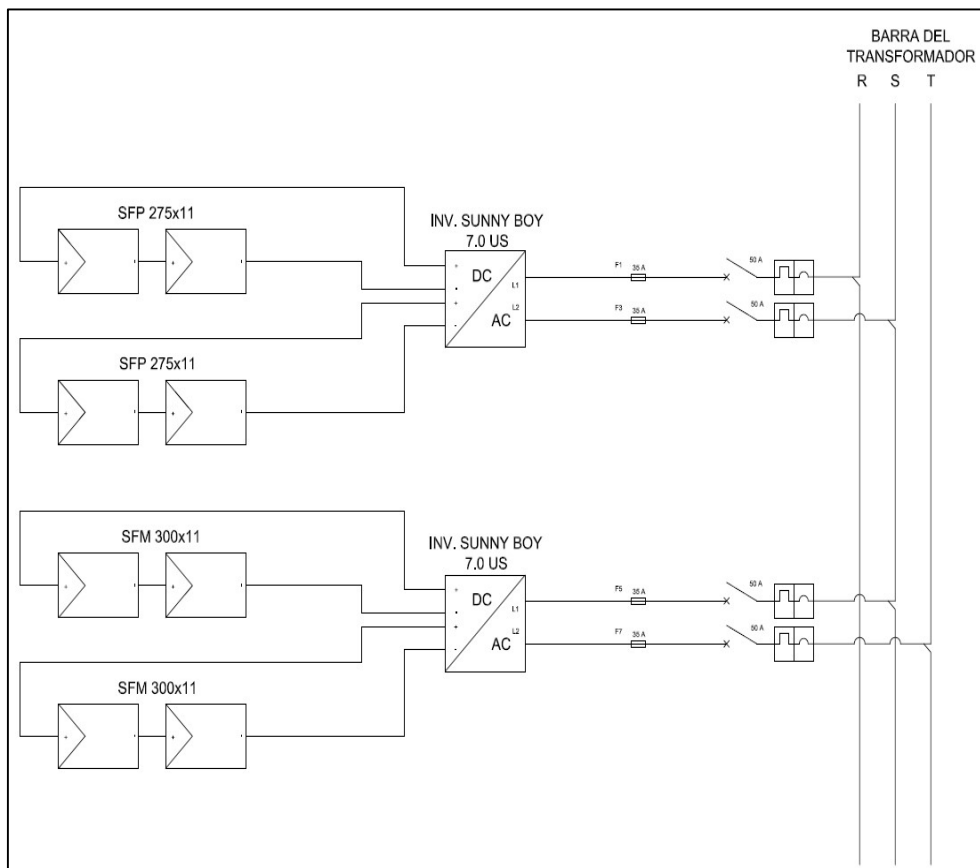


Figura 27. Diagrama multifilar del sistema fotovoltaico. Fuente: Autores

## 2.5. Esquema de Conexión

El esquema de conexión descrito en esta sección detalla el acoplamiento eléctrico de todos los elementos involucrados en la instalación estudiada. El conductor utilizado en las conexiones es el 6 AWG, teniendo una longitud aproximada de 65 m desde los paneles hasta los inversores y 95 ms desde los inversores hasta el transformador. El sistema de protecciones instalados en la planta fotovoltaica consta de 2 fusibles de 35 A para cada tipo de tecnología y dos interruptores termomagnéticos de 50 A, además de las protecciones que tiene los inversores internamente. El diagrama de conexión de los paneles fotovoltaicos con el sistema de distribución se puede observar en la Figura 28, teniendo así una mayor comprensión de la conexión del sistema descrito en este capítulo.

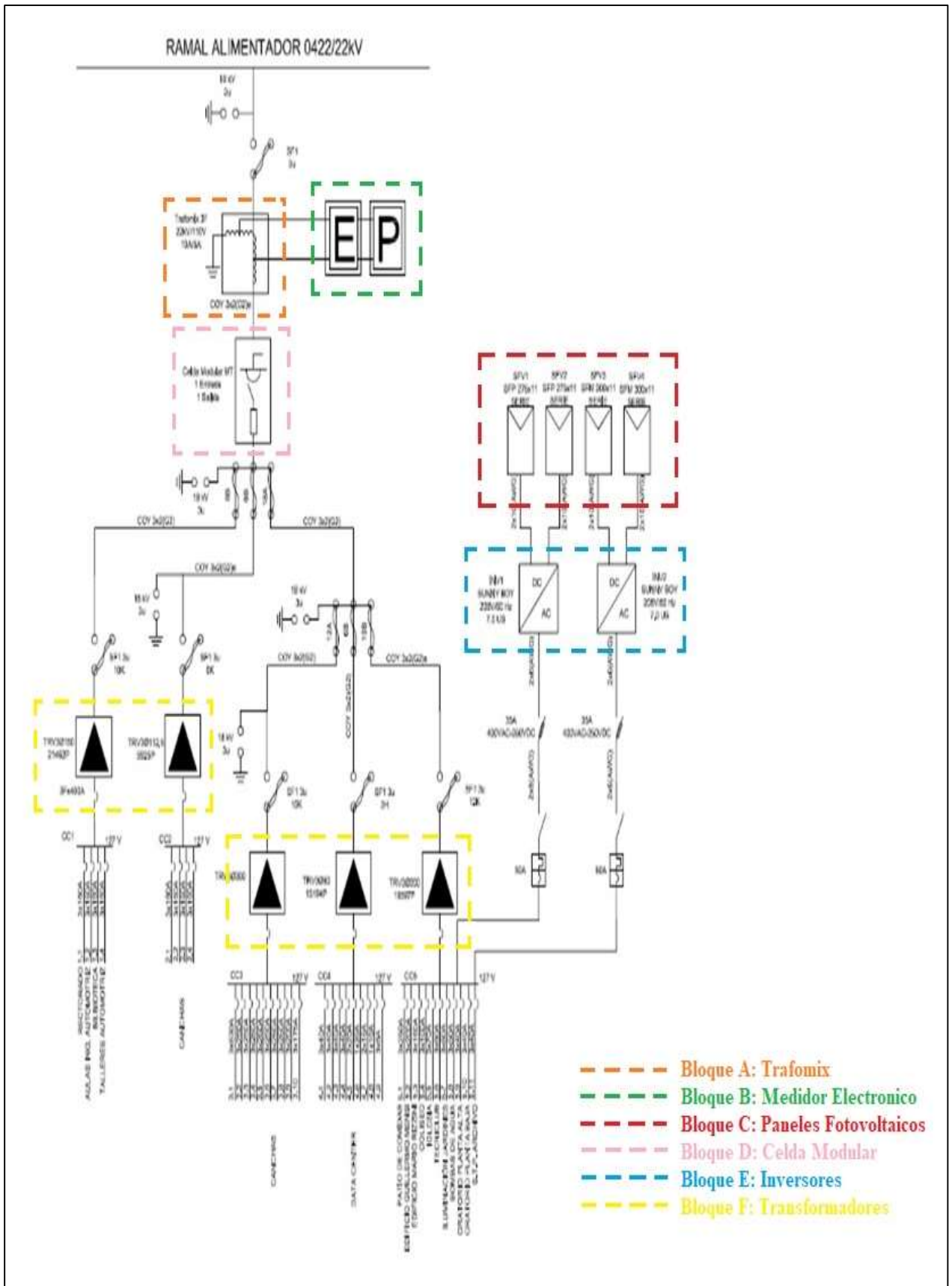


Figura 28. Diagrama unifilar de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Fuente: Autores

## 2.6. Análisis de Resultados Obtenidos

Al realizar las mediciones en el sistema fotovoltaico se obtuvieron datos tanto de C.C. como de C.A., en las que se detallan las corrientes, tensiones y potencias; en cada punto de conexión con el inversor. Este sistema consta de dos inversores que son nombrados de acuerdo a su conexión IP en el sistema de comunicaciones, siendo así el 198 para los paneles policristalinos y 199 para los paneles monocristalinos. La toma de datos realizada por el inversor 198 se presenta en el anexo de la Tabla A2 , así como una representación gráfica de cada medición obtenida, las cuales puede observar en las Figura 29, Figura 30 y Figura 31 respectivamente, de igual manera, para el inversor 199 se presenta en el anexo de la Tabla A3, con su representación gráfica en las Figura 32, Figura 33 y Figura 34 correspondientemente.

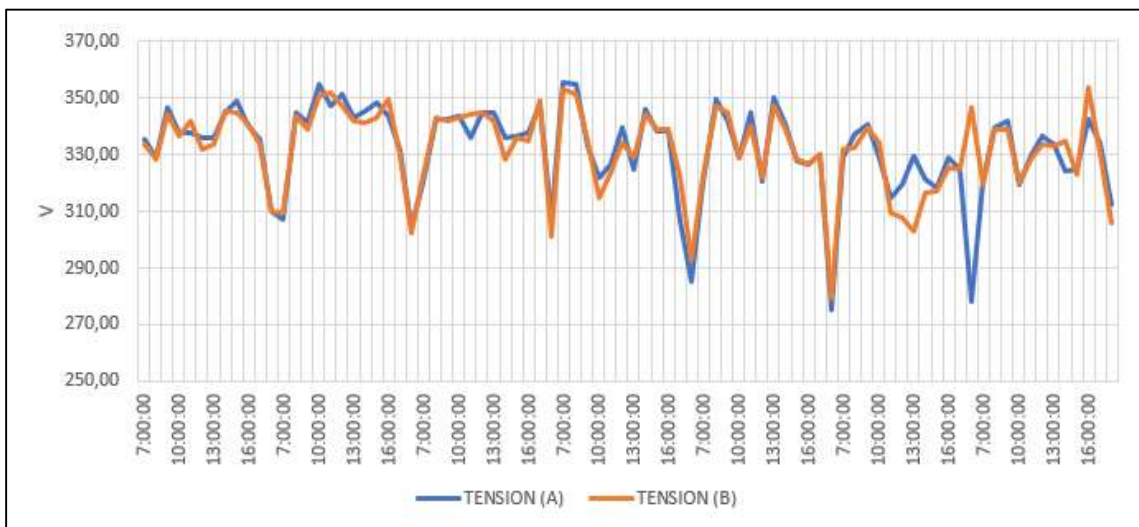


Figura 29. Tensión C.C. de los paneles policristalinos medida. Fuente: Autores

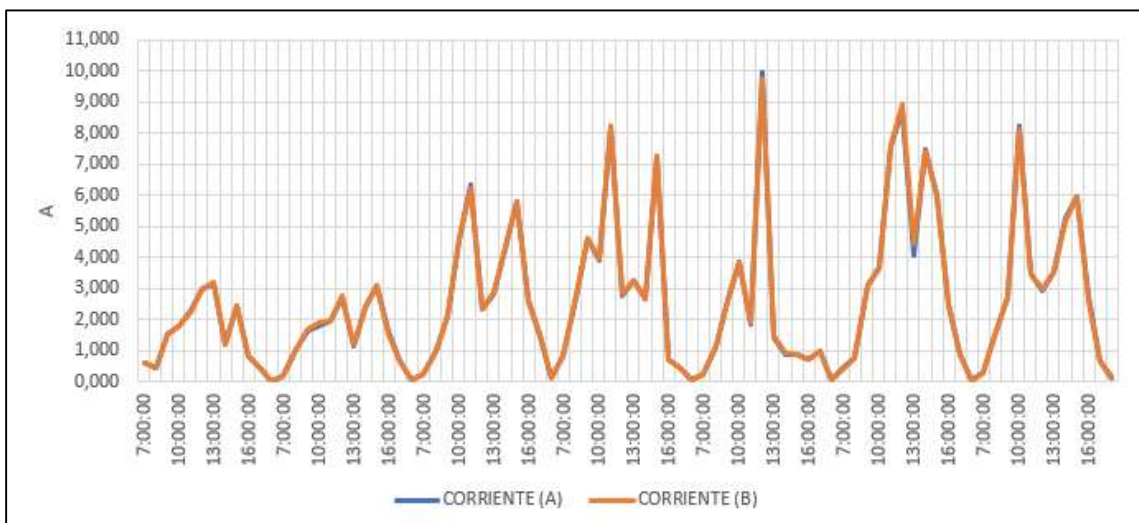


Figura 30. Corriente C.C. de los paneles policristalinos medida. Fuente: Autores



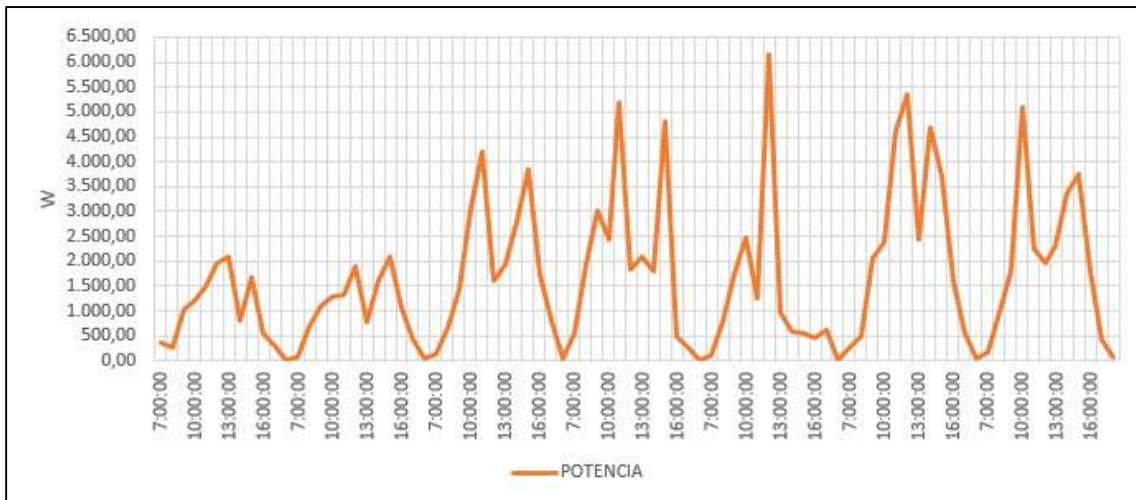


Figura 31. Potencia C.A. de los paneles policristalinos medida. Fuente: Autores



Figura 32. Tensión C.C. de los paneles monocristalinos medida. Fuente: Autores

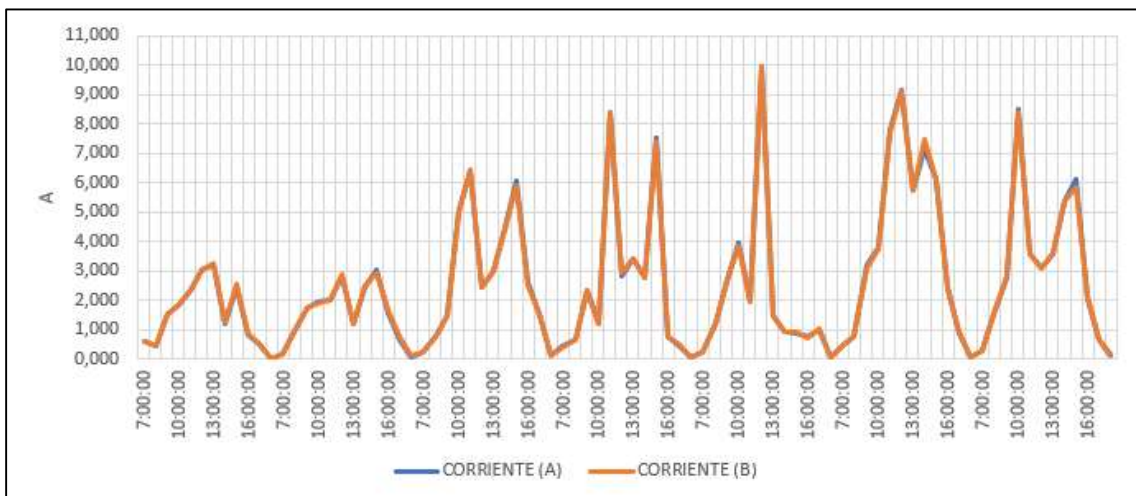


Figura 33. Corriente C.C. de los paneles monocristalinos medida. Fuente: Autores



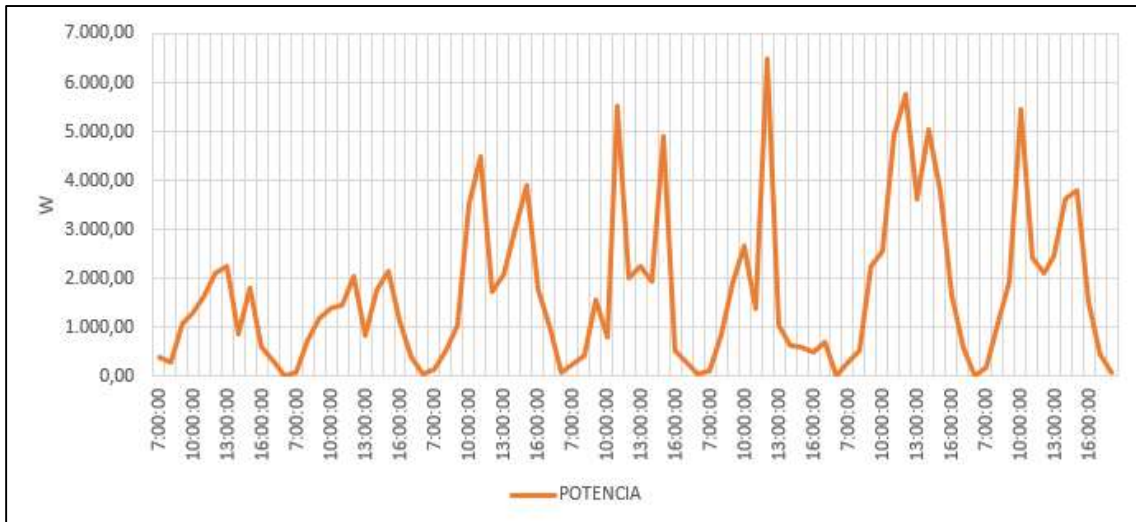


Figura 34. Potencia C.A. de los paneles monocristalinos medida. Fuente: Autores

Para finalizar se presenta la potencia de cada conjunto de paneles en la Figura 35 y la energía acumulada generada por los paneles de cada tipo de tecnología en la Figura 36, así como de los inversores fotovoltaicos en la Figura 37.

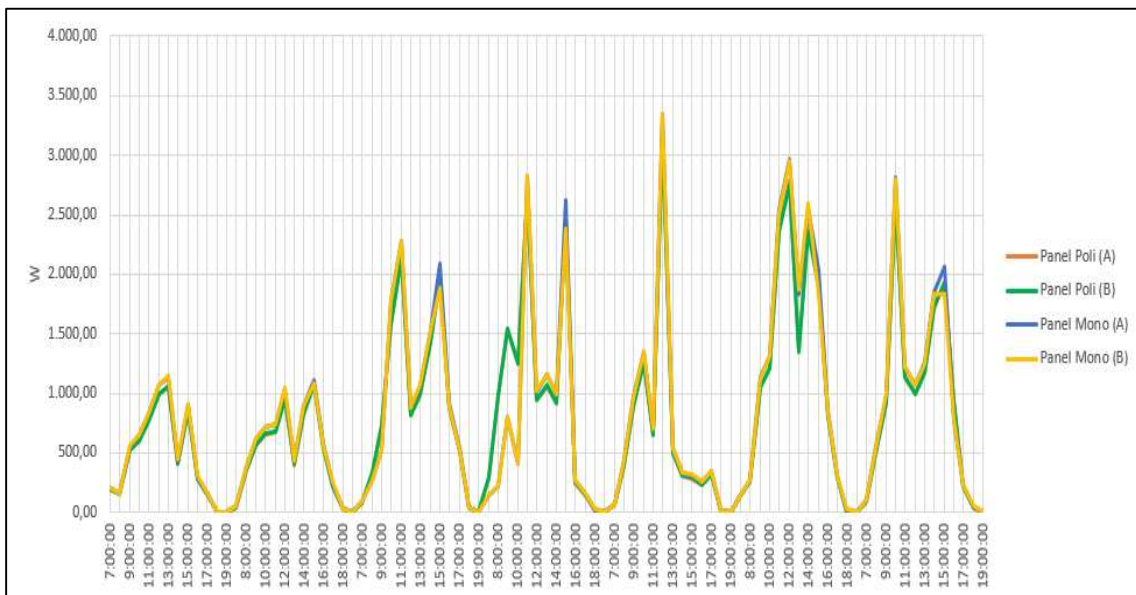


Figura 35. Potencia de C.C. medida de los paneles fotovoltaicos. Fuente: Autores

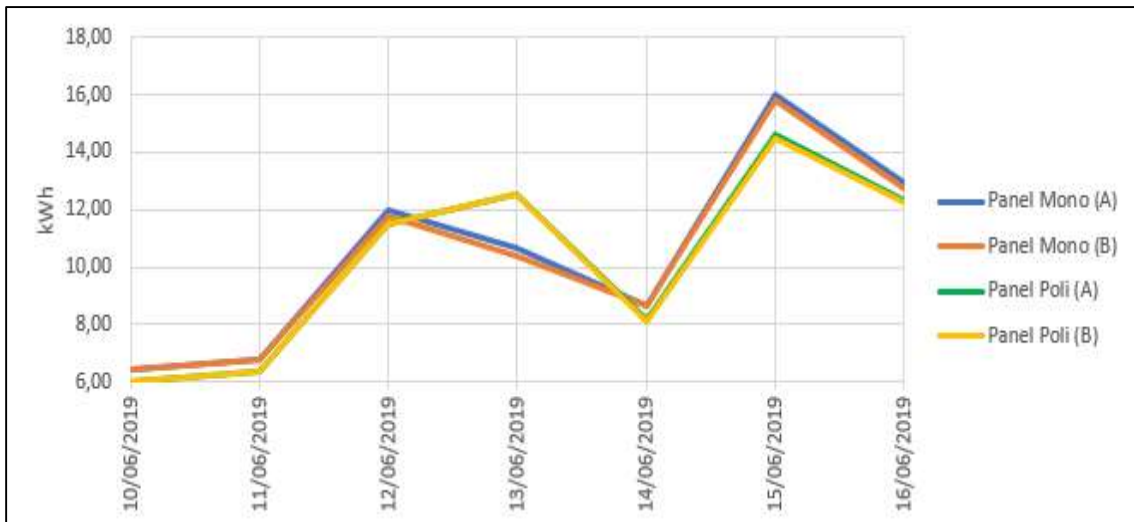


Figura 36. Energía acumulada medida en el conjunto de paneles. Fuente: Autores

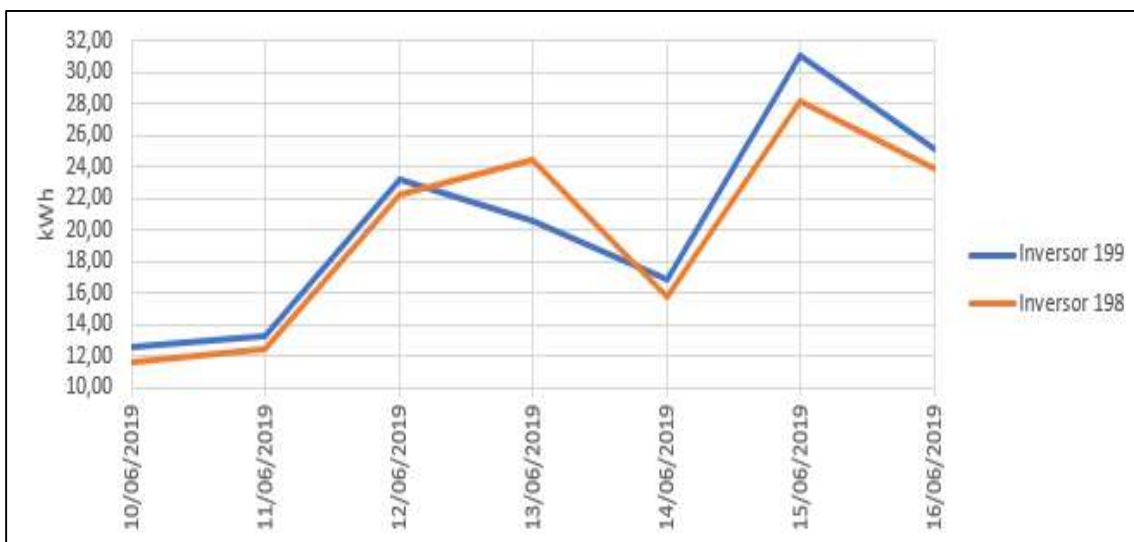


Figura 37. Energía acumulada medida a la salida de los inversores. Fuente: Autores

## Capítulo 3

### 3. Levantamiento de los Datos Meteorológicos de la Zona

Para realizar el levantamiento de estos datos, se utilizó una estación meteorológica, la cual se sitúa en la misma universidad. Dicha estación posee varios componentes que son fabricados por la empresa Vaisala en su mayoría, y que se listan en la Tabla 3, posteriormente se detallan sólo aquellos componentes relevantes para nuestro proyecto.

Tabla 3. Características de los dispositivos de la estación meteorológica ubicada en la sede Cuenca. Fuente: Autores.

Equipo	Características
Estación meteorológica	MAWS100DCP
Módulo de expansión	QMI118
Datalogger	QML201C
Modem de comunicaciones	FASTRACK
Sensor de presión barométrica	BAR01
Sensor de viento	85000
Sensor de radiación solar	SR11-10
Sensor de temperatura/humedad	HMP155
Sensor de temperatura del suelo	QMT107
Regulador	QBR101C
Panel fotovoltaico	25W
Batería	12V/18Ah
Anillo de sombra	
Torre metálica	

#### 3.1. Estación Meteorológica

El primer dispositivo a mencionar es un sistema hidrometeorológico compacto y resistente conocido como MAWS110CP HydroMet presentado en la Figura 38. Diseñado para entregar datos con una exigencia de gran confiabilidad y precisión como, por ejemplo: validación de cambio escalonado, indicación de estado del sensor, rangos climatológicos máximo/mínimo, etc. Opera conectado a la red eléctrica y posee un banco de baterías como respaldo para poder seguir procesando muestras aún ante un corte del suministro eléctrico [40], [41].



Figura 38. Sistema Hidrometeorológico MAWS110CP. Fuente: Autores

### 3.2. Módulo de Expansión

El siguiente dispositivo presentado en la Figura 39 es un módulo digital denominado QMI118, el cual se utiliza para extender la capacidad de adquisición, con ocho entradas y ocho salidas, conectándose de esta manera con el sistema hidrometeorológico mediante el conector SPI [40], [41].

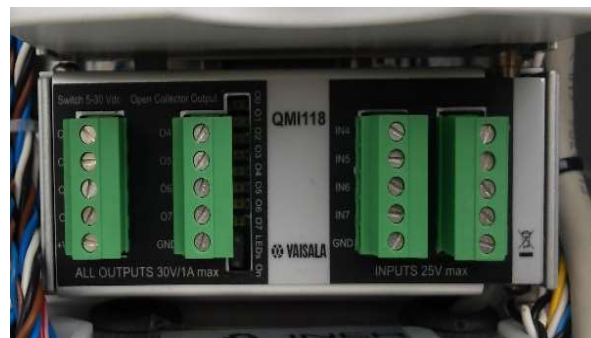


Figura 39. Módulo de expansión QMI118. Fuente: Autores

### 3.3. Registrador de Datos

Para realizar el registro de los datos, cálculos estadísticos y sobre todo la transmisión de estos, se utiliza el Datalogger QML201C presentado en la Figura 40, el cual tiene comunicación a través de puertos RS-232, RS-485 y SDI-12, siendo adaptable a diferentes tipos de pantallas y sensores inteligentes. El software para la comunicación es otorgado por la misma empresa que lo fabrica, el cual genera varias opciones de configuración y características avanzadas de este y los demás equipos que estén conectados. En el caso de que se necesiten más puertos se puede extender la capacidad de procesamiento de datos con un Datalogger adicional, por consiguiente, se agregan ocho entradas y ocho salidas digitales a la estación [42].



Figura 40. Registrador de datos QML201C. Fuente: Autores

### 3.4. Sensores de Medición

#### 3.4.1. Sensor de Presión Barométrica

El sensor de presión barométrica utilizado es el BAROCAP Baro-1 se muestra en la Figura 41. Este posee una gran precisión al momento de muestrear datos, debido a que la calibración se realiza mediante estándares internacionales. Es importante añadir que este está localizado en la placa del CPU del Datalogger, por tanto, no ocupa un espacio adicional en donde se lo deba instalar a diferencia de otros sensores de la misma empresa. La precisión de este sensor varía en 0.25 hPa y tiene un rango total de 500 a 1100 hPa. Es importante mencionar que el rango de temperatura a la que trabaja este sensor es de -40 a 60 °C [43].

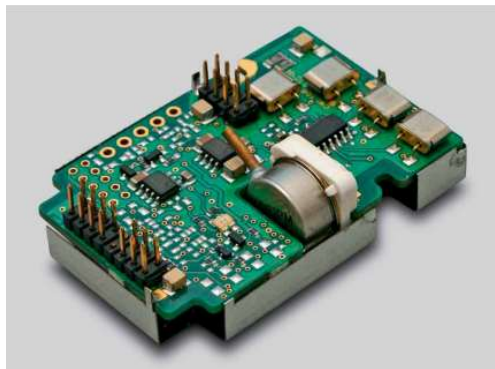


Figura 41. Sensor de presión barométrica BAROCAP [43].

#### 3.4.2. Sensor de Radiación

El sensor de radiación solar SR11 posee un piranómetro de alta precisión de clase A, y las mediciones que realiza poseen un ángulo de recepción de 180 grados. Esta clase de dispositivo puede medir diferentes tipos de radiación, ya sea directa o reflejada, con solo cambiar la orientación del equipo, en forma horizontal o invertida respectivamente. Al igual que los

diferentes equipos utilizados en el mercado, este presenta los datos en vatios por metro cuadrado, lo que lo caracteriza es su nivel de precisión, debido a que tiene un nivel de incertidumbre del 1,8%, a diferencia de otros equipos que alcanzan incertidumbres de hasta el 2,8 %, véase en la Figura 42 [44].



Figura 42. Piranómetro de clase A SR11. Fuente: Autores

### 3.4.3. Sensor de Temperatura y Humedad

El sensor de temperatura y humedad HMP155, se basa principalmente en un polímero de capa delgada capacitiva y en sensores de platino resistivo para la medición de la humedad y temperatura respectivamente. Estos dos materiales están ubicados en el extremo de la sonda y están cubiertos por un filtro, que se usa para eliminar cualquier anomalía presentada al momento de censar datos. Para realizar una medición de calidad se debe instalar el equipo mencionado con una protección contra la radiación solar, puesto que los datos de humedad adquiridos variarán considerablemente. Una foto de este sensor se encuentra en la Figura 43 [45].

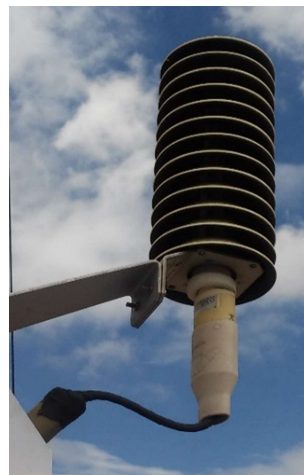


Figura 43. Sensor de temperatura y humedad HMP155. Fuente: Autores

### 3.5. Regulador

Para la alimentación del banco de baterías, se utiliza un regulador QBR101C presentado en la Figura 44, el cual está constituido por baterías de plomo ácido o níquel cadmio de 12/24 V. Este modelo es utilizado debido a que posee dos entradas de tensión para cargar las baterías, siendo la primera la alimentación de la línea eléctrica en C.A. y la segunda, la generación a través de paneles fotovoltaicos. Es importante añadir que la tensión máxima por parte de los paneles es de 30 V [46].

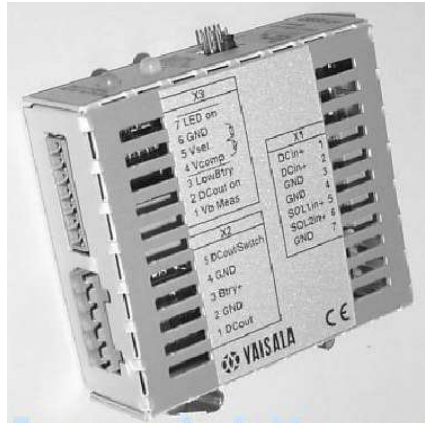


Figura 44. Regulador de tensión QBR101C. [46]

### 3.6. Panel Fotovoltaico

El panel fotovoltaico instalado en la estación meteorológica sirve para el soporte del mismo, es un panel policristalino diseñado por la empresa ACOPOWER, con una generación máxima de 25 W. El panel utilizado es relativamente pequeño, puesto que, está instalado en la torre metálica, la cual no podría soportar demasiados paneles por su peso. Los datos técnicos de este panel se detallan en la Tabla 4 presentada a continuación.

Tabla 4. Características del panel fotovoltaico. Fuente: Autores

Características		Valores	
Potencia máxima	$P_{max}$	25	W
Voltaje en circuito abierto	$V_{oc}$	22	V
Voltaje de operación	$V_{mp}$	17,5	V
Corriente de corto circuito	$I_{sc}$	1,54	A
Corriente de operación	$I_{mp}$	1,43	A
Eficiencia		11,06	%
Dimensiones		510*360*20	mm



### 3.7. Baterías

La batería utilizada funciona únicamente para el autoabastecimiento de los equipos, siendo esta recargable, para así poder acoplarse al ingreso de tensión generada por el panel fotovoltaico, presentada en la Figura 45. Es importante mencionar que los equipos utilizados deben estar configurados para tener una tensión de ingreso de 12 V, puesto que la batería instalada suministra esta tensión mencionada. Los datos de esta batería, se los puede observar con mayor detalle en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de la batería usada en la estación meteorológica. Fuente: Autores

BLESS POWER		
Modelo	CP12350M	
Voltaje	12	V
Corriente	35	Ah
Ciclo de uso	14	V
Uso en modo espera	14,5-14,9	V
Corriente inicial	Menor a 10,5	A



Figura 45. Batería Bless Power. Fuente: Autores

### 3.8. Datos de la Estación

Los datos obtenidos por medio de la estación meteorológica fueron filtrados por el Datalogger QML201C, el cual proporciona datos por hora durante todo el día. Una representación de este se observa en la Tabla 6, demostrando el comportamiento del día 10 de junio del presente año, para una mayor comprensión del mismo se presenta la semana completa en la Tabla A1 .



Tabla 6. Datos obtenidos del datalogger QML201C. Fuente: Autores

Día	Hora	DC (V)	Presión Atmosférica (hPa)	Humedad Relativa (%)	Radiación Solar Difusa	Radiación Solar Global	Temperatura Ambiente (°C)
10/06/2019	12:00:00 AM	13,2	754,6	79	2	2	14,7
10/06/2019	1:00:00 AM	13,3	755,1	77	0	0	14,6
10/06/2019	2:00:00 AM	13,2	755,6	79	0	0	14,2
10/06/2019	3:00:00 AM	13,2	755,9	79	0	0	14,0
10/06/2019	4:00:00 AM	13,2	756,1	80	0	0	13,9
10/06/2019	5:00:00 AM	13,2	755,9	79	0	0	13,8
10/06/2019	6:00:00 AM	13,2	755,7	84	0	0	13,2
10/06/2019	7:00:00 AM	13,1	755,0	84	0	0	12,8
10/06/2019	8:00:00 AM	13,1	754,6	83	0	0	12,8
10/06/2019	9:00:00 AM	13,1	754,4	85	0	0	12,6
10/06/2019	10:00:00 AM	13,1	754,4	97	0	0	12,2
10/06/2019	11:00:00 AM	13,0	754,5	100	0	0	11,9
10/06/2019	12:00:00 PM	13,0	754,8	100	9	10	11,9
10/06/2019	1:00:00 PM	13,3	755,4	100	53	58	12,3
10/06/2019	2:00:00 PM	14,0	756,1	100	96	105	12,2
10/06/2019	3:00:00 PM	14,3	756,2	100	265	303	13,4
10/06/2019	4:00:00 PM	15,0	756,0	97	205	223	14,2
10/06/2019	5:00:00 PM	14,9	755,6	87	298	477	15,6
10/06/2019	6:00:00 PM	14,9	755,0	69	294	359	16,6
10/06/2019	7:00:00 PM	14,4	754,3	60	195	227	17,5
10/06/2019	8:00:00 PM	14,7	753,6	58	290	323	17,7
10/06/2019	9:00:00 PM	14,3	753,2	58	141	154	17,5
10/06/2019	10:00:00 PM	14,2	753,0	60	123	136	17,1
10/06/2019	11:00:00 PM	13,4	753,2	64	23	25	16,5
11/06/2019	12:00:00 AM	13,3	753,7	67	0	0	15,7

### 3.9. Monitoreo de Datos

La estación meteorológica ubicada en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca lleva a cabo un registro de los datos cada hora iniciando a la 12:00 a.m. hasta las 11:00 p.m. de cada día de estudio, partiendo del 10 de junio del 2019 hasta el 16 de junio del 2019. En la Figura 46, se presenta el comportamiento de la radiación solar en un día típico de medición siendo este el 10 de junio del 2019.

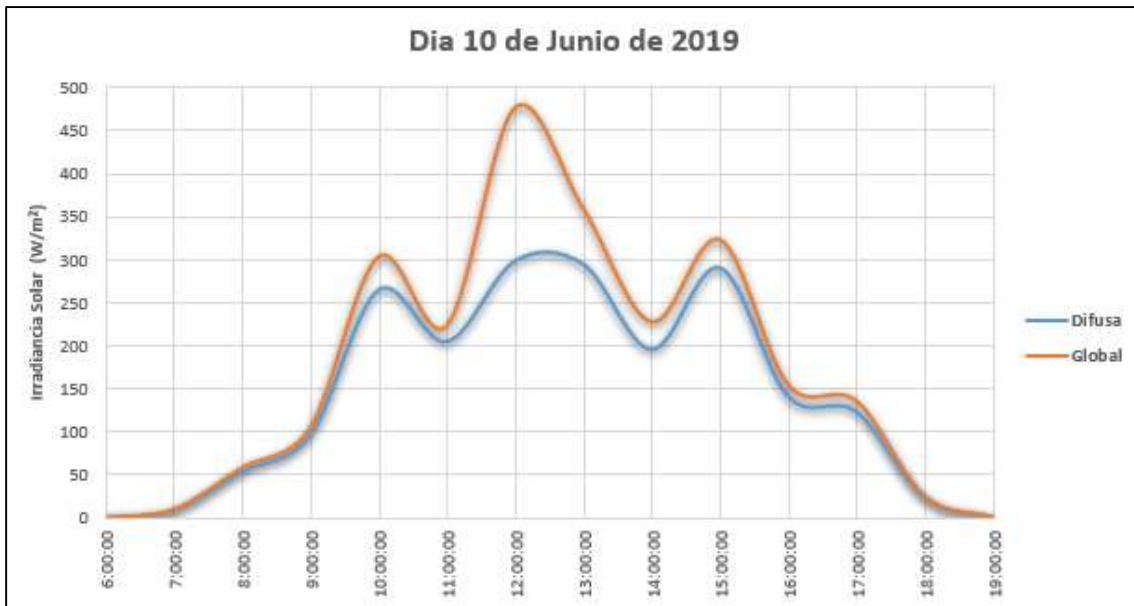


Figura 46. Gráfica de comportamiento de la radiación solar. Fuente: Autores

Como se observa en la gráfica de la Figura 46, la radiación solar difusa tiene un menor alcance llegando a los 312 W/m<sup>2</sup>, en comparación con la radiación global que logra un pico de 477 W/m<sup>2</sup> a causa de los factores climatológicos característicos de la zona.

### 3.10. Análisis de Resultados Obtenidos

Para el análisis de los datos adquiridos por la estación meteorológica anteriormente mencionada se llevó a cabo su división en siete días que fue el tiempo de estudio que se monitoreo el recurso solar del lugar. Para cada día de mediciones se calculó el promedio diario de radiación solar, centrándonos en la radiación difusa y global. De igual manera se realizó dicho cálculo en las mediciones de temperatura, especialmente la media, la máxima y mínima. La Figura 47 muestra la radiación difusa de un día de estudio y en la Figura 48, se observa las medidas de las temperaturas obtenidas en un día de medición.

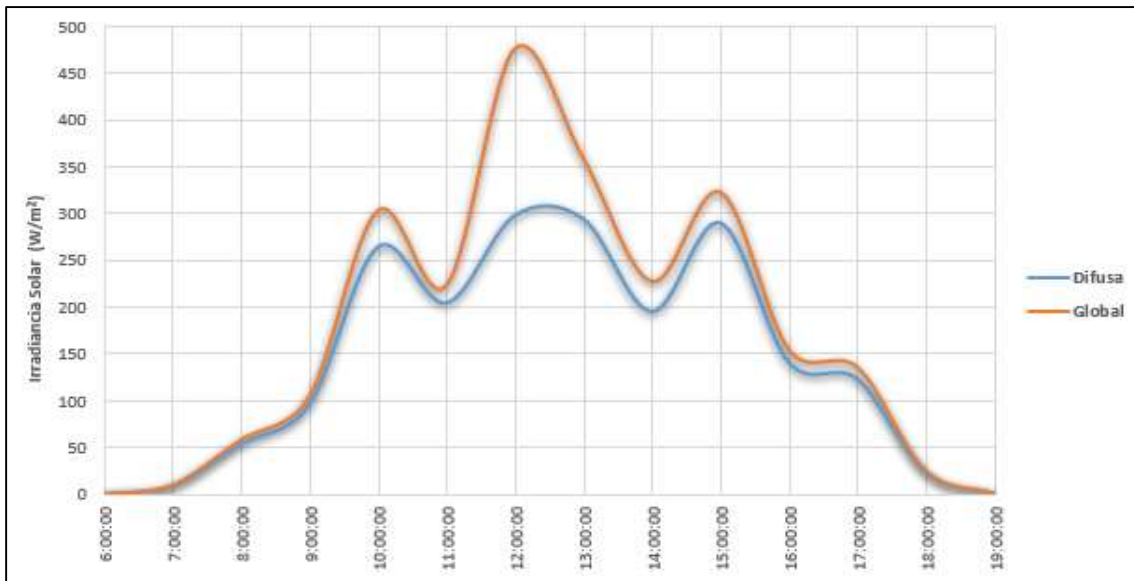


Figura 47. Gráfica del comportamiento del recurso solar (16 de junio del 2019). Fuente: Autores

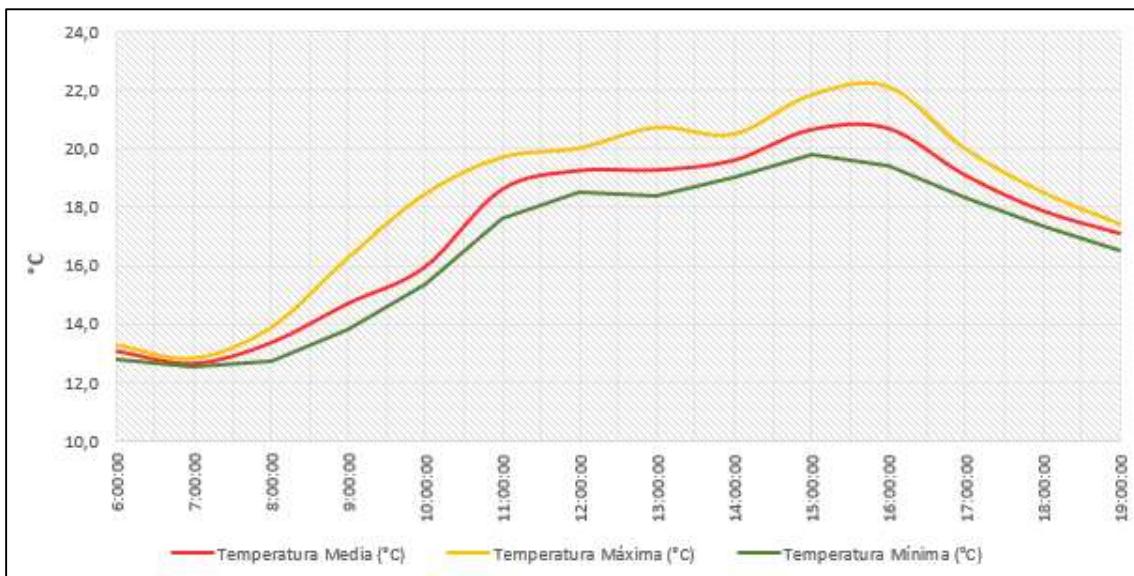


Figura 48. Gráfica del comportamiento de la temperatura (16 de junio del 2019).

Fuente: Autores

Los niveles de radiación solar global media y temperatura media de la semana de estudio, se presentan en la Tabla A1, además de una representación gráfica de las mismas, las cuales se pueden observar en las Figura 49 y Figura 50 respectivamente.

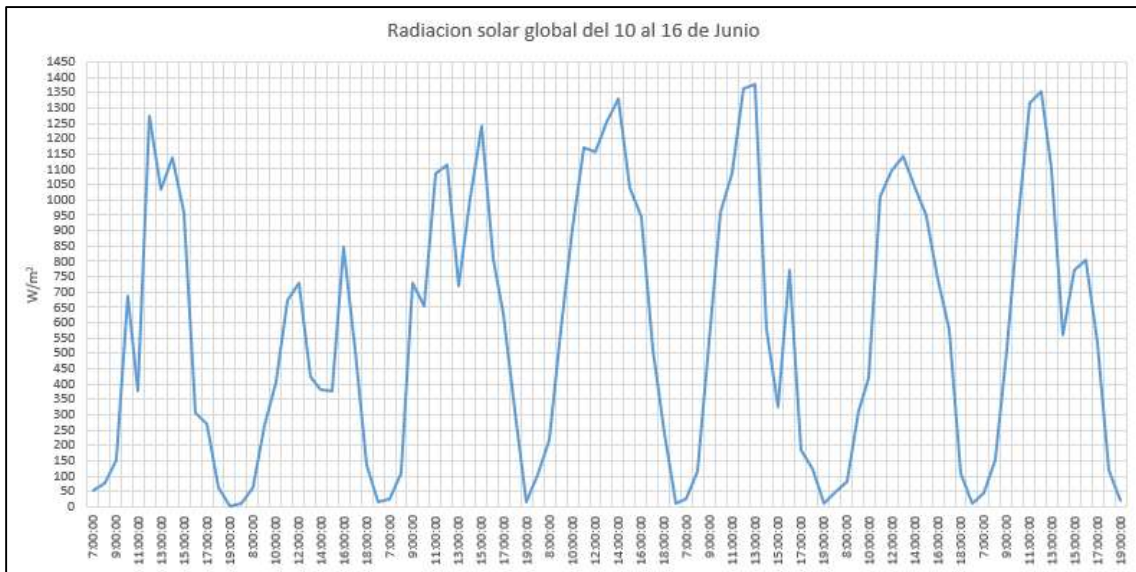


Figura 49. Radiación solar obtenida a través de la estación meteorológica. Fuente: Autores

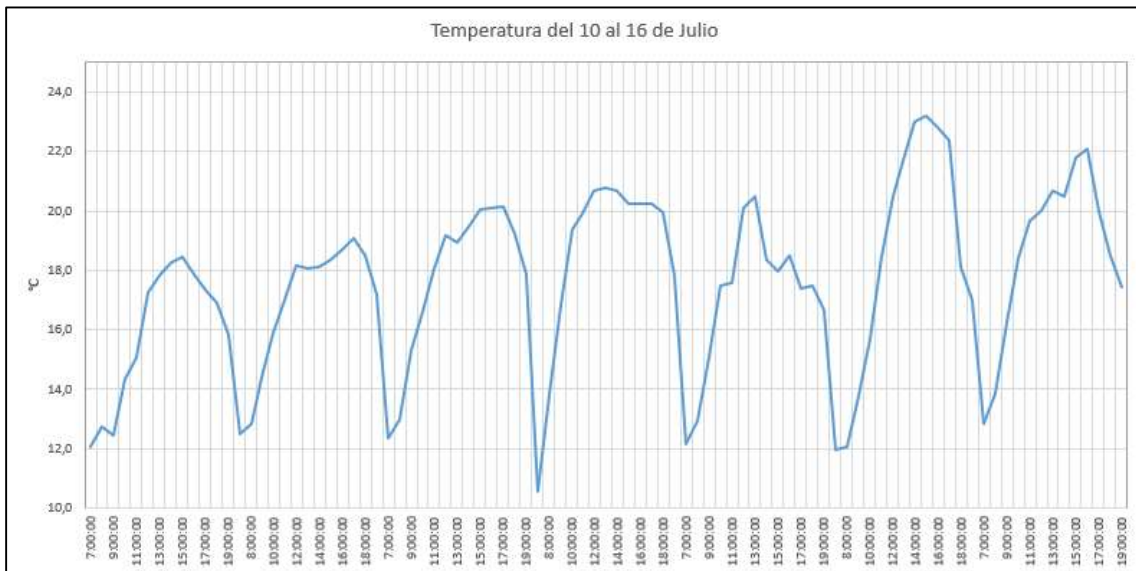


Figura 50. Temperatura obtenida a través de la estación meteorológica. Fuente: Autores

Se realizó el cálculo de promedios diarios para todo el periodo de estudio, obteniendo así un análisis semanal de los datos adquiridos. En la Figura 51 se observa el promedio diario de la irradiancia solar y de igual manera en la Figura 52, se muestra el promedio diario de temperatura obtenida en las mediciones.

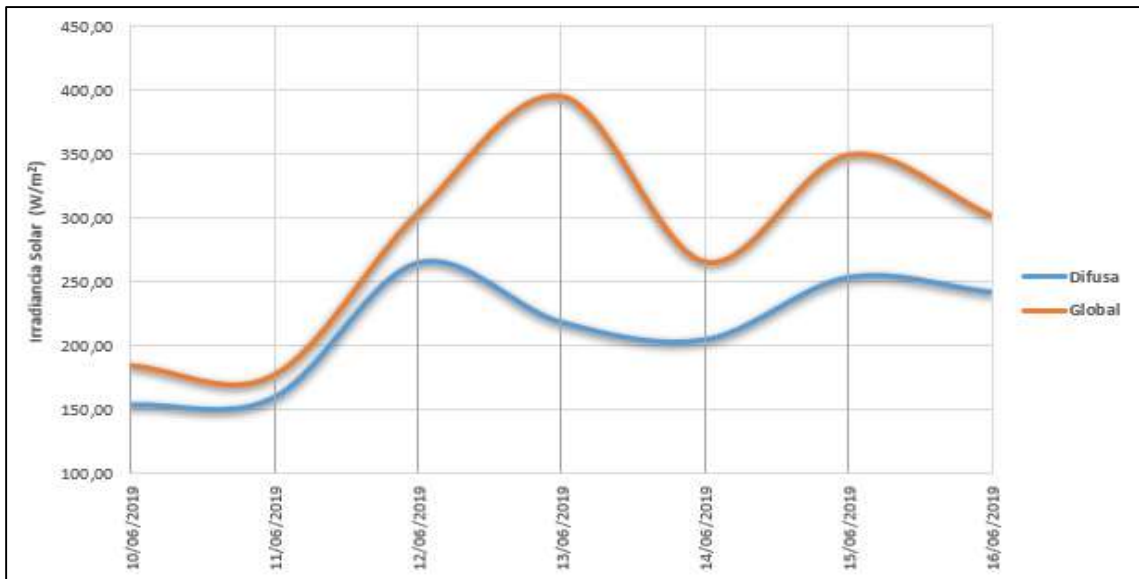


Figura 51. Gráfica del promedio diario del recurso solar (semana completa). Fuente: Autores

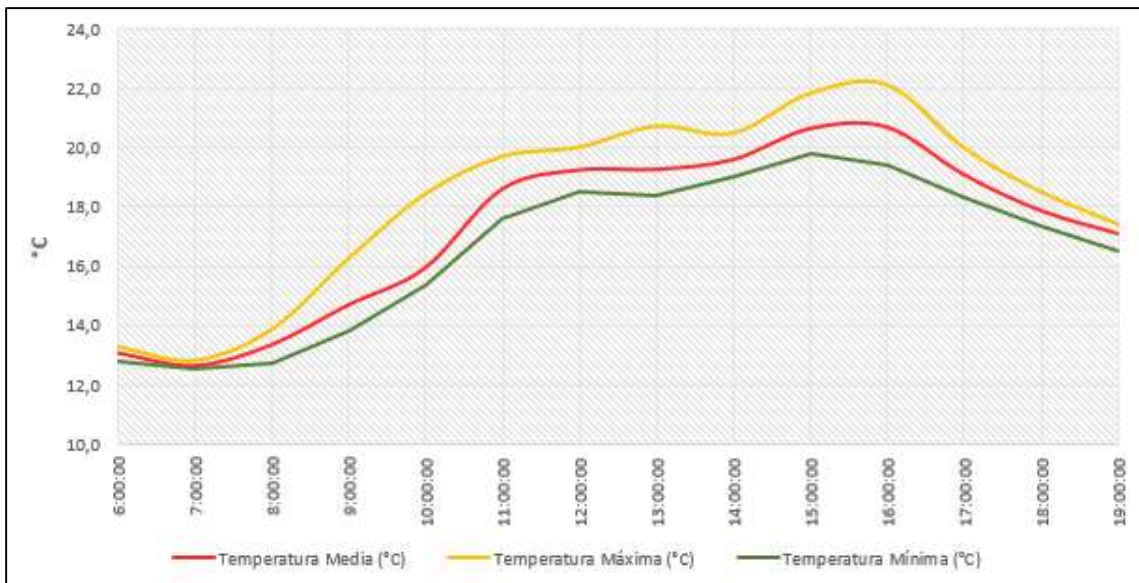


Figura 52. Gráfica del promedio diario de la temperatura (semana completa). Fuente: Autores

## Capítulo 4

### 4. Modelación del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red Eléctrica

Según se describió en el capítulo 2, el sistema fotovoltaico se compone de tres etapas principales, las cuales serán modeladas a través del software MATLAB/Simulink.

#### 4.1. Etapa de Generación

Dado que el sistema analizado posee paneles fotovoltaicos de distintas tecnologías, se obtienen dos modelos independientes. El bloque “PV Array” simula un panel fotovoltaico por medio de su circuito eléctrico, el cual consta de una fuente de corriente dependiente de la radiación y de la temperatura del ambiente, además de un diodo y de dos resistencias internas. Este circuito se puede observar en la Figura 53, sin embargo, los datos fundamentales para un correcto modelado del sistema deben ser obtenidos de la hoja de datos de los paneles e introducidos en los campos de configuración de este bloque. Los datos nominales de los paneles se pueden observar en la Tabla 7.

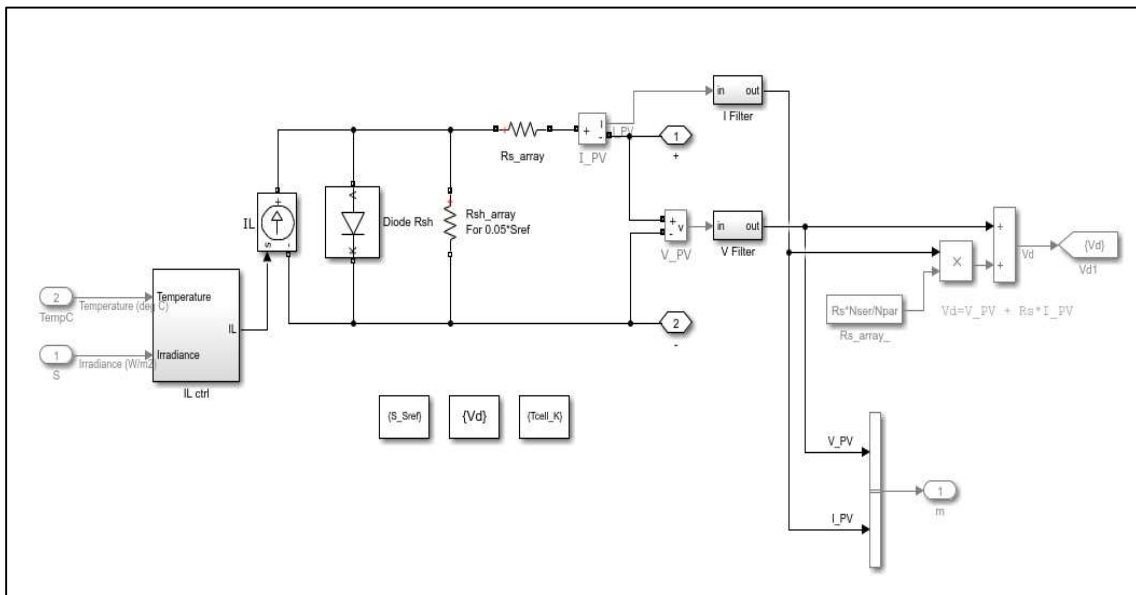


Figura 53. Modelo circuital de un panel fotovoltaico en Simulink. Fuente: Autores

Tabla 7. Tabla de datos característicos de los paneles fotovoltaicos. Fuente: Autores

Descripción	Simbología	Monocristalinos	Policristalinos	Unidades
Potencia máxima	P	300	275	W
Voltaje de circuito abierto	Voc	39,65	38,8	V
Voltaje en el máximo punto de potencia	Vmp	32,23	38,8	V
Número de celdas	N	60	60	
Corriente de cortocircuito	Isc	9,84	9,32	A
Corriente en el máximo punto de potencia	Imp	9,31	8,92	A
Coefficiente de temperatura de Voc		-0,35	-0,35	%/°K
Coefficiente de temperatura de Isc		0,04	0,04	% / °K

Además de la configuración individual de cada panel se debe configurar la cantidad de paneles fotovoltaicos que serán conectados en serie para lograr el voltaje necesario que alimentará al bus de continua del inversor. Con todo lo mencionado se obtiene los bloques de generación fotovoltaica monocristalino y policristalino mostrados en la Figura 54, el subsistema de generación fotovoltaica se lo presenta de esta manera debido a que los bloques contienen los modelos equivalentes.

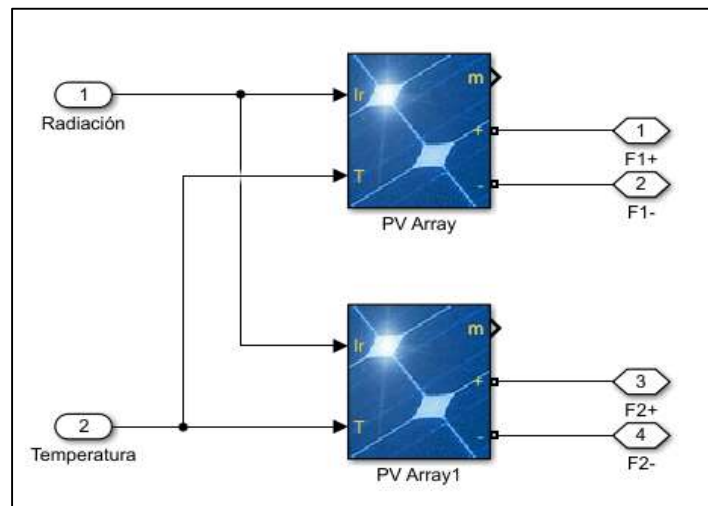


Figura 54. Subsistemas de los bloques de generación. Fuente: Autores

#### 4.2. Etapa de Inversión

Los inversores utilizados en la instalación analizada son producidos por la empresa SMA la cual produce diversos tipos de inversores siendo los inversores sin transformador que son los más comunes. El inversor Sunny Boy 7.0 US tiene una topología sin transformador, es decir, se trata

de un inversor H5 compuesto por cinco semiconductores IGBT como se observa en la Figura 55, donde cuatro de estos forman un puente H y el sobrante es conectado en la entrada del circuito. El quinto semiconductor se utiliza para minimizar la aparición de corrientes de modo común entre los paneles y tierra [47]–[48].

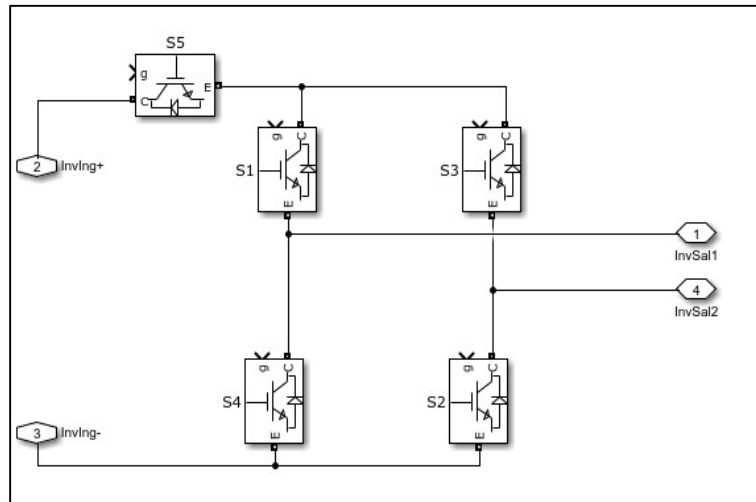


Figura 55. Esquema eléctrico de un inversor H5. Fuente: Autores

Para este caso específico se puede modelar el inversor como un puente H, como se presenta en la Figura 56. La señal de disparo de los IGBT's se genera a partir de una modulación de ancho de pulso basada en una moduladora sinusoidal y una portadora triangular que sería la encargada de fijar la frecuencia de conmutación del inversor, este circuito necesita una señal de control para la sincronización de los semiconductores como se observa en la Figura 57. La amplitud de la moduladora se determina en función de la tensión generada por los paneles fotovoltaicos, mientras que el ángulo de desfase de esta dependerá de la cantidad de potencia que se desee inyectar del lado de alterna. Finalmente, la señal de disparo se observa en la Figura 58.

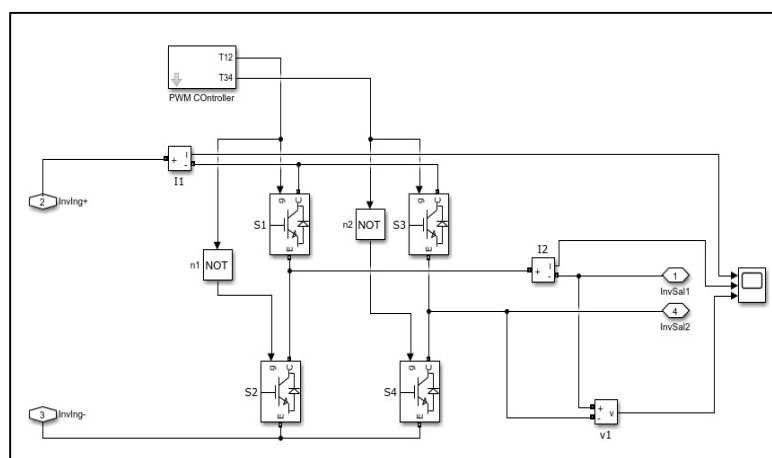


Figura 56. Inversor monofásico en configuración puente H. Fuente: Autores



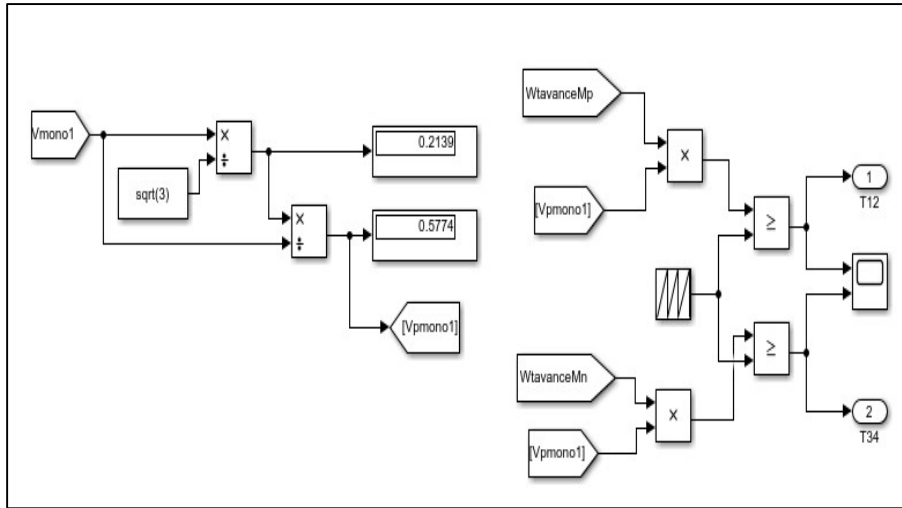


Figura 57. Circuito de control de los semiconductores IGBT. Fuente: Autores

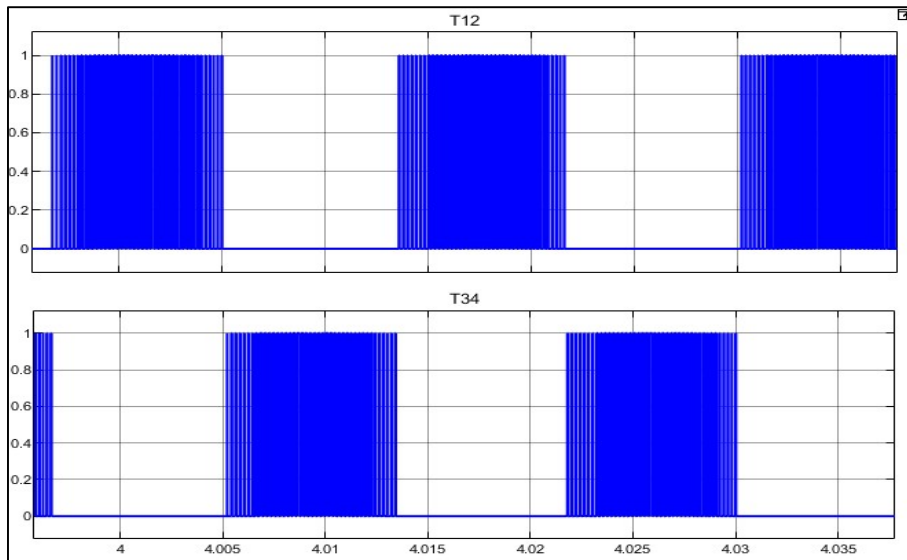


Figura 58. Señal de activación de los IGBT. Fuente: Autores

La moduladora debe adelantarse o retrasarse tomando como referencia la fase de la tensión de línea. Para esto se utiliza un lazo de seguimiento de fase el cual se implementa mediante el bloque “PLL”. El modelo PLL es usado para realizar un control automático ajustando la fase de la señal, este consta de un oscilador controlador por voltaje “VOC” y un filtro de bucle. El bloque PLL genera dos señales: la frecuencia detectada para la tensión y su fase la cual varía entre  $0$  y  $2\pi$ , sincronizando los cruces por cero con la señal ingresada a este bloque como se observa en la Figura 59. Al final esta señal triangular es convertida en dos señales sinusoidales con una diferencia de fase de  $-\pi$  que serán utilizadas en el circuito de control de los semiconductores.

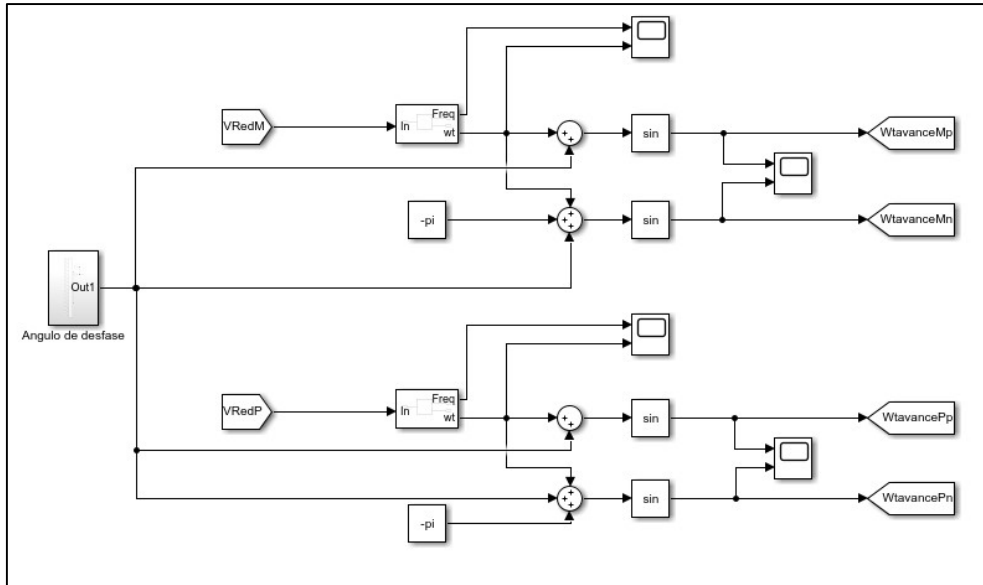


Figura 59. Circuito de potencia controlado por el ángulo de fase. Fuente: Autores

Para concluir el modelamiento del inversor se toma en cuenta que este posee dos entradas monofásicas, una para cada conjunto de paneles. Asumiendo esto se realizó un diseño para la obtención de dos inversores para cada conjunto, los cuales se encuentran en paralelo conformando un solo bloque y de esta manera obtener una representación eléctrica de un inversor Sunny Boy 7.0 como el que se encuentra instalado en la planta fotovoltaica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca apreciado en la Figura 60. El modelo circuital de los inversores para las diferentes tecnologías fotovoltaicas se los puede observar en la Figura 61, en donde se tiene el 199 para los monocristalinos y el 198 para los policristalinos.

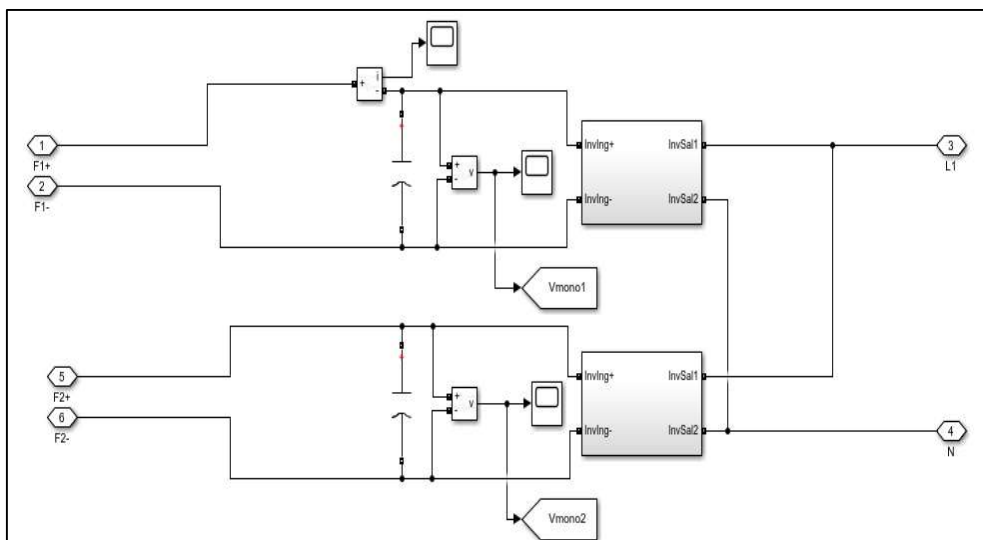


Figura 60. Esquema de un inversor Sunny Boy. Fuente: Autores

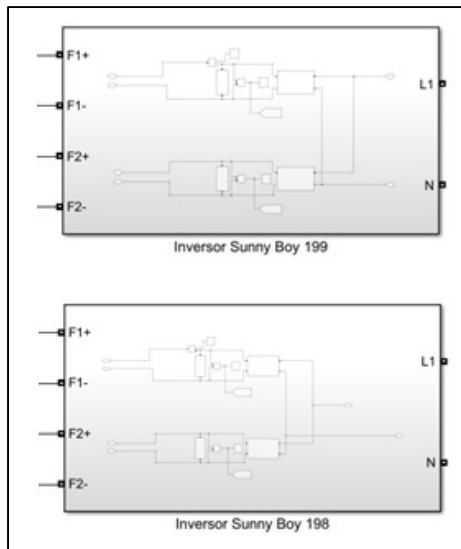


Figura 61. Inversores Sunny Boy utilizados para las diversas tecnologías fotovoltaicas.

Fuente: Autores

Para que la conexión entre la red de baja tensión y el inversor fotovoltaico sea compatible, éste último debe comportarse como una fuente de tensión alterna con amplitud equivalente a la de tensión de línea. Al arrancar los inversores, estos se sincronizan a la tensión de línea mediante el PLL para posteriormente poder inyectar potencia a la red. Al poseer dos inversores monofásicos que logren inyectar energía en una red trifásica, estos deben tener una configuración especial.

### 4.3. Etapa de Generación de C.A. E Inyección a la Red Eléctrica

El sistema fotovoltaico instalado en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, abastecerá de electricidad a varios edificios, entre ellos: Mario Rizzini, Guillermo Mensi, Patio de Comidas, Coliseo, Tecni-Club, Oratorio, Iglesia, Iluminación de los Jardines y Bombas de Agua. El tipo de cable utilizado en la instalación, es el de tipo comercial con sección transversal de  $13,3 \text{ mm}^2$  (6 AWG), cubriendo una distancia de 95 m desde el inversor hasta el transformador, en donde se incluyeron los diversos dispositivos de protección.

Los edificios antes mencionados son suministrados de energía mediante el transformador 19597P de 200 kVA, el cual está instalado en la cabina de transformación ubicada en la parte lateral del edificio Centro de Cómputo. La Figura 62, muestra una foto del transformador 19597P de 200 kVA en la cabina de transformación. Los datos de placa se pueden observar con mayor detalle en la Tabla 8, con las características del mismo se realizó el modelamiento del sistema eléctrico, con una fuente de tensión alterna de 22 kV, la cual se puede observar en la Figura 63.

Tabla 8. Datos de la Placa del Transformador 19597P de 200kVA. Fuente: Autores.

Ítem	Descripción	Especificación
1	Marca	INATRA
2	Capacidad	200 kVA
3	Tensión Primario	22 kV
4	Tensión Secundario	220 V
5	Corriente Primario	5,25 A
6	Corriente Secundario	524,9 A
7	Nivel de Aislamiento	BIL 130
8	Año	2003
9	Conexión	Dyn5
10	Número de Serie	090814357
11	Frecuencia	60 Hz
12	Peso Total	804 Kg
13	Volumen del Aceite	228 L
14	Norma de Fabricación	NTE INEN 2120
15	Código EERCS	19597P



Figura 62. Transformador trifásico 19597P instalado en la cabina de transformación del edificio de Centro de Cómputo. Fuente: Autores

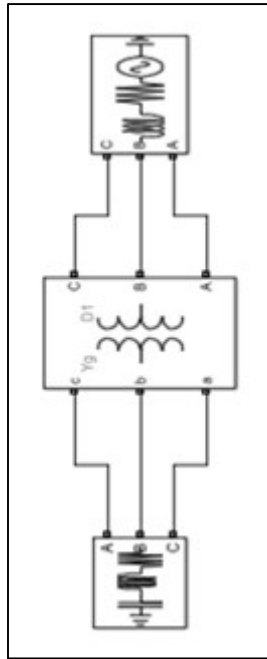


Figura 63. Modelamiento del sistema eléctrico con transformador trifásico en simulink.

Fuente: Autores

#### 4.4. Comprobación de la Inyección de Energía en la Red Eléctrica

Con la modelación del sistema realizada, se procede a efectuar varias pruebas para determinar el funcionamiento de esta a partir de la variación de los parámetros de entrada como son: irradiancia, temperatura y ángulos de fase entre la tensión generada por el inversor y la tensión de la línea. Además, se utiliza un inductor de acoplamiento que cumple la función de permitir la interconexión entre la tensión de salida del inversor fotovoltaica la cual es conmutada y la tensión de línea que es sinusoidal. Las fases de la red eléctrica fueron denominadas mediante la secuencia de fases R, S y T. En este caso el inversor 199 de los paneles monocristalinos está conectado entre las fases R y S, mientras que el inversor 198 de los paneles policristalinos está conectado entre las fases S y T, cabe mencionar que un terminal de cada inversor está conectado en la fase S. El modelo final se lo puede observar en la Figura 64 y a partir de este se obtendrán los distintos resultados que se presentarán a continuación.

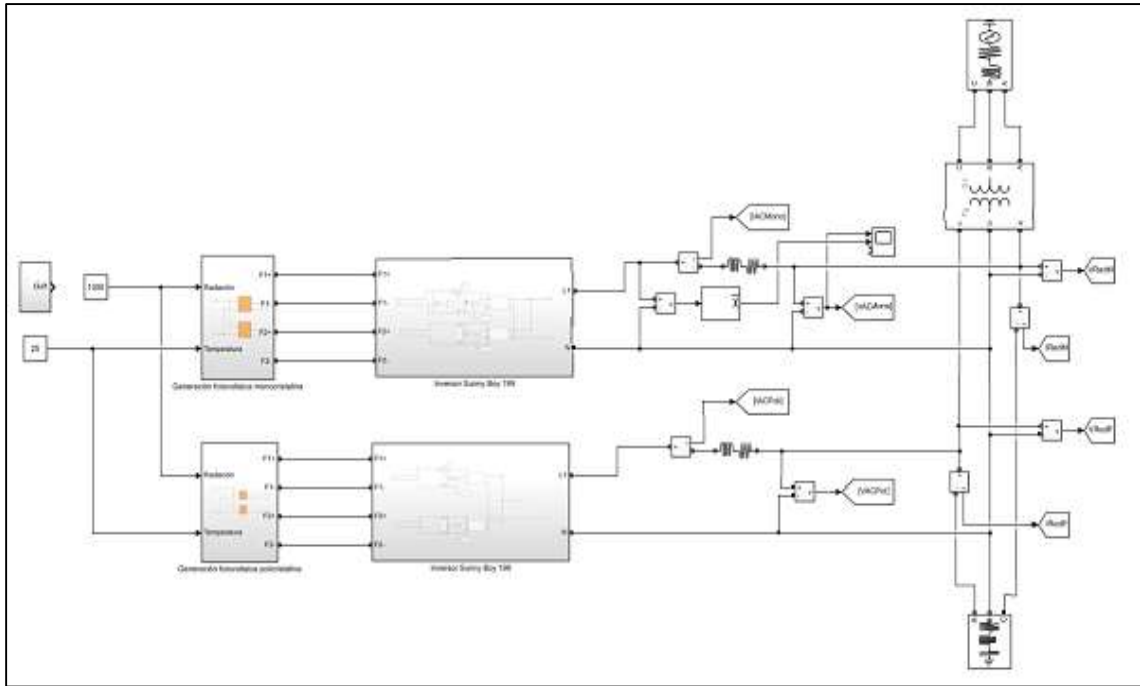


Figura 64. Modelo circuital del SFSCR de la Universidad Politécnica Salesiana. Fuente: Autores

#### 4.4.1. Potencia Inyectada al Variar el Ángulo de Desfase

En la Figura 65 se puede observar la inyección de potencia a la línea cuando se simula una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  sobre los paneles y se realiza una variación del ángulo de desfase, que va desde los  $10^\circ$  hasta los  $40^\circ$ . Para un ángulo de  $40^\circ$  se logra inyectar la potencia máxima generada por los paneles. La potencia que generan los paneles siempre va a ser inferior ya que a la línea en teoría se le puede inyectar “infinita” potencia. La Figura 66, muestra la corriente en los paneles fotovoltaicos, en donde se aprecia la variación de su magnitud debido al cambio de ángulo de desfase, lo que provoca un cambio del punto de operación de estos y por lo tanto una variación en la potencia entregada.

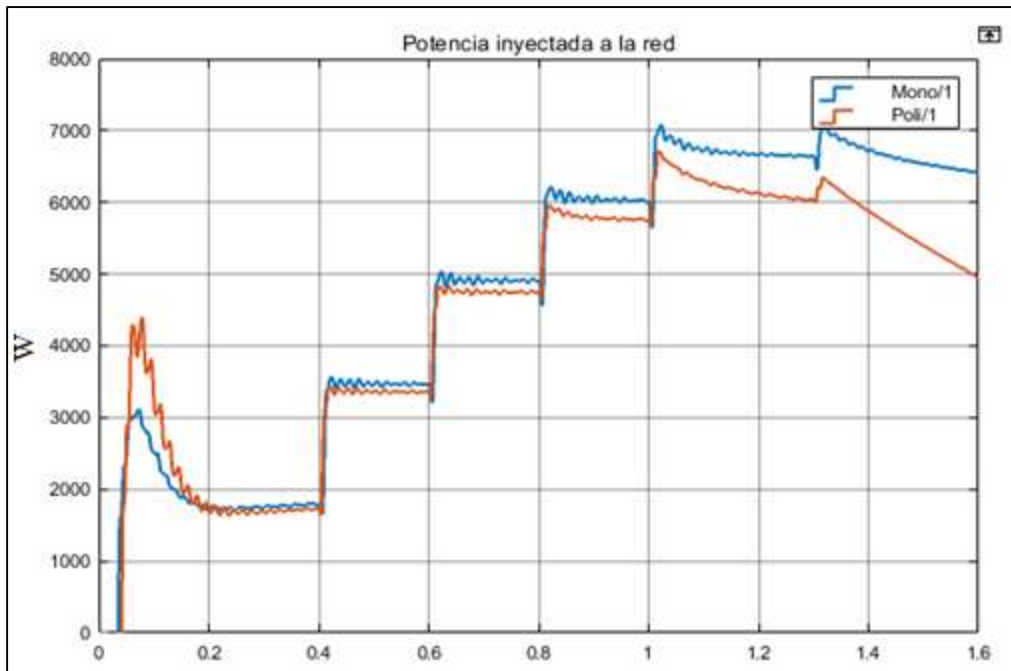


Figura 65. Potencia inyectada a la red al variar el ángulo de desfase. Fuente: Autores

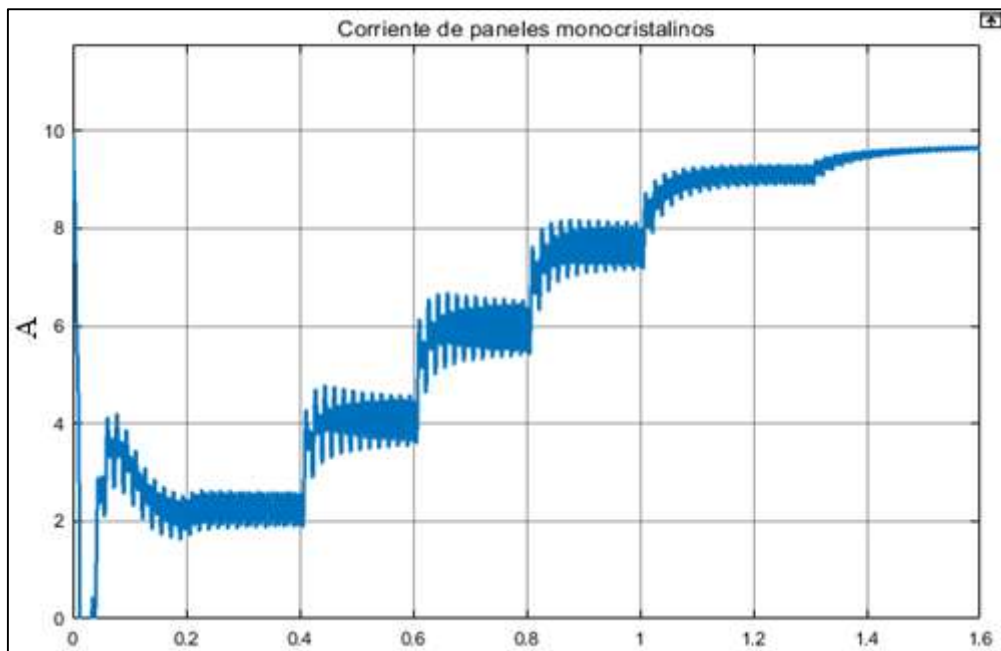


Figura 66. Corriente de los paneles monocristalinos al variar el ángulo de desfase.

Fuente: Autores

#### 4.4.2. Potencia Inyectada al Variar la Irradiancia Solar

Al inyectar una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  con un ángulo de desfase de  $40^\circ$ , se produce la mayor inyección de potencia a la salida del inversor, al disminuir la irradiancia los paneles fotovoltaicos no son capaces de suministrar la potencia absorbida por el inversor, por lo cual esta decae. Se

realizaron varios cambios de irradiancia y ángulos de fase para obtener una relación en la que se obtenga la mayor cantidad de potencia inyectada en la red eléctrica. Las variaciones realizadas se pueden observar en la Tabla 9, en donde se presenta el nivel de irradiancia con su respectivo ángulo al momento de suministrar potencia en la red.

Tabla 9. Mediciones de irradiancia con respecto al ángulo de desfase. Fuente: Autores

Irradiancia	Ángulo de Desfase
1000	40
500	20
250	10

Con lo anterior mencionado se realizó un modelo, que se asemeje al comportamiento de la Tabla 9, este modelo esta presentado en la Figura 67. Obteniéndose así las respuestas óptimas para los niveles de irradianción presentados durante el día.

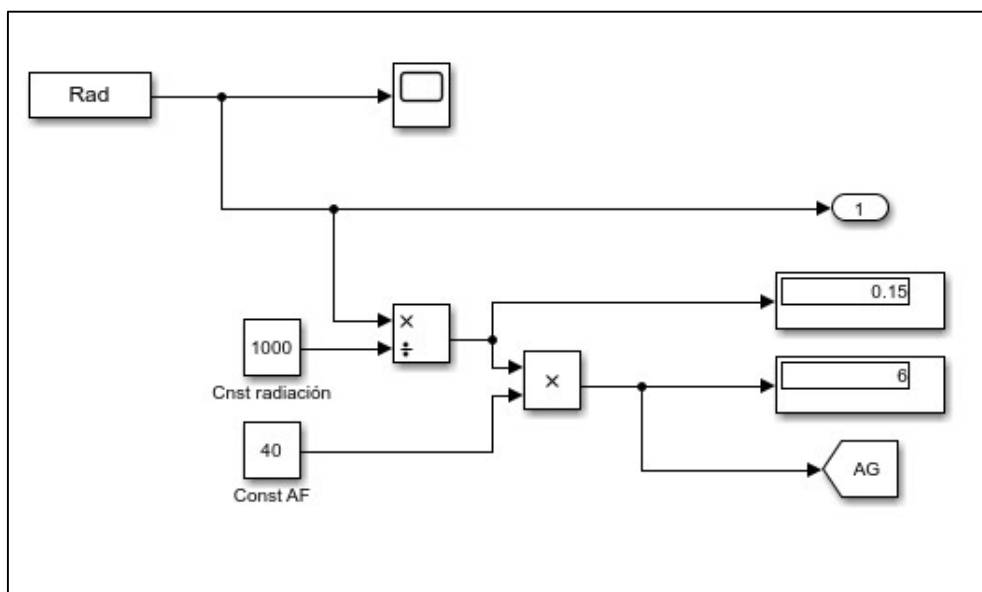


Figura 67. Modelo para el comportamiento de la irradiancia vs el ángulo de desfase.

Fuente: Autores

En la Figura 68 se pueden observar los cambios de potencia. El transitorio observado durante las primeras décimas de segundo corresponde al tiempo que le toma al PLL sincronizarse con la tensión de línea. Se observa que la generación de los paneles monocristalinos siempre es superior a la de los paneles fotovoltaicos policristalinos. Para el mismo intervalo de tiempo, la Figura 69 muestra la corriente en los paneles fotovoltaicos los cuales muestran también un transitorio en el arranque debido al fenómeno explicado previamente.



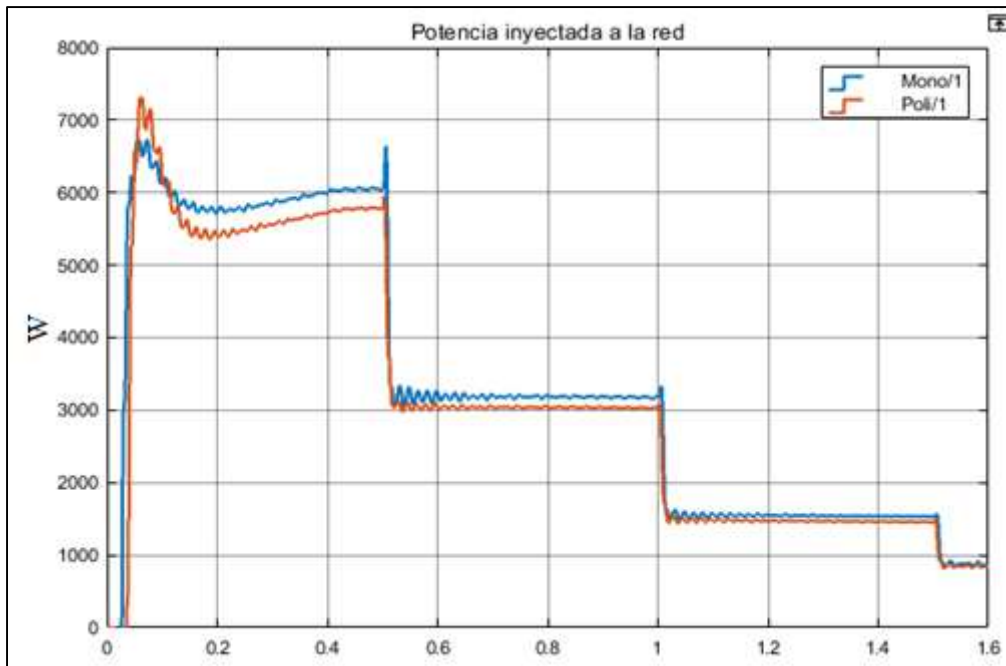


Figura 68. Potencia inyectada a la red al variar la irradiancia solar. Fuente: Autores

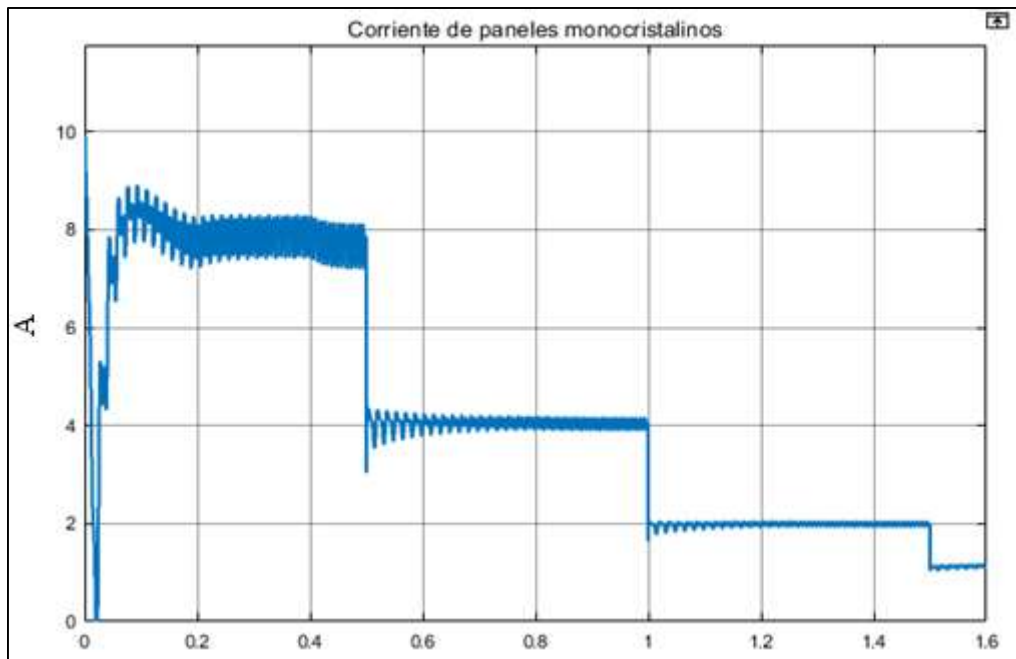


Figura 69. Corriente de los paneles monocristalinos al variar la irradiancia solar.

Fuente: Autores

#### 4.4.3. Potencia Inyectada con los Datos Obtenidos en la Estación Meteorológica

Los datos suministrados por la estación meteorológica y previamente graficados en las Figura 49 y Figura 50, fueron utilizados para la simulación de la potencia activa de la planta fotovoltaica. Estos datos al ser ingresados en el circuito de Simulink, junto con el modelo diseñado en la Figura

67 generan la gráfica de la potencia activa del SFCR, la cual se puede observar en la Figura 70. Además, para reducir tiempos de simulación se eliminaron las cantidades nulas de irradiancia, al no ser representativas. Para inicializar el programa se cargan valores de  $1000 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , después de esto los datos registrados son ingresados con normalidad como se puede observar en las Figura 71 y Figura 72 respectivamente.

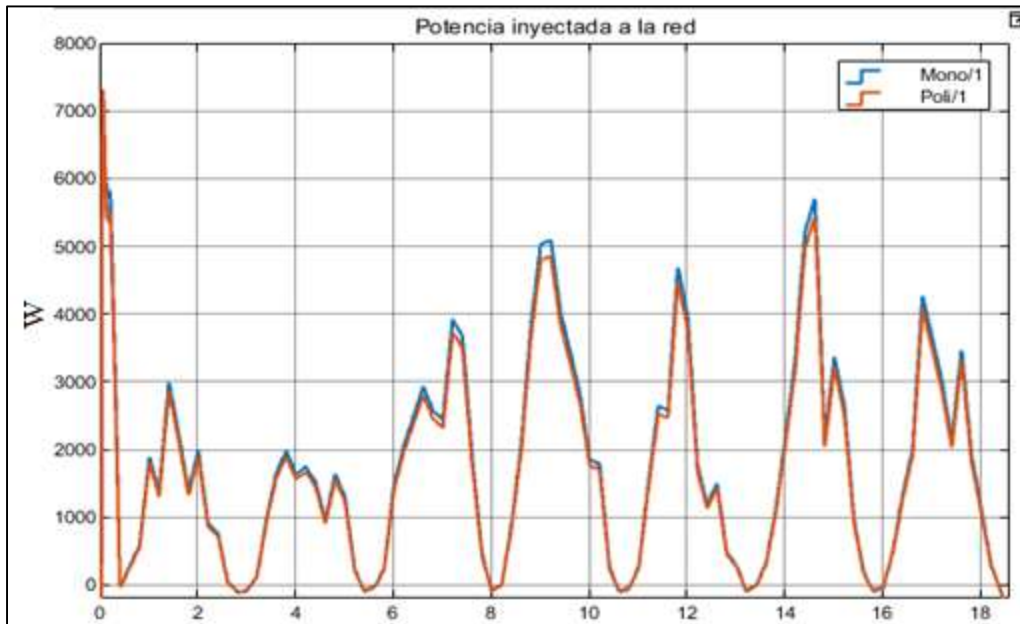


Figura 70. Potencia activa del SFCR con los datos de la estación meteorológica.

Fuente: Autores

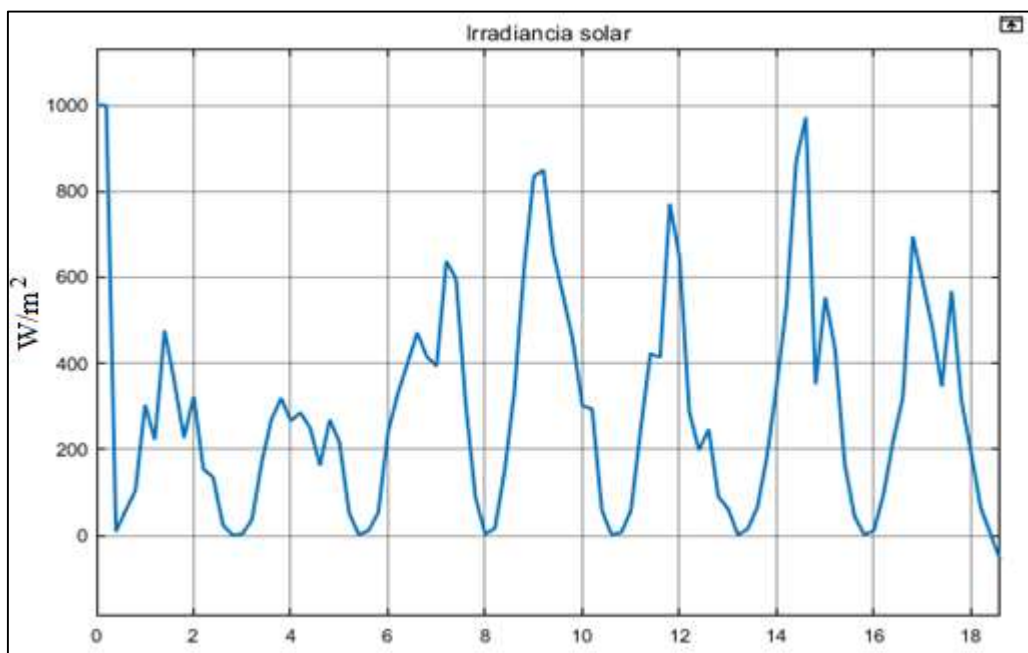


Figura 71. Irradiancia solar simulada a través de Simulink. Fuente: Autores

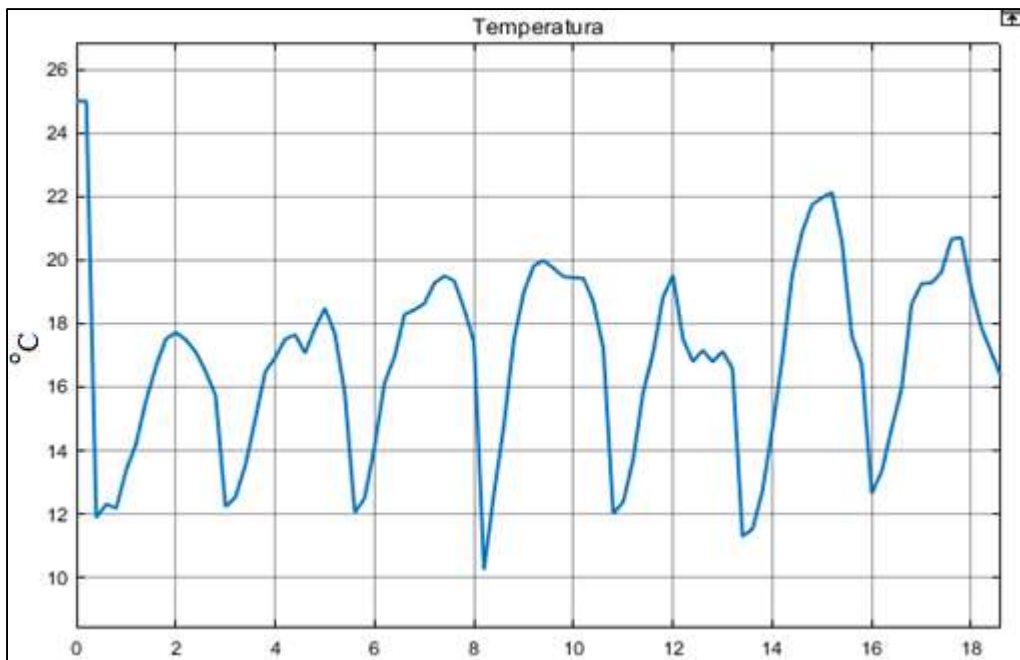


Figura 72. Temperatura ambiente simulada a través de Simulink. Fuente: Autores

De igual manera se obtuvieron las señales de corriente, tanto de los paneles monocristalinos como de los policristalinos, las cuales se observan en las Figura 73 y Figura 74 respectivamente. Puede apreciarse que la forma de onda de corriente tiene un comportamiento similar a la forma de onda de irradiancia presentada en la Figura 49.

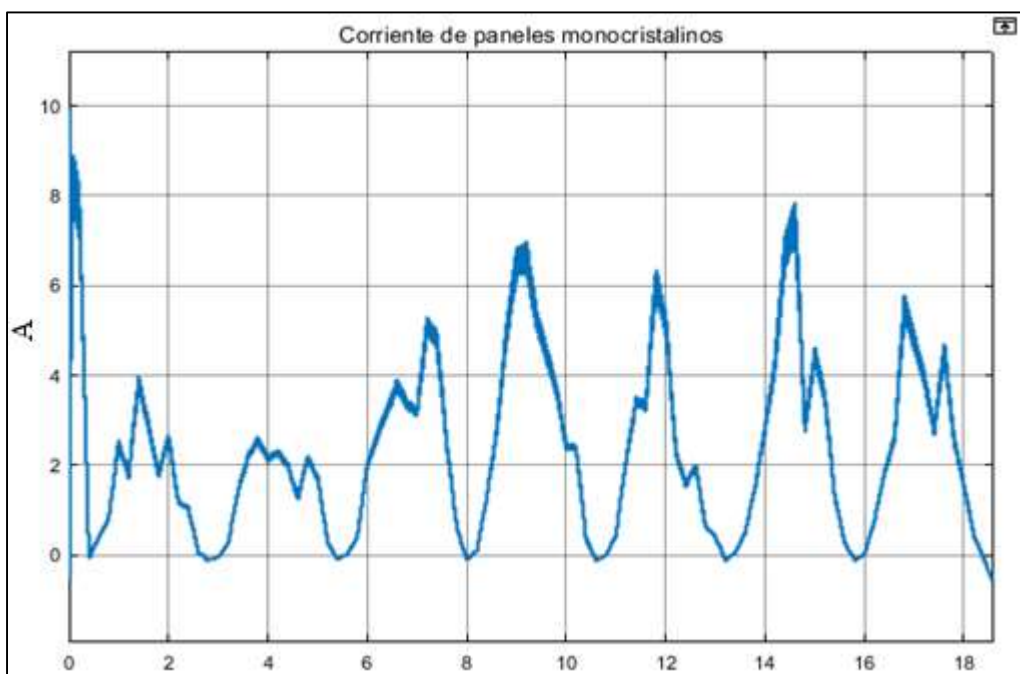


Figura 73. Señal de Corriente en el conjunto de paneles monocristalinos en C.C.

Fuente: Autores

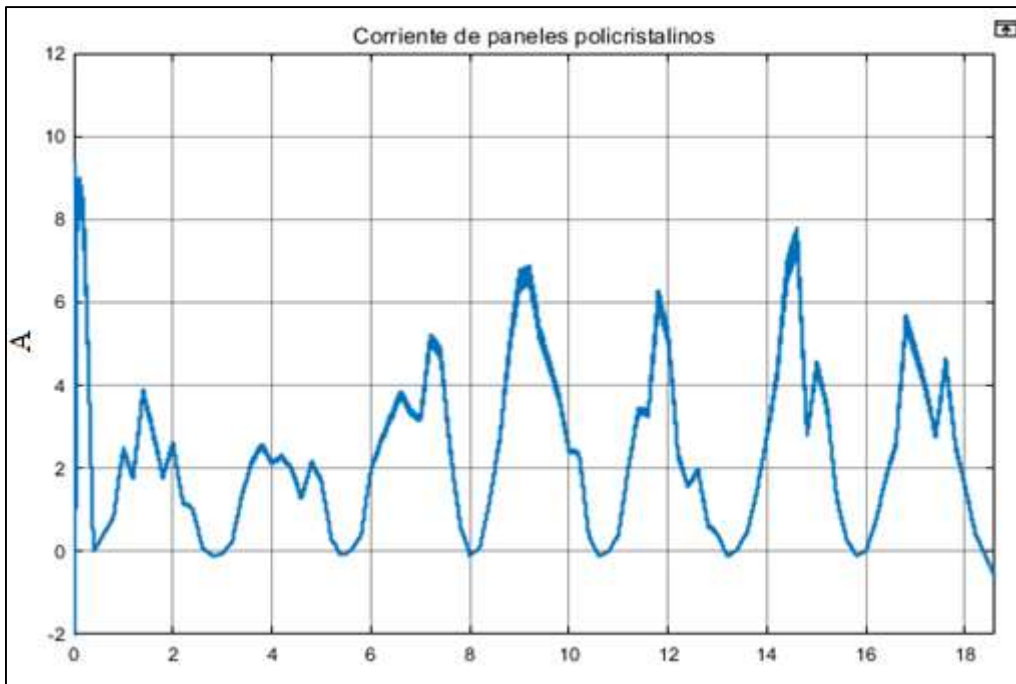


Figura 74. Señal de Corriente en el conjunto de paneles policristalinos en C.C. Fuente: Autores

Se obtuvieron, además las señales de voltaje y potencia de ambos conjuntos de paneles fotovoltaicos las cuales se presentan en las Figura 75, Figura 76 y Figura 77 respectivamente. En estas señales es evidente una diferencia en la magnitud del voltaje generado, puesto que los parámetros característicos de cada tipo de panel fotovoltaico difieren en su valor según la ficha técnica presentada en la Tabla 7.

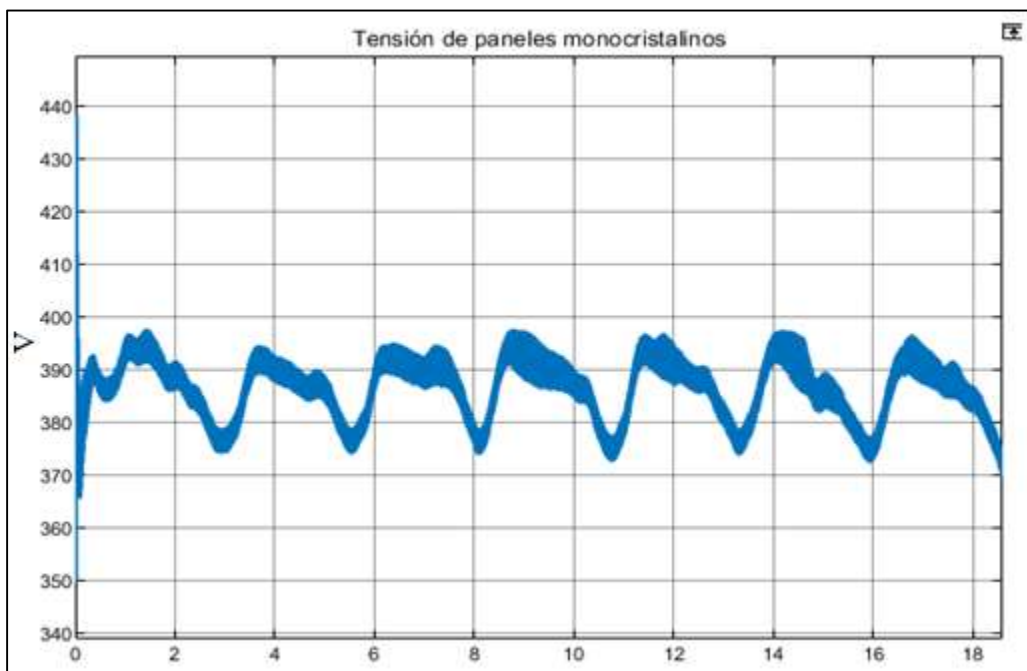


Figura 75. Señal de Voltaje en el conjunto de paneles monocristalinos. Fuente: Autores

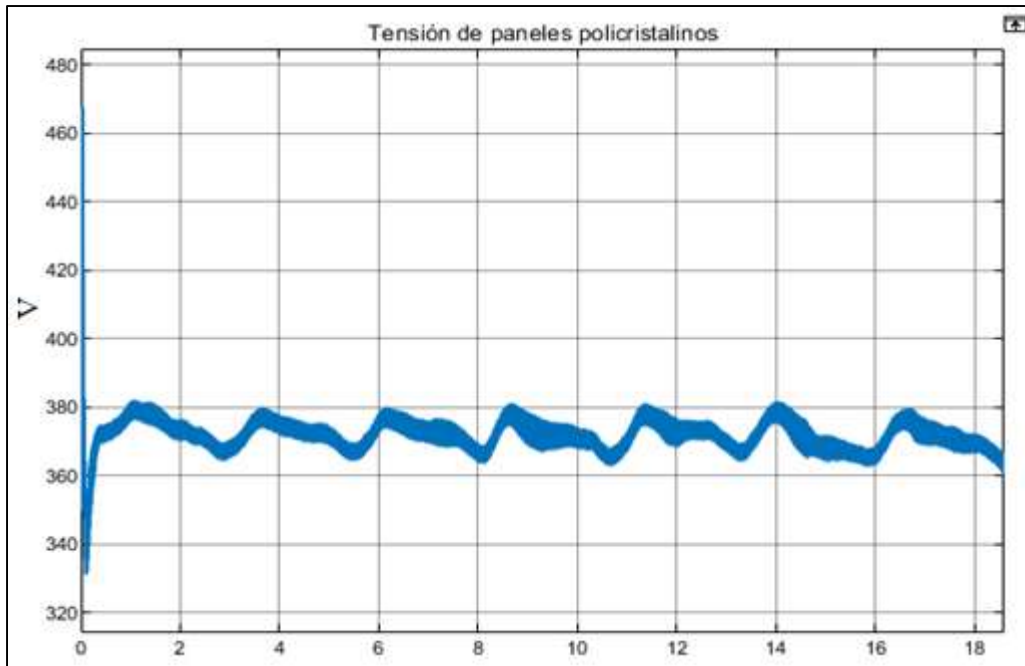


Figura 76. Señal de Voltaje en el conjunto de paneles policristalinos. Fuente: Autores

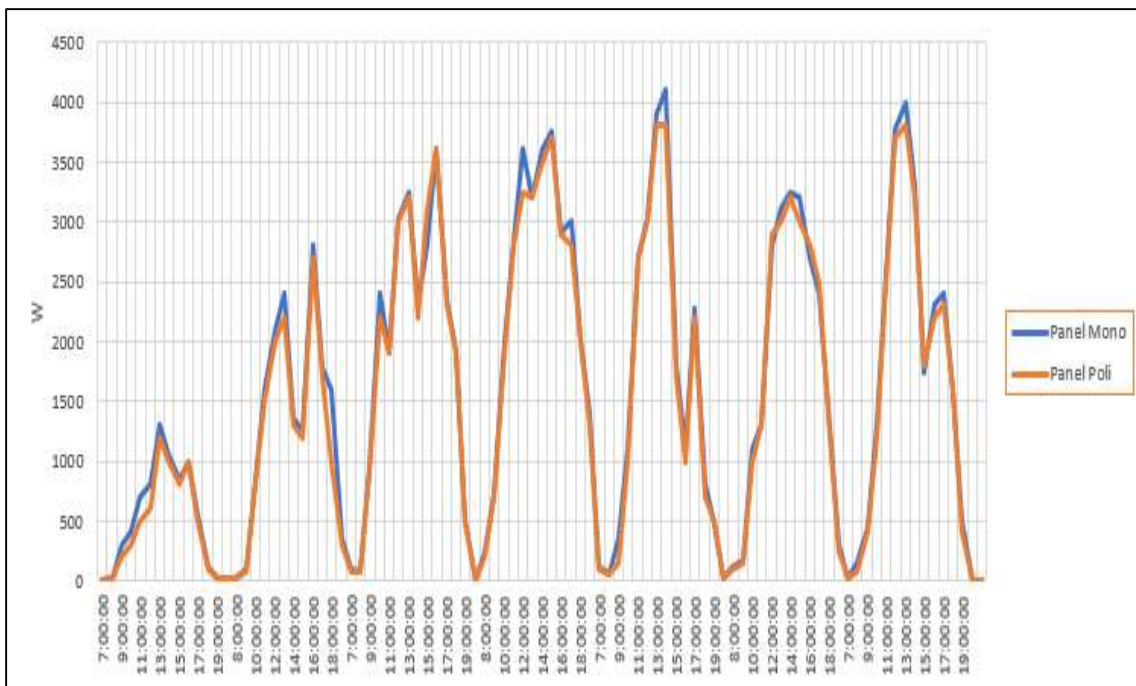


Figura 77. Potencia de C.C. simulada de los paneles fotovoltaicos. Fuente: Autores

Como resultado de la simulación en el modelado del sistema fotovoltaico, en la Figura 78 se puede observar la señal de corriente de cada inversor fotovoltaico que se inyecta al inversor. Ambas corrientes presentan una magnitud similar durante todo el periodo, donde los cambios que

presentan se deben a la variación de radiación solar y temperatura que fueron obtenidas mediante la estación meteorológica.

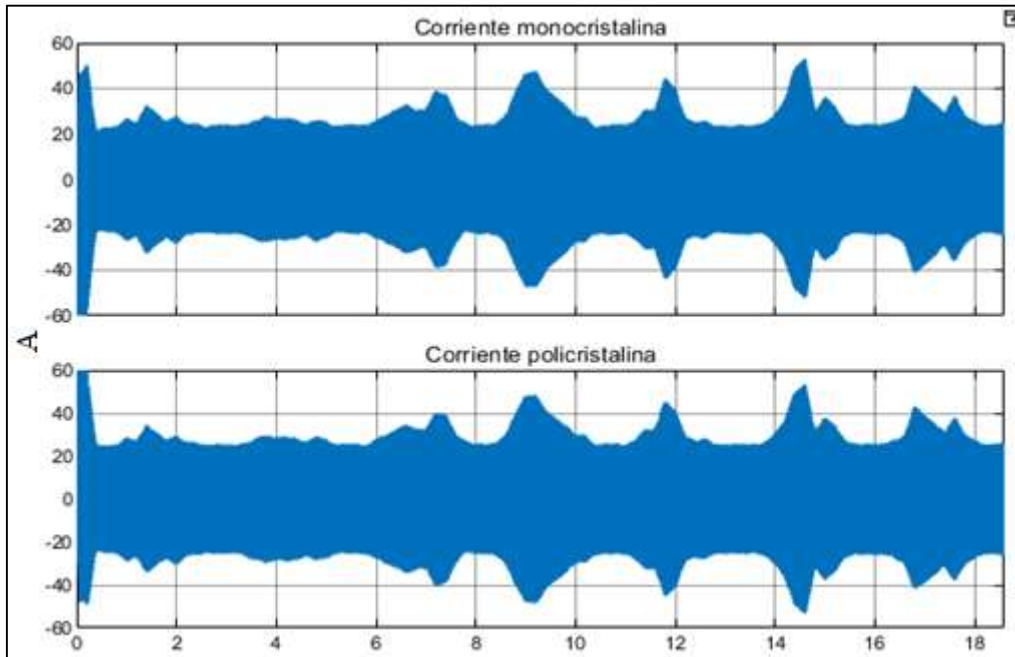


Figura 78. Señal de Corriente al momento de inyectar la energía en la red eléctrica.

Fuente: Autores

Para el periodo analizado se calculan ahora los valores de energía diaria generada por los paneles y la energía diaria inyectada por los inversores a la línea eléctrica. Las Figura 79 y Figura 80 muestran los valores obtenidos.

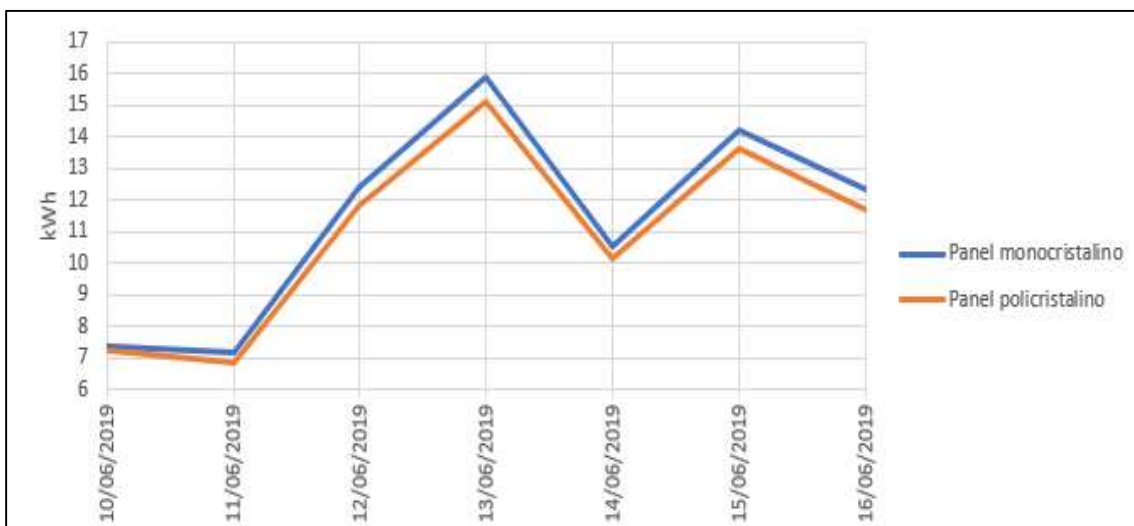


Figura 79. Energía diaria simulada en los paneles. Fuente: Autores



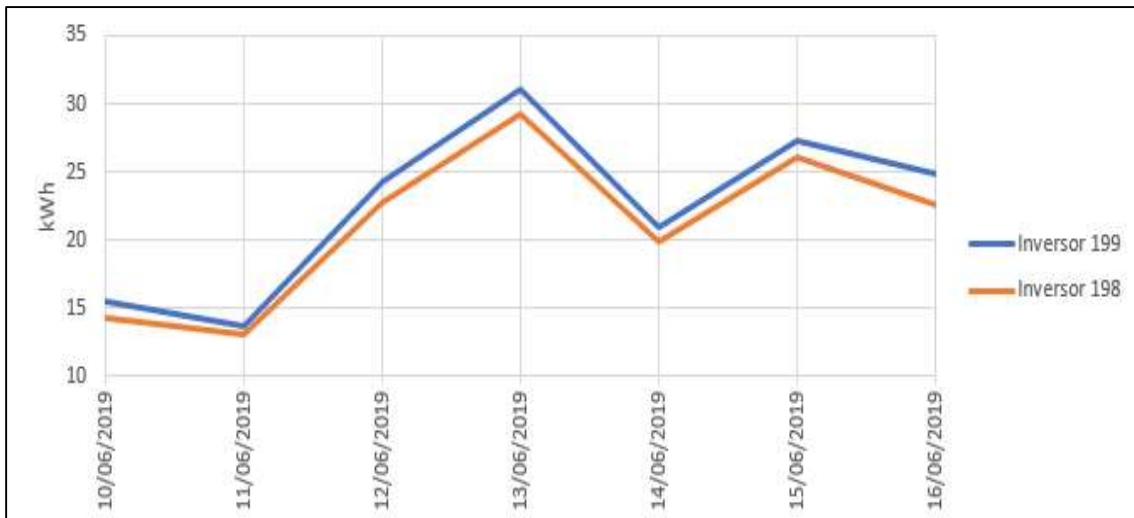


Figura 80. Energía diaria simulada a la salida de los inversores. Fuente: Autores

Para concluir se realizan las mediciones de tensión y corriente, de cada una de las fases del sistema trifásico y los resultados se muestran en las Figura 81 y Figura 82. El sistema se simula con tensiones balanceadas y el efecto de la inyección de potencia por parte de los inversores resulta en una ligera variación de la tensión rms nominal de línea-neutro alrededor de 127 V. La corriente rms en cada fase resulta de 26,25 A.

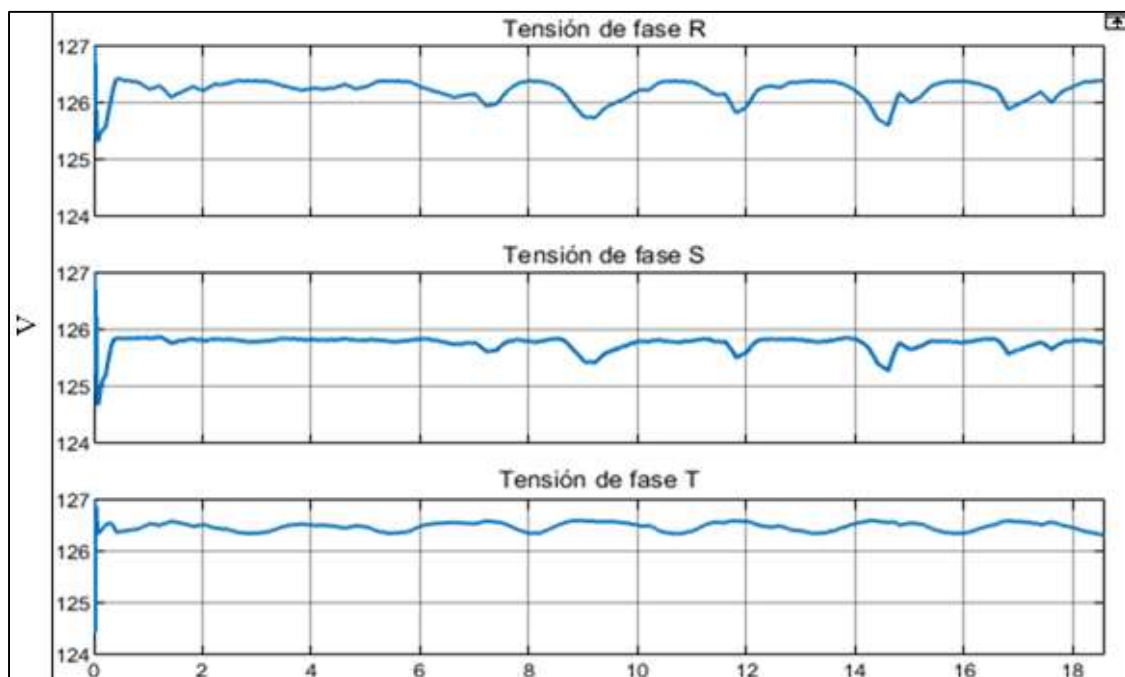


Figura 81. Valores de tensión rms simulados en la red eléctrica con el sistema fotovoltaico.

Fuente: Autores

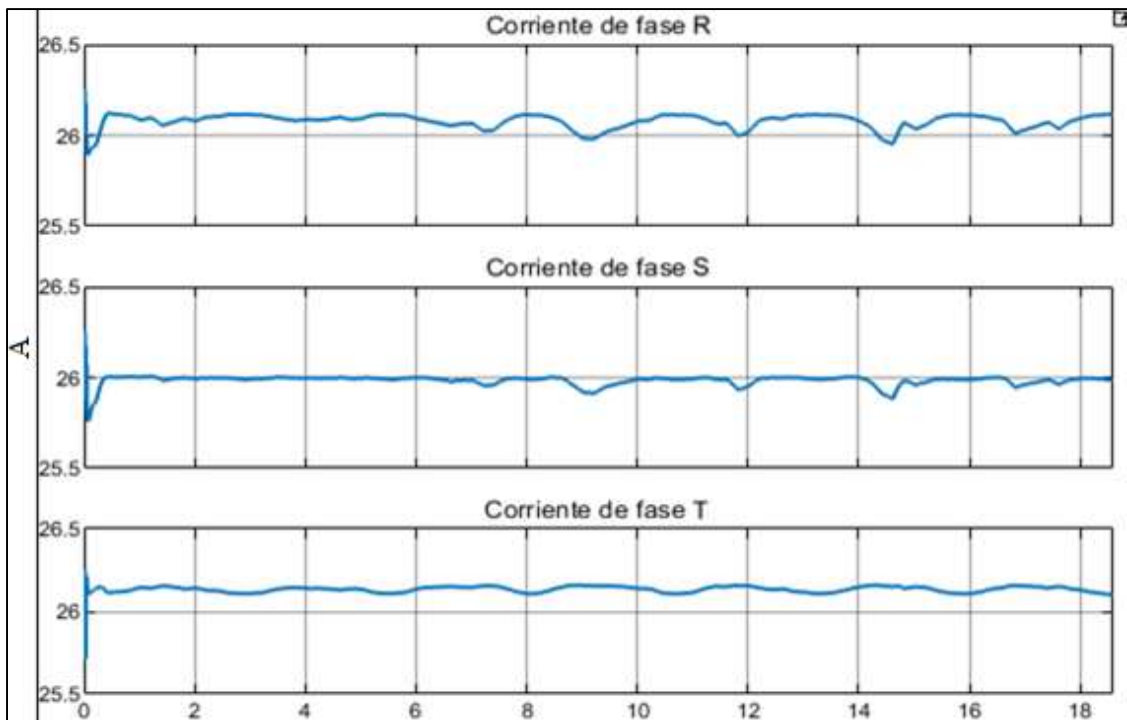


Figura 82. Valores de corriente rms simulados en la red eléctrica con el sistema fotovoltaico.

Fuente: Autores



## Capítulo 5

### 5. Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones

El presente trabajo se centró en el estudio y modelado del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Para esto se tomaron datos experimentales de la estación meteorológica, situada en la misma universidad para luego poder simular el modelo circuital del SFCR. Con el modelo obtenido se hicieron pruebas de control de inyección de potencia, las cuales fueron presentadas en las figuras y anexos correspondientes.

Los datos de irradiancia solar, obtenidos a partir de la estación meteorológica nos demuestran que la radiación en esta época del año es menor a los  $1000 \text{ W/m}^2$ , llegando a tener picos diarios tan bajos, como por ejemplo  $319 \text{ W/m}^2$  debido a la presencia de nubes. La irradiancia solar máxima obtenida fue el sábado 15 de junio de 2019 a las 13 horas con una medición de  $972 \text{ W/m}^2$ , siendo aproximada a la irradiancia nominal de los paneles fotovoltaicos.

La temperatura óptima de los paneles para generar la mayor cantidad de potencia es de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , sin embargo, al obtener los datos de la estación meteorológica se pudo evidenciar que estos valores varían desde los  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta los  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , afectando de cierta manera en la producción de los paneles, esto se debe a varios factores, entre los cuales tenemos: la época del año en donde se realizaron las pruebas, además de las variaciones de nubosidad y precipitación que se presentan durante el día.

Con la simulación efectuada al modelo del sistema fotovoltaico se evidenció una diferencia de tensión del 6% y 7%; así como también una diferencia de corriente del 16% y 20% aproximadamente en los resultados de C.C. en los paneles policristalinos y monocristalinos respectivamente, superando de esta manera los resultados simulados a los reales. Sin embargo, los valores empleados para obtener esta relación fueron los máximos en la simulación, mientras que en el inversor esta característica es incierta, pudiendo tratarse de la máxima, la media o una instantánea. Esta variación se puede presentar por aspectos reales que no se toman en cuenta en la simulación como son: el nivel de polvo o suciedad presentado en los paneles, la disminución de irradiación producida por nubes en ciertos puntos.

Por otra parte, los resultados de C.A. obtenidos mediante la simulación son menores a los medidos, presentando una diferencia aproximada del 4% y 5% en los inversores 198 y 199 respectivamente. Esta variación se debe a que el inversor recreado en el software no tiene implementado el método de seguidor de punto de máxima potencia (MPPT), sin embargo, al

realizar el modelo de comportamiento de la irradiancia con respecto al ángulo de desfase, esta potencia no presenta una variación amplia en sus medidas.

Las simulaciones realizadas muestran que el ángulo de desfase entre la tensión del inversor y la tensión de línea permitió variar la cantidad de potencia inyectada a la línea eléctrica. Partiendo del caso de  $0^\circ$ , para el que no se tiene inyección de potencia, se llegó hasta  $40^\circ$ , donde se inyecta la máxima potencia disponible en los paneles.

El funcionamiento de la red eléctrica en la modelación con las conexiones establecidas de las fases (R,S,T), se tuvo como resultado: un incremento de 0,5 V en la tensión de las fases R y T; y un decrecimiento de 0,25 V en la fase S, de igual manera ocurre en la corriente las cuales presentan un comportamiento similar al de las tensiones, con variaciones de 0,25 A., es importante resaltar el efecto observado en la fase R en la que se observan mayores variaciones a lo largo del período analizado, llegando a tener mediciones por debajo de los 126 V y los 26 A.

## **5.2. Recomendaciones**

Se deben implementar dentro del laboratorio de energía fotovoltaica, equipos de medición y adquisición de datos tanto en C.C. como en C.A. para analizar de mejor manera aspectos como la corriente, tensión y potencia, estos deberán poseer niveles altos de confiabilidad, debido a que, en la sección de generación, la adquisición de datos solo se presenta de manera instantánea y no posee un registro de los mismos. Además, que en estas medidas se encontraron de 1 a 3 errores diarios en la adquisición, requiriéndose una mejor adquisición para obtener una mayor exactitud en el análisis del sistema.

Realizar una capacitación acerca del funcionamiento y construcción interna del inversor Sunny Boy 7.0, puesto que este dispositivo cuenta con más funciones internas, además de la de convertir la energía. El mismo dispositivo cuenta con un apartado para realizar adquisiciones y representaciones gráficas de potencias, en las cuales se pueden observar datos diarios, mensuales y anuales. Sin embargo, al no estar configurado de una manera adecuada, este presenta ciertos fallos puesto que cada cierto tiempo los datos que son almacenados tienden a perderse, siendo imposibles de recuperar, afectando de esta manera a cualquier estudio futuro. Con todo lo ya mencionado acerca del funcionamiento del inversor, conocer la topología interna de este resulta indispensable puesto que la información que proporciona la empresa en su página oficial es mínima y siendo este sistema enfocado al método investigativo, se debería tener más conocimiento acerca del mismo.

Para eliminar el problema del desbalance de energía suministrada a la red es necesario un nuevo conjunto de paneles fotovoltaicos, el cual permita una conexión adecuada en el sistema al realizar

una variación en la conexión que se especifica en la Figura 27, transformando de esta manera en tres sistemas monofásicos, conectados en una red trifásica. En el caso de no ser posible la instalación de este nuevo conjunto por problemas económicos o de infraestructura, se plantea un cambio del tipo de inversores, pasando de inversores monofásicos a trifásicos, consiguiendo un mejor adecuamiento en la instalación del sistema.

## REFERENCIAS

- [1] Internacional Renewable Energy Agency, “Ranking of the World Powers that have Opted for this form of Renewable Energy”, 2018 [Online]. Available: <https://www.irena.org/solar>. [Accessed: Ene-2019].
- [2] Agencia de Regulación y Control de Electricidad “Balance Nacional de Energía Eléctrica”, [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21413389>. [Accessed: Ene-2019].
- [3] A. Ramon, R. Pineda, “Análisis del Rendimiento de los Acumuladores de Energía del Sistema Fotovoltaico existente en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca”, UPS-TESIS 2015
- [4] Palomino, B. La Universidad Politécnica Salesiana cuenta con Energía Fotovoltaica. Recuperado de <https://reddigital10.blogspot.com/2019/01/la-universidad-politecnica-salesiana.html>. [Accessed: Ene-2019].
- [5] James P. Dunlop. Photovoltaic Systems. American Technical Publishers, Incorporated. p. 102. (2010).
- [6] M. H. Badii, A. Guillen, and O. L. Serrato, “Historia y Uso de Energías Renovables History and Use of Renewable Energies,” vol. 10, no. 1, pp. 1–18, 2015.
- [7] J. I. Alonso Montes, C. Jiménez Suárez, A. Lecuona Ribot, F. Mellado García, J. F. Plaza Fernández, V. Ramos Gonzáles, and G. Sala Pano, Energía Solar Fotovoltaica. 2007.
- [8] C. A. Bulnes, R. Best, and B. Lejos, “Energía del Sol,” 2010.
- [9] B. Wanner, “Is Exponential Growth of Solar PV the Obvious Conclusion?,” International Energy Agency, 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/february/is-exponential-growth-of-solar-pv-the-obvious-conclusion.html>.
- [10] I. E. Agency, “Solar PV,” International Energy Agency, 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/solar/>.
- [11] J. Lorente, “La Radiación Solar,” Departamento de Astronomía y Meteorología, 2013.
- [12] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino/ Gobierno de España, “La Radiación Solar,” Agencia Estatal de Meteorología, 2012.
- [13] M. Deleg, J. Uguña, “Análisis de la Curva de Demanda de Potencia Eléctrica de Red debido a la Incorporación de Generación Fotovoltaica en el Edificio Cornelio Merchán de la Universidad Politécnica Salesiana”, UPS-TESIS 2016
- [14] M. Cáceres, A. Busso, L. Vera, A. Firman, G. Leiva, L. Luque, “Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red: Su Estabilidad,” Energía Sol., vol. IV, no. Junio, pp. 47–54, 2013.
- [15] I. R. D. Santos, I. H. Gerald, D. M. Castro Fernández, Ms. L. B. Herrera Acosta, ““ Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red Eléctrica, Su Diseño,” Conv. Científica Ing. y Arquít., no. May 2017, 2012.
- [16] S. A. Santa García, “Diseño de una Instalación Fotovoltaica Autónoma para la finca Mis Delitio en Pereira - Colombia,” 2014.

- [17] L. Basterra and C. Legarza, “Instalaciones Fotovoltaicas Aisladas y Conectadas a la Red Eléctrica,” 2017.
- [18] J. Romero C, “Análisis del Funcionamiento de Paneles Fotovoltaicos y su Utilización en las Regiones de la Costa y Sierra del Ecuador. Caso de Estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Mataró,” 2015.
- [19] “Tipos de Paneles Solares Fotovoltaicos Comerciales.” [Online]. Available: [https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/tipos-de-paneles-solares-fotovoltaicos/#Clasificacion\\_de\\_los\\_tipos\\_de\\_placas\\_solares\\_por\\_su\\_tecnologia](https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/tipos-de-paneles-solares-fotovoltaicos/#Clasificacion_de_los_tipos_de_placas_solares_por_su_tecnologia). [Accessed: 16-Apr-2019].
- [20] “Energía Renovable Peru con Deltavolt.” [Online]. Available: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar/paneles-solares>. [Accessed: 16-Apr-2019].
- [21] M. Dautta, S. M. S. M. Chowdhury, M. R. H. Bipu, M. Z. Nain, S. I. Khan, “Testing and Performance Analysis of Charge Controllers for Solar Home System,” 8th Int. Conf. Electr. Comput. Eng. Adv. Technol. a Better Tomorrow, ICECE 2014, no. 04, pp. 313–316, 2015.
- [22] N. Khera, N. Rana, S. Narendiran, S. K. Sahoo, M. Balamurugan, S. Prabhakar Karthikeyan, I. Jacob Raglend, “Design of Charge Controller for Solar PV Systems,” 2015 Int. Conf. Control Instrum. Commun. Comput. Technol. ICCICCT 2015, pp. 149–153, 2016.
- [23] X. Serrano, J. Gonzalez, X. Cardenas, G. Escrivá. "Improved Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for PV Systems". 1-6. 10.1109/UPEC..8114046, 2016
- [24] M. Lokeshreddy, P. J. R. P. Kumar, S. A. M. Chandra, T. S. Babu, N. Rajasekar, “Comparative Study on Charge Controller Techniques for Solar PV System,” Energy Procedia, vol. 117, no. January, pp. 1070–1077, 2017.
- [25] J. González, X. Cárdenas, “Análisis e Implementación de un Sistema Electrónico para Alcanzar el Punto Máximo de Potencia en los Paneles Solares de la Universidad Politécnica Salesiana”, UPS-TESIS 2016
- [26] Z. Kanzari, J. Khediri, W. Zaafrane, M. Jemli, “Comparison of Two Regulators for Photovoltaic Systems: The PID Regulator and Sliding Mode Control,” Proc. 2016 Int. Conf. Electr. Sci. Technol. Maghreb, Cist. 2016, pp. 1–6, 2017.
- [27] N. Sakthi and M. Kowsalya, “Power Quality Improvement Features on Photovoltaic Grid Connected Dual Voltage Source Inverter,” pp. 1744–1748, 2017.
- [28] Y. P. Siwakoti, F. Blaabjerg, “H-Bridge Transformerless Inverter with Common Ground for Single-Phase Solar-Photovoltaic System,” 2017 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., pp. 2610–2614, 2017.
- [29] C Variath, Reshmi, Andersen, Michael, Neis Nielsen, Hyldgard, Anders. (2010). A Review of Module Inverter Topologies Suitable for Photovoltaic Systems. 310 - 316. 10.1109/Ipecon.2010.5697150.
- [30] R. Dufo López, J. L. Bernal Agustín, Curso Interactivo de Energía Solar Fotovoltaica. Prensas Universitarias de Zaragoza, 2005.
- [31] CONELEC, “Plan Maestro de Electrificación 2009-2020,” 2009.

- [32] I. Daut, H. S. Syafruddin, R. Ali, M. Samila, H. Haziah, “The Effects of Harmonic Components on Transformer Losses of Sinusoidal Source Supplying Non-Linear Loads,” *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 12, pp. 2131–2133, 2009
- [33] D. M. Said, K. M. Nor, “Effects of Harmonics on Distribution Systems,” no. January, pp. 69–84, 2010.
- [34] H. Attia, M. Fahmy, “Harmonic Distortion Effects and Mitigation in Distribution Systems,” *J. Am. Sci.*, vol. 6, no. 10, pp. 173–183, 2010.
- [35] H. Thomas, K. R. Chakravarthi, A. Mahmound, “The Effects of Power Sysem Harmonicas on Power System Equipment and Loads,” no. September, p. 2570, 2016
- [36] Solar Fabrik, “SOLAR Fabrik M Serie.” [Online]. Available: [https://www.solar-fabrik.de/wp-content/downloads/m-serie/M-Series\\_300-330W\\_HC\\_web\\_en.pdf](https://www.solar-fabrik.de/wp-content/downloads/m-serie/M-Series_300-330W_HC_web_en.pdf) [Accessed: 21-May-2019].
- [37] Solar Fabrik, “SOLAR Fabrik P Serie.” [Online]. Available: [https://www.solar-fabrik.de/wp-content/downloads/p-serie/P-Series\\_270-295W\\_HC\\_web\\_en.pdf](https://www.solar-fabrik.de/wp-content/downloads/p-serie/P-Series_270-295W_HC_web_en.pdf) [Accessed: 21-May-2019].
- [38] SMA Solar Technology, “Sunny Boy Serie 7.0-US.” [Online]. Available: <https://www.renvue.com/Solar/SMA-Residential/SMA-Sunny-Boy-SB-7-0-US-7kW-String-Inverter-w-SPS-3-MPPT> [Accessed: 24-May-2019].
- [39] Mennekes Emobility, “Amtron Start 3.7 C1.” [Online]. Available: <https://www.mennekes.org/press/news-detail-view/amtronr-compact-the-new-mennekes-charging-solution-for-your-home/#> [Accessed: 24-May-2019].
- [40] N. M. I. Vaisala, “Vaisala HydroMet™ System MAWS301 Technical Data.” [Online]. Available: [https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/MAWS301\\_datasheet\\_B210396ES-B\\_LowRes.pdf](https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/MAWS301_datasheet_B210396ES-B_LowRes.pdf) [Accessed: 24-May-2019].
- [41] Vaisala, Vaisala AWS330 User Manual. Helsinki: Vaisala Oyj, 2011. [Online]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/656970/Vaisala-Aws330.html?page=247> [Accessed: 26-May-2019].
- [42] Vaisala, “Vaisala Data Logger QML201C Technical Data.” [Online]. Available: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/QML201C-Datasheet-B210718EN.pdf> [Accessed: 26-May-2019].
- [43] Vaisala, “Módulo de Presión Vaisala BAROCAP.” [Online]. Available: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/QML201C-Datasheet-B210718EN.pdf> [Accessed: 27-May-2019].
- [44] Sensovant, “First Class Pyranometer SR11,” pp. 2–3, 2009. [Online]. Available: <https://www.hukseflux.com/products/solar-radiation-sensors/pyranometers/sr11-pyranometer> [Accessed: 27-May-2019].
- [45] Vaisala, “Sonda HMP155 de Humedad.” [Online]. Available: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HMP155-Datasheet-B210752ES-E-LoRes.pdf> [Accessed: 27-May-2019].
- [46] Vaisala, “Regulador QBR101C.” [Online]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/656970/Vaisala-Aws330.html?page=253> [Accessed: 27-May-2019].

- [47] SMA Solar Technology and Sma AG, “Installation Manual Sunny Boy Serie 7.0-US.” [Online]. Available: <https://www.renvue.com/Solar/SMA-Installation/SMA-Sunny-Boy-SB-7-0-US-7kW-String-Inverter-w-SPS-3-MPPT> [Accessed: 28-May-2019].
- [48] D. Toledo O., J. Jaramillo V., F. Santillan S., L. González M., “Diseño de un Inversor Monofásico con Topología H5,” pp. 119–126, 2014.

## ANEXOS

### I. Anexo 1

A continuación, se presentan las tablas de los datos obtenidos en la estación meteorológica, así como las diferentes figuras con respecto a las mediciones y simulaciones realizadas.

Tabla A1. Datos obtenidos de la estación meteorológica. Fuente: Autores

Día	Hora	DC (V)	Presión Atmosférica (hPa)	Humedad Relativa (%)	Radiación Solar Difusa	Radiación Solar Global	Temperatura Ambiente (°C)
10/06/2019	12:00:00 AM	13,2	754,6	79	2	2	14,7
10/06/2019	1:00:00 AM	13,3	755,1	77	0	0	14,6
10/06/2019	2:00:00 AM	13,2	755,6	79	0	0	14,2
10/06/2019	3:00:00 AM	13,2	755,9	79	0	0	14,0
10/06/2019	4:00:00 AM	13,2	756,1	80	0	0	13,9
10/06/2019	5:00:00 AM	13,2	755,9	79	0	0	13,8
10/06/2019	6:00:00 AM	13,2	755,7	84	0	0	13,2
10/06/2019	7:00:00 AM	13,1	755,0	84	0	0	12,8
10/06/2019	8:00:00 AM	13,1	754,6	83	0	0	12,8
10/06/2019	9:00:00 AM	13,1	754,4	85	0	0	12,6
10/06/2019	10:00:00 AM	13,1	754,4	97	0	0	12,2
10/06/2019	11:00:00 AM	13,0	754,5	100	0	0	11,9
10/06/2019	12:00:00 PM	13,0	754,8	100	9	10	11,9
10/06/2019	1:00:00 PM	13,3	755,4	100	53	58	12,3
10/06/2019	2:00:00 PM	14,0	756,1	100	96	105	12,2
10/06/2019	3:00:00 PM	14,3	756,2	100	265	303	13,4
10/06/2019	4:00:00 PM	15,0	756,0	97	205	223	14,2
10/06/2019	5:00:00 PM	14,9	755,6	87	298	477	15,6
10/06/2019	6:00:00 PM	14,9	755,0	69	294	359	16,6
10/06/2019	7:00:00 PM	14,4	754,3	60	195	227	17,5
10/06/2019	8:00:00 PM	14,7	753,6	58	290	323	17,7
10/06/2019	9:00:00 PM	14,3	753,2	58	141	154	17,5
10/06/2019	10:00:00 PM	14,2	753,0	60	123	136	17,1
10/06/2019	11:00:00 PM	13,4	753,2	64	23	25	16,5
11/06/2019	12:00:00 AM	13,3	753,7	67	0	0	15,7
11/06/2019	1:00:00 AM	13,3	754,4	67	0	0	15,5
11/06/2019	2:00:00 AM	13,2	754,8	70	0	0	15,1
11/06/2019	3:00:00 AM	13,2	755,2	73	0	0	14,7
11/06/2019	4:00:00 AM	13,2	755,4	76	0	0	14,4
11/06/2019	5:00:00 AM	13,2	755,5	77	0	0	14,2
11/06/2019	6:00:00 AM	13,2	755,4	79	0	0	13,9



11/06/2019	7:00:00 AM	13,1	755,0	82	0	0	13,7
11/06/2019	8:00:00 AM	13,1	754,6	84	0	0	13,5
11/06/2019	9:00:00 AM	13,1	754,5	97	0	0	12,5
11/06/2019	10:00:00 AM	13,0	754,6	100	0	0	12,0
11/06/2019	11:00:00 AM	13,0	754,8	100	0	0	12,0
11/06/2019	12:00:00 PM	12,9	755,1	100	3	4	12,2
11/06/2019	1:00:00 PM	13,1	755,6	100	34	37	12,5
11/06/2019	2:00:00 PM	14,0	756,0	100	154	170	13,5
11/06/2019	3:00:00 PM	14,3	756,2	83	243	270	15,0
11/06/2019	4:00:00 PM	14,6	755,9	62	277	319	16,5
11/06/2019	5:00:00 PM	14,7	755,4	61	235	267	16,9
11/06/2019	6:00:00 PM	14,6	754,9	60	258	286	17,5
11/06/2019	7:00:00 PM	14,9	754,1	59	223	249	17,6
11/06/2019	8:00:00 PM	14,5	753,2	66	147	163	17,1
11/06/2019	9:00:00 PM	14,5	752,7	65	247	269	17,8
11/06/2019	10:00:00 PM	14,4	752,6	57	197	216	18,5
11/06/2019	11:00:00 PM	13,7	752,9	59	49	52	17,7
12/06/2019	12:00:00 AM	13,3	753,6	73	2	2	15,8
12/06/2019	1:00:00 AM	13,3	754,3	90	0	0	14,3
12/06/2019	2:00:00 AM	13,2	754,9	88	0	0	14,0
12/06/2019	3:00:00 AM	13,2	755,4	95	0	0	13,5
12/06/2019	4:00:00 AM	13,2	755,6	96	0	0	13,4
12/06/2019	5:00:00 AM	13,2	755,6	99	0	0	12,9
12/06/2019	6:00:00 AM	13,2	755,3	100	0	0	12,5
12/06/2019	7:00:00 AM	13,1	755,1	100	0	0	12,0
12/06/2019	8:00:00 AM	13,1	754,7	100	0	0	11,8
12/06/2019	9:00:00 AM	13,1	754,6	100	0	0	11,9
12/06/2019	10:00:00 AM	13,1	754,5	100	0	0	11,9
12/06/2019	11:00:00 AM	13,0	754,7	100	0	0	11,8
12/06/2019	12:00:00 PM	13,0	755,2	100	11	11	12,1
12/06/2019	1:00:00 PM	13,5	755,8	100	50	54	12,5
12/06/2019	2:00:00 PM	14,2	756,3	96	203	240	14,2
12/06/2019	3:00:00 PM	15,0	756,7	72	287	330	16,1
12/06/2019	4:00:00 PM	14,9	756,5	63	332	400	17,0
12/06/2019	5:00:00 PM	14,9	756,0	53	312	472	18,3
12/06/2019	6:00:00 PM	14,9	755,4	52	374	416	18,4
12/06/2019	7:00:00 PM	14,9	754,9	52	362	394	18,6
12/06/2019	8:00:00 PM	14,8	754,1	50	581	638	19,3
12/06/2019	9:00:00 PM	14,8	753,4	49	569	597	19,5
12/06/2019	10:00:00 PM	14,7	753,2	49	282	305	19,3
12/06/2019	11:00:00 PM	13,8	753,4	52	82	88	18,5
13/06/2019	12:00:00 AM	13,3	753,7	57	3	3	17,4
13/06/2019	1:00:00 AM	13,3	754,4	62	0	0	16,6

13/06/2019	2:00:00 AM	13,3	755,2	63	0	0	16,1
13/06/2019	3:00:00 AM	13,2	755,7	65	0	0	15,8
13/06/2019	4:00:00 AM	13,2	755,9	67	0	0	15,5
13/06/2019	5:00:00 AM	13,2	755,8	71	0	0	14,9
13/06/2019	6:00:00 AM	13,2	755,4	80	0	0	13,6
13/06/2019	7:00:00 AM	13,1	755,0	82	0	0	13,0
13/06/2019	8:00:00 AM	13,1	754,7	93	0	0	11,9
13/06/2019	9:00:00 AM	13,1	754,5	98	0	0	11,4
13/06/2019	10:00:00 AM	13,1	754,6	100	0	0	10,9
13/06/2019	11:00:00 AM	13,0	754,8	100	0	0	10,4
13/06/2019	12:00:00 PM	13,2	755,3	100	9	16	10,3
13/06/2019	1:00:00 PM	14,0	756,0	88	97	151	12,7
13/06/2019	2:00:00 PM	14,9	756,7	74	141	334	14,8
13/06/2019	3:00:00 PM	14,8	756,8	62	180	621	17,5
13/06/2019	4:00:00 PM	14,7	756,6	53	199	835	19,0
13/06/2019	5:00:00 PM	14,7	756,0	51	197	849	19,8
13/06/2019	6:00:00 PM	14,8	755,4	48	451	659	20,0
13/06/2019	7:00:00 PM	14,5	754,8	50	529	559	19,7
13/06/2019	8:00:00 PM	14,5	754,0	50	417	456	19,5
13/06/2019	9:00:00 PM	14,1	753,4	50	279	302	19,4
13/06/2019	10:00:00 PM	14,5	753,2	50	279	294	19,4
13/06/2019	11:00:00 PM	13,6	753,4	51	58	59	18,7
14/06/2019	12:00:00 AM	13,3	753,9	58	2	2	17,2
14/06/2019	1:00:00 AM	13,3	754,8	60	0	0	16,4
14/06/2019	2:00:00 AM	13,2	755,5	62	0	0	16,2
14/06/2019	3:00:00 AM	13,2	756,0	66	0	0	15,8
14/06/2019	4:00:00 AM	13,2	756,3	69	0	0	15,3
14/06/2019	5:00:00 AM	13,2	756,2	74	0	0	14,8
14/06/2019	6:00:00 AM	13,2	756,2	90	0	0	13,5
14/06/2019	7:00:00 AM	13,1	755,8	100	0	0	12,9
14/06/2019	8:00:00 AM	13,1	755,4	100	0	0	12,5
14/06/2019	9:00:00 AM	13,1	755,1	100	0	0	12,2
14/06/2019	10:00:00 AM	13,0	755,1	100	0	0	12,1
14/06/2019	11:00:00 AM	13,0	755,4	100	0	0	12,0
14/06/2019	12:00:00 PM	13,0	755,9	100	6	7	12,0
14/06/2019	1:00:00 PM	13,5	756,4	100	54	58	12,4
14/06/2019	2:00:00 PM	14,4	756,8	99	211	247	13,7
14/06/2019	3:00:00 PM	14,9	756,9	79	310	422	15,8
14/06/2019	4:00:00 PM	14,9	756,6	65	333	415	17,1
14/06/2019	5:00:00 PM	14,8	755,9	58	483	771	18,8
14/06/2019	6:00:00 PM	14,4	755,1	56	443	646	19,5
14/06/2019	7:00:00 PM	14,6	754,8	73	265	288	17,5
14/06/2019	8:00:00 PM	14,4	754,1	77	186	199	16,8

14/06/2019	9:00:00 PM	14,2	753,6	73	227	247	17,2
14/06/2019	10:00:00 PM	14,2	753,3	74	84	90	16,8
14/06/2019	11:00:00 PM	13,7	753,4	66	58	62	17,1
15/06/2019	12:00:00 AM	13,3	754,0	66	2	2	16,6
15/06/2019	1:00:00 AM	13,3	754,5	68	0	0	15,9
15/06/2019	2:00:00 AM	13,2	755,0	71	0	0	15,3
15/06/2019	3:00:00 AM	13,2	755,6	77	0	0	14,3
15/06/2019	4:00:00 AM	13,2	755,9	83	0	0	13,5
15/06/2019	5:00:00 AM	13,2	755,8	83	0	0	13,8
15/06/2019	6:00:00 AM	13,2	755,6	87	0	0	13,5
15/06/2019	7:00:00 AM	13,1	755,1	97	0	0	12,9
15/06/2019	8:00:00 AM	13,1	754,7	100	0	0	12,5
15/06/2019	9:00:00 AM	13,1	754,5	100	0	0	12,3
15/06/2019	10:00:00 AM	13,1	754,6	100	0	0	11,5
15/06/2019	11:00:00 AM	13,0	755,1	100	0	0	11,0
15/06/2019	12:00:00 PM	13,1	755,5	100	13	14	11,3
15/06/2019	1:00:00 PM	13,5	756,1	100	60	65	11,5
15/06/2019	2:00:00 PM	14,4	756,5	100	167	184	12,7
15/06/2019	3:00:00 PM	15,0	756,7	86	312	349	14,7
15/06/2019	4:00:00 PM	14,9	756,2	65	351	534	16,9
15/06/2019	5:00:00 PM	14,8	755,4	50	165	870	19,5
15/06/2019	6:00:00 PM	14,8	754,3	46	540	972	20,9
15/06/2019	7:00:00 PM	14,7	753,2	43	548	352	21,7
15/06/2019	8:00:00 PM	14,8	752,1	42	538	554	22,0
15/06/2019	9:00:00 PM	14,8	751,5	41	413	435	22,1
15/06/2019	10:00:00 PM	14,1	751,6	51	150	166	20,6
15/06/2019	11:00:00 PM	13,5	752,3	66	41	45	17,6
16/06/2019	12:00:00 AM	13,3	752,9	69	2	2	16,7
16/06/2019	1:00:00 AM	13,3	753,7	68	0	0	16,3
16/06/2019	2:00:00 AM	13,2	754,4	73	0	0	15,7
16/06/2019	3:00:00 AM	13,2	755,1	98	0	0	13,9
16/06/2019	4:00:00 AM	13,2	755,3	98	0	0	14,0
16/06/2019	5:00:00 AM	13,2	755,3	93	0	0	14,1
16/06/2019	6:00:00 AM	13,2	755,0	97	0	0	13,9
16/06/2019	7:00:00 AM	13,1	754,7	98	0	0	13,9
16/06/2019	8:00:00 AM	13,1	754,3	98	0	0	14,0
16/06/2019	9:00:00 AM	13,1	754,1	93	0	0	13,9
16/06/2019	10:00:00 AM	13,0	754,2	99	0	0	13,4
16/06/2019	11:00:00 AM	13,0	754,6	100	0	0	13,1
16/06/2019	12:00:00 PM	13,0	755,0	99	10	11	12,7
16/06/2019	1:00:00 PM	13,8	755,7	100	89	96	13,4
16/06/2019	2:00:00 PM	14,7	756,3	96	178	222	14,7
16/06/2019	3:00:00 PM	14,9	756,2	77	242	322	16,0

16/06/2019	4:00:00 PM	14,8	755,9	58	417	696	18,6
16/06/2019	5:00:00 PM	14,8	755,4	55	393	592	19,3
16/06/2019	6:00:00 PM	14,8	755,0	56	416	486	19,3
16/06/2019	7:00:00 PM	14,8	754,2	54	335	346	19,6
16/06/2019	8:00:00 PM	14,8	753,3	49	538	569	20,7
16/06/2019	9:00:00 PM	14,3	752,6	49	293	316	20,7
16/06/2019	10:00:00 PM	14,2	752,8	53	172	193	19,1
16/06/2019	11:00:00 PM	13,8	753,4	58	58	65	17,9
17/06/2019	12:00:00 AM	13,3	754,1	62	3	4	17,1

## II. Anexo 2

A continuación, se presentan las tablas de los datos obtenidos para los inversores 198 y 199 respectivamente con las mediciones de continua y alterna en el laboratorio de energía fotovoltaica.

Tabla A2. Mediciones de C.C. y C.A. del inversor 198 conectado a los paneles policristalinos.  
Fuente: Autores

MEDICIONES C.C.						MEDICIONES C.A.	
DIA	HORAS	TENSION (A)	TENSION (B)	CORRIENTE (A)	CORRIENTE (B)	POTENCIA W	FRECUENCIA RED Hz
		V	V	A	A		
10/06/2019	7:00:00	335,48	333,49	0,588	0,593	371,00	59,97
10/06/2019	8:00:00	329,20	328,42	0,460	0,462	279,00	60,06
10/06/2019	9:00:00	346,40	344,16	1,511	1,518	1.019,00	59,97
10/06/2019	10:00:00	337,76	336,39	1,798	1,802	1.183,00	60,00
10/06/2019	11:00:00	337,59	342,03	2,264	2,228	1.488,00	60,04
10/06/2019	12:00:00	335,98	332,03	2,968	2,986	1.948,00	60,02
10/06/2019	13:00:00	336,32	333,85	3,163	3,182	2.084,00	60,01
10/06/2019	14:00:00	345,05	345,22	1,194	1,201	807,00	60,00
10/06/2019	15:00:00	349,06	344,80	2,436	2,477	1.667,00	60,00
10/06/2019	16:00:00	340,21	340,65	0,829	0,831	546,00	59,96
10/06/2019	17:00:00	335,60	333,89	0,467	0,474	294,00	60,04
10/06/2019	18:00:00	310,18	310,37	0,000	0,000	0,00	60,04
11/06/2019	7:00:00	307,18	309,76	0,154	0,157	73,00	59,95
11/06/2019	8:00:00	344,65	343,70	1,032	1,038	692,00	59,97
11/06/2019	9:00:00	341,39	339,07	1,662	1,674	1.109,00	60,02
11/06/2019	10:00:00	354,90	350,73	1,828	1,883	1.276,00	59,95
11/06/2019	11:00:00	347,50	352,04	1,955	1,940	1.333,00	60,00
11/06/2019	12:00:00	351,28	347,23	2,722	2,772	1.880,00	60,03

11/06/2019	13:00:00	342,89	341,92	1,178	1,187	790,00	60,02
11/06/2019	14:00:00	345,68	341,48	2,383	2,420	1.616,00	60,02
11/06/2019	15:00:00	348,49	343,06	3,096	3,126	2.103,00	60,01
11/06/2019	16:00:00	343,99	349,85	1,639	1,551	1.076,00	59,97
11/06/2019	17:00:00	331,93	330,19	0,677	0,681	425,00	60,02
11/06/2019	18:00:00	303,89	302,24	0,090	0,096	35,00	60,05
12/06/2019	7:00:00	320,14	322,29	0,243	0,245	136,00	59,89
12/06/2019	8:00:00	342,37	342,85	0,983	0,980	653,00	59,98
12/06/2019	9:00:00	342,53	341,94	2,126	2,124	1.424,00	59,98
12/06/2019	10:00:00	343,78	342,85	4,581	4,617	3.043,00	59,99
12/06/2019	11:00:00	336,28	344,42	6,352	6,220	4.198,00	59,97
12/06/2019	12:00:00	344,84	345,01	2,356	2,369	1.599,00	60,03
12/06/2019	13:00:00	345,18	341,88	2,852	2,898	1.934,00	60,04
12/06/2019	14:00:00	335,77	328,40	4,283	4,364	2.792,00	60,04
12/06/2019	15:00:00	336,62	336,11	5,829	5,822	3.832,00	59,97
12/06/2019	16:00:00	337,86	335,05	2,613	2,626	1.726,00	60,02
12/06/2019	17:00:00	347,85	348,99	1,492	1,516	823,00	60,01
12/06/2019	18:00:00	307,96	301,05	0,124	0,134	57,00	60,04
13/06/2019	7:00:00	355,53	352,95	0,806	0,825	549,00	60,04
13/06/2019	8:00:00	354,83	351,35	2,748	2,797	1.916,00	59,98
13/06/2019	9:00:00	333,00	334,95	4,641	4,604	3.024,00	60,04
13/06/2019	10:00:00	322,04	314,71	3,929	3,962	2.452,00	60,06
13/06/2019	11:00:00	326,69	323,77	8,207	8,212	5.184,00	59,98
13/06/2019	12:00:00	339,45	334,40	2,777	2,832	1.847,00	60,00
13/06/2019	13:00:00	325,08	329,05	3,271	3,253	2.092,00	59,96
13/06/2019	14:00:00	345,85	344,56	2,647	2,681	1.802,00	60,01
13/06/2019	15:00:00	338,29	338,82	7,284	7,249	4.807,00	60,00
13/06/2019	16:00:00	338,44	338,73	0,736	0,746	482,00	59,96
13/06/2019	17:00:00	307,39	322,63	0,463	0,458	270,00	60,01
13/06/2019	18:00:00	285,11	293,19	0,073	0,083	24,00	60,02
14/06/2019	7:00:00	320,09	322,69	0,211	0,213	115,00	60,07
14/06/2019	8:00:00	349,59	347,23	1,142	1,160	782,00	59,99
14/06/2019	9:00:00	342,01	345,01	2,590	2,588	1.745,00	59,96
14/06/2019	10:00:00	329,20	329,07	3,832	3,839	2.478,00	59,98
14/06/2019	11:00:00	344,67	340,15	1,877	1,916	1.268,00	59,94
14/06/2019	12:00:00	320,73	321,74	9,987	9,778	6.147,00	60,02
14/06/2019	13:00:00	350,23	347,16	1,431	1,454	984,00	59,97
14/06/2019	14:00:00	340,82	338,88	0,899	0,912	594,00	59,95
14/06/2019	15:00:00	327,70	328,63	0,881	0,889	562,00	60,00
14/06/2019	16:00:00	326,31	326,73	0,726	0,727	454,00	60,00
14/06/2019	17:00:00	329,98	330,26	0,981	0,980	627,00	60,07
14/06/2019	18:00:00	275,11	279,42	0,067	0,074	19,00	60,00
15/06/2019	7:00:00	328,67	331,74	0,425	0,422	258,00	59,96

15/06/2019	8:00:00	337,36	332,43	0,748	0,759	482,00	59,98
15/06/2019	9:00:00	340,68	339,32	3,095	3,100	2.059,00	60,01
15/06/2019	10:00:00	328,74	334,38	3,703	3,622	2.381,00	59,99
15/06/2019	11:00:00	315,00	309,76	7,570	7,607	4.606,00	60,01
15/06/2019	12:00:00	319,71	307,99	8,710	8,929	5.362,00	60,02
15/06/2019	13:00:00	329,83	303,02	4,093	4,450	2.442,00	60,01
15/06/2019	14:00:00	321,04	316,33	7,477	7,440	4.668,00	59,96
15/06/2019	15:00:00	318,23	317,26	6,025	5,981	3.715,00	59,97
15/06/2019	16:00:00	329,01	325,33	2,495	2,508	1.603,00	60,05
15/06/2019	17:00:00	324,87	325,06	0,899	0,896	568,00	59,98
15/06/2019	18:00:00	278,02	346,85	0,077	0,000	54,00	60,08
16/06/2019	7:00:00	320,94	319,80	0,304	0,310	175,00	60,02
16/06/2019	8:00:00	339,43	338,94	1,487	1,487	982,00	60,01
16/06/2019	9:00:00	341,88	338,90	2,697	2,723	1.801,00	59,98
16/06/2019	10:00:00	319,54	319,92	8,234	8,156	5.089,00	59,99
16/06/2019	11:00:00	329,77	328,31	3,476	3,470	2.234,00	60,02
16/06/2019	12:00:00	336,45	333,87	2,961	2,985	1.955,00	59,99
16/06/2019	13:00:00	333,41	333,26	3,532	3,515	2.301,00	60,01
16/06/2019	14:00:00	324,38	335,03	5,268	5,163	3.358,00	60,06
16/06/2019	15:00:00	324,64	323,33	5,950	5,940	3.762,00	59,98
16/06/2019	16:00:00	342,26	353,90	2,750	2,639	1.835,00	59,97
16/06/2019	17:00:00	334,40	330,64	0,644	0,655	411,00	60,01
16/06/2019	18:00:00	312,23	306,23	0,147	0,158	72,00	60,04

Tabla A3. Mediciones de C.C. y C.A. del inversor 199 conectado a los paneles monocristalinos.

Fuente: Autores

MEDICIONES C.C.						MEDICIONES C.A.	
DIA	HORAS	TENSION (A)	TENSION (B)	CORRIENTE (A)	CORRIENTE (B)	POTENCIA (W)	FRECUENCIA RED (Hz)
		V	V	A	A		
10/06/2019	7:00:00	350,35	352,09	0,607	0,604	399,00	59,96
10/06/2019	8:00:00	343,99	349,25	0,470	0,461	300,00	60,04
10/06/2019	9:00:00	367,03	364,68	1,516	1,529	1.087,00	59,97
10/06/2019	10:00:00	353,06	351,81	1,849	1,862	1.282,00	60,00
10/06/2019	11:00:00	355,26	355,15	2,336	2,329	1.625,00	60,04
10/06/2019	12:00:00	350,29	348,94	3,063	3,066	2.105,00	60,06
10/06/2019	13:00:00	352,99	351,47	3,226	3,262	2.248,00	60,02
10/06/2019	14:00:00	359,63	359,25	1,227	1,239	869,00	60,01
10/06/2019	15:00:00	366,18	355,17	2,469	2,566	1.799,00	60,00
10/06/2019	16:00:00	358,66	348,68	0,841	0,873	585,00	59,96
10/06/2019	17:00:00	348,26	345,75	0,482	0,501	316,00	60,04

10/06/2019	18:00:00	324,21	323,79	0,000	0,000	0,00	60,04
11/06/2019	7:00:00	323,66	318,76	0,155	0,159	79,00	59,95
11/06/2019	8:00:00	360,52	363,81	1,067	1,048	738,00	59,97
11/06/2019	9:00:00	352,11	352,23	1,737	1,739	1.198,00	59,99
11/06/2019	10:00:00	360,90	367,17	1,982	1,936	1.396,00	59,93
11/06/2019	11:00:00	366,41	365,93	2,018	2,022	1.455,00	60,01
11/06/2019	12:00:00	365,59	363,60	2,836	2,869	2.046,00	60,01
11/06/2019	13:00:00	354,24	357,01	1,227	1,225	852,00	60,03
11/06/2019	14:00:00	360,75	358,38	2,461	2,493	1.749,00	60,02
11/06/2019	15:00:00	364,79	364,41	3,051	2,959	2.151,00	60,01
11/06/2019	16:00:00	358,51	340,46	1,591	1,668	1.116,00	59,98
11/06/2019	17:00:00	351,11	336,06	0,687	0,758	397,00	60,02
11/06/2019	18:00:00	311,60	304,18	0,086	0,098	40,00	60,05
12/06/2019	7:00:00	337,67	338,48	0,258	0,259	155,00	60,01
12/06/2019	8:00:00	355,61	359,36	0,766	0,756	520,00	59,96
12/06/2019	9:00:00	363,16	363,14	1,462	1,458	1.038,00	60,16
12/06/2019	10:00:00	354,52	356,02	5,038	5,010	3.508,00	59,99
12/06/2019	11:00:00	355,04	353,73	6,425	6,457	4.478,00	59,96
12/06/2019	12:00:00	359,14	358,04	2,444	2,462	1.729,00	60,03
12/06/2019	13:00:00	357,28	355,49	2,978	3,001	2.092,00	60,04
12/06/2019	14:00:00	342,96	346,87	4,460	4,401	3.006,00	60,02
12/06/2019	15:00:00	342,30	319,50	6,086	5,900	3.886,00	59,96
12/06/2019	16:00:00	354,09	353,78	2,589	2,523	1.777,00	60,03
12/06/2019	17:00:00	354,35	344,90	1,505	1,525	1.014,00	59,99
12/06/2019	18:00:00	317,98	318,40	0,117	0,132	64,00	60,04
13/06/2019	7:00:00	330,53	333,43	0,425	0,422	259,00	60,00
13/06/2019	8:00:00	329,43	330,76	0,685	0,682	434,00	59,94
13/06/2019	9:00:00	340,46	339,11	2,367	2,367	1.576,00	60,00
13/06/2019	10:00:00	339,28	337,63	1,227	1,233	803,00	60,00
13/06/2019	11:00:00	335,90	337,02	8,427	8,376	5.513,00	59,98
13/06/2019	12:00:00	354,71	347,31	2,846	2,934	1.991,00	60,00
13/06/2019	13:00:00	337,72	337,53	3,430	3,441	2.265,00	59,96
13/06/2019	14:00:00	358,38	360,58	2,759	2,751	1.944,00	60,01
13/06/2019	15:00:00	349,13	321,26	7,520	7,411	4.901,00	60,00
13/06/2019	16:00:00	353,61	353,10	0,760	0,772	524,00	59,95
13/06/2019	17:00:00	332,05	331,00	0,467	0,482	298,00	60,01
13/06/2019	18:00:00	313,56	308,47	0,064	0,078	28,00	60,02
14/06/2019	7:00:00	335,20	335,41	0,221	0,216	126,00	60,06
14/06/2019	8:00:00	366,07	361,79	1,190	1,199	842,00	59,98
14/06/2019	9:00:00	358,76	358,38	2,689	2,690	1.892,00	59,96
14/06/2019	10:00:00	340,80	347,12	3,968	3,882	2.650,00	60,00
14/06/2019	11:00:00	356,29	357,56	1,969	1,959	1.374,00	59,94
14/06/2019	12:00:00	334,61	334,40	9,981	9,992	6.493,00	60,02

14/06/2019	13:00:00	363,60	362,48	1,492	1,495	1.059,00	59,97
14/06/2019	14:00:00	353,57	351,81	0,941	0,946	643,00	59,95
14/06/2019	15:00:00	351,77	348,01	0,895	0,910	606,00	60,00
14/06/2019	16:00:00	340,32	344,39	0,748	0,743	492,00	60,00
14/06/2019	17:00:00	346,76	345,96	1,015	1,018	683,00	60,06
14/06/2019	18:00:00	303,86	301,03	0,059	0,072	21,00	60,00
15/06/2019	7:00:00	348,05	343,30	0,429	0,435	280,00	59,96
15/06/2019	8:00:00	350,54	349,59	0,770	0,765	517,00	59,97
15/06/2019	9:00:00	353,18	361,09	3,217	3,122	2.231,00	60,01
15/06/2019	10:00:00	346,95	346,55	3,784	3,775	2.575,00	59,98
15/06/2019	11:00:00	326,19	328,76	7,811	7,681	4.937,00	60,01
15/06/2019	12:00:00	323,94	325,19	9,151	9,094	5.758,00	60,02
15/06/2019	13:00:00	318,64	327,19	5,754	5,724	3.638,00	60,01
15/06/2019	14:00:00	355,93	346,87	7,180	7,501	5.045,00	59,97
15/06/2019	15:00:00	332,56	300,31	6,141	6,121	3.795,00	59,97
15/06/2019	16:00:00	349,82	350,46	2,457	2,392	1.673,00	60,04
15/06/2019	17:00:00	345,18	342,51	0,907	0,917	610,00	59,97
15/06/2019	18:00:00	292,48	280,84	0,067	0,078	24,00	60,08
16/06/2019	7:00:00	336,91	335,10	0,309	0,310	190,00	60,01
16/06/2019	8:00:00	356,59	354,22	1,531	1,534	1.067,00	60,01
16/06/2019	9:00:00	354,73	350,40	2,787	2,830	1.939,00	59,98
16/06/2019	10:00:00	331,15	333,81	8,483	8,382	5.462,00	59,99
16/06/2019	11:00:00	340,59	342,26	3,604	3,574	2.406,00	60,02
16/06/2019	12:00:00	344,71	346,87	3,117	3,100	2.113,00	59,98
16/06/2019	13:00:00	350,25	349,99	3,587	3,579	2.468,00	60,02
16/06/2019	14:00:00	342,64	340,12	5,387	5,393	3.616,00	60,06
16/06/2019	15:00:00	336,53	313,18	6,109	5,846	3.805,00	59,98
16/06/2019	16:00:00	380,21	368,40	2,064	2,145	1.539,00	59,98
16/06/2019	17:00:00	351,90	350,54	0,648	0,656	443,00	60,02
16/06/2019	18:00:00	319,42	314,22	0,143	0,156	78,00	60,04