



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

#### MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

**Título:**

---

Análisis de los armónicos generados en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales.

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad  
Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

**Autor:**

Barrionuevo Simbaña Alex Paul

**Tutor:**

PhD. Marrero Ramírez Secundino

**LATACUNGA –ECUADOR  
2023**

## **AVAL DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis de los armónicos generados en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales.” presentado por Barrionuevo Simbaña Alex Paul, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

### **CERTIFICO**

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, junio, 12, 2023

  
.....  
PhD. Marreno Ramirez Secundino  
CC.:1757107907

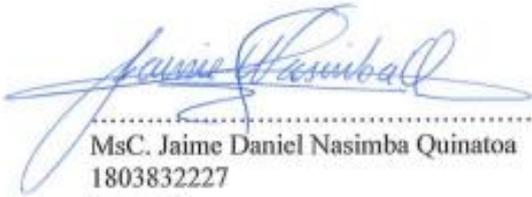
## AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis de los armónicos generados en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, julio, 20, 2023



MsC. Marco Anibal León Segovia  
0502305402  
Presidente del tribunal



MsC. Jaime Daniel Nasimba Quinatoa  
1803832227  
Lector 2



MsC. Carlos Iván Quinatoa Caiza  
0503287864  
Lector 3

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de investigación está dedicado para mi familia, mi madre y hermanos, para mi esposa y mi querido hijo Aaron, los mismos que me han brindado el apoyo necesario e indispensables para lograr cumplir con esta meta tan anhelada.

Alex Paul Barrionuevo Simbaña

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme alcanzar esta meta profesional, a la Universidad y a cada uno de los docentes que, con su gran labor de enseñanza, impartieron sus conocimientos y experiencias para el aprendizaje de sus estudiantes, a mi familia que esta siempre a mi lado apoyándome y animándome para alcanzar los sueños propuestos en mi caminar profesional. A mi esposa e hijo que me han acompañado en este propósito profesional.

Alex Paul Barrionuevo Simbaña

## **RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, junio, 2023



.....  
Ing. Alex Paul Barrionuevo Simbaña  
C.C. 1600561458

## **RENUNCIA DE DERECHOS**

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, junio, 2023

  
.....  
Ing. Alex Paul Barrionuevo Simbaña  
C.C. 1600561458

## **AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Análisis de los armónicos generados en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, julio, 20, 2023

  
.....  
MsC. Marco Anibal León Segovia  
0502305402

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**  
**MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Título:** Análisis de los armónicos generados en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales.

**Autor:** Ing. Alex Paul Barrionuevo Simbaña.

**Tutor:** Secundino Marreno Ramírez, PhD.

**RESUMEN**

La utilización de tecnologías como los sistemas fotovoltaicos permiten generar corriente alterna a partir de corriente continua, este resultado se obtiene a través de un conjunto de equipos eléctricos y electrónicos. Uno de estos equipos es el inversor, el mismo que se encarga de suministrar corriente alterna a la instalación eléctrica. Su topología eléctrica compuesta de elementos electrónicos de conmutación genera distorsiones en la calidad de la energía eléctrica que en conjunto con cargas no lineales pueden provocar daños a diferentes equipos. El presente proyecto se enfoca en el análisis de estas distorsiones conocidas como Armónicos, que mediante la recolección de datos a través del analizador de energía Fluke 435 permite obtener las mediciones de los tres sistemas fotovoltaicos autónomos analizados. Estos armónicos generados deben cumplir con los parámetros establecidos en la regulación ARCERNNR 002/20 y la IEEE 519, normativas que establecen los límites de distorsión en un sistema eléctrico. Los resultados obtenidos de la medición indican la presencia de armónicos en los tres sistemas analizados, siendo los SFV N°2 y N°3 los que presentan mayores irregularidades. Para mitigar estas perturbaciones en la instalación eléctrica, se propone la utilización de filtros pasivos, los mismo que permiten controlar la presencia de estas componentes armónicas. El filtro implementado y simulado en Simulink permite reducir el armónico de orden tres que en inicio presenta un 9.14% de distorsión por encima del límite del 4% establecido en la normativa a un 3.22%., además el THD se reduce de un 21.96% a un 8.04%.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema fotovoltaico; inversor; armónicos; distorsión armónica; filtro; calidad de energía.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD  
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

**Topic:** “Harmonics analysis generated in the inverters from the residential autonomous photovoltaic systems”.

**Author:** Barrionuevo Simbaña Alex Paul  
**Tutor:** Secundino Marreno Ramírez, PhD.

**ABSTRACT**

The use of technologies, such as photovoltaic systems allow to generate alternating current since direct current, this result is got through a electrical and electronic equipment set. One these equipment pieces is the inverter, the same one, what is charged of supplying alternating current to the electrical installation. Its electrical topology composed electronic switching elements generates distortions in the electrical energy quality, that, together with non-linear loads, they can cause damage to different equipment. This project focuses on the analysis these distortions known as Harmonics, which by collecting data, through the Fluke 435 energy analyzer allows getting three autonomous photovoltaic analyzed systems measurements. These generated harmonics must comply with the set parameters into ARCERNNR 002/20 and IEEE 519 regulation, standards, which establish distortion limits in an electrical system. The got results from the measurement indicate the harmonics presence in the three analyzed systems, being SFV No. 2 and No. 3, which presenting the greatest irregularities. For mitigating these disturbances in the electrical installation, it is proposed the passive filters use, the same ones, what allow controlling the presence these harmonic components. The filter implemented and simulated in Simulink allows to reduce the harmonic order three, what initially presents a 9.14% distortion above the 4% limit established in the regulations to 3.22%, further, it is reduced the THD from 21.96% to 8.04%.

**KEYWORDS:** Photovoltaic system, investor, harmonics, harmonic distortion, filter, power quality.

Yo, Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número: 0502666514 Magíster en Lingüística Aplicada en la enseñanza del Idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT ; 1020-2021-2354162: **CERTIFICO** , haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“ANÁLISIS DE LOS ARMÓNICOS GENERADOS EN LOS INVERSORES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS RESIDENCIALES”** de: **Barrionuevo Simbaña Alex Paul**, aspirante a Magíster en Electricidad.Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, Junio del 2023

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC**

**CC: 0502666514**



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

AVAL DEL TUTOR.....	2
AVAL DEL TRIBUNAL.....	3
DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA .....	6
RENUNCIA DE DERECHOS.....	7
AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL.....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT .....	10
INTRODUCCIÓN .....	15
Antecedentes: .....	15
Planteamiento del problema: .....	17
Formulación del problema: .....	17
Objetivo General: .....	17
Objetivos Específicos: .....	18
Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos: .....	18
Justificación:.....	19
Hipótesis:.....	20
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLÓGICA .....	21
1.1    Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.- 21	
1.2    Fundamentación Teórica.....	26
1.3    Fundamentación metodológica .....	40
1.4    Conclusiones Capítulo I.....	43
CAPÍTULO II. PROPUESTA .....	44

2.1	Título del proyecto.....	44
2.2	Objetivo del proyecto.....	44
2.3	Descripción de la propuesta.....	44
2.4	Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados.....	44
2.5	Conclusiones Capítulo II.....	68
CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA .....		69
3.1	Análisis de los resultados.....	69
3.2	Validación técnica -económica de los resultados .....	80
3.3	Evaluación de expertos .....	81
3.4	Conclusiones del capítulo III .....	82
Conclusiones generales .....		82
Recomendaciones .....		83
Referencias bibliográficas.....		83
ANEXOS .....		88

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I	VOLTAJE DEL SISTEMA.....	28
TABLA II	LIMITES MÁXIMOS DE ARMÓNICOS .....	39
TABLA III	LIMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE CORRIENTE (THDi) .....	40
TABLA IV	CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SOLAR.....	45
TABLA V	ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE REGISTRADOS .....	53
TABLA VI	CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SOLAR.....	54
TABLA VII	ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE REGISTRADOS .....	60
TABLA VIII	CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SOLAR .....	61
TABLA IX	ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE REGISTRADOS.....	67
TABLA X	ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE .....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Estructura de un sistema fotovoltaico autónomo.....	27
Fig. 2. Esquema de un convertor DC/DC.....	29
Fig. 3. Esquema de un inversor.....	29
Fig. 4. Inversor onda cuadrada.....	30
Fig. 5. Inversor onda senoidal modificada.....	30
Fig. 6. Inversor onda senoidal pura.....	31
Fig. 7. Inversor monofásico de medio puente.....	31
Fig. 8. Inversor monofásico de puente completo.....	32
Fig. 9. Inversor sin regulador de carga.....	32
Fig. 10. Inversor con regulador de carga.....	33
Fig. 11. Inversor conectado a la red eléctrica.....	33
Fig. 12. Inversor con filtro LC.....	34
Fig. 13. Esquema de un filtro L.....	34
Fig. 14. Esquema de un filtro LC.....	34
Fig. 15. Esquema de un filtro LCL.....	35
Fig. 16. Regulador de carga.....	35
Fig. 17. Panel solar.....	45
Fig. 18. Inversor Phoenix 24/1200.....	46
Fig. 19. Fluke 435-Series II.....	47
Fig. 20. Configuración de conexión.....	47
Fig. 21. Límites de voltaje y armónicos.....	48
Fig. 22. Conexiones.....	48
Fig. 23. Señal de voltaje.....	49
Fig. 24. Niveles de voltaje.....	49
Fig. 25. THDv mínimo, medio y máximo.....	50
Fig. 26. Registro de mediciones del THDv.....	51
Fig. 27. Armónicos individuales de voltaje.....	51
Fig. 28. THDi mínimo, medio y máximo.....	52
Fig. 29. Armónicos individuales de corriente.....	52

Fig. 30. Formas de onda de voltaje y corriente. ....	54
Fig. 31. Arreglo de paneles solares. ....	55
Fig. 32. Inversor Quattro 48V/5000W. ....	55
Fig. 33. Conexiones eléctricas. ....	56
Fig. 34. Señal de voltaje. ....	56
Fig. 35. Niveles de voltaje. ....	57
Fig. 36. THDv mínimo, medio y máximo. ....	58
Fig. 37. Armónicos individuales de voltaje. ....	58
Fig. 38. THDi mínimo, medio y máximo. ....	59
Fig. 39. Armónicos individuales de corriente. ....	59
Fig. 40. Formas de onda de voltaje y corriente. ....	61
Fig. 41. Arreglo de paneles solares. ....	62
Fig. 42. Inversor Zonhjan 24V/500W. ....	62
Fig. 43. Conexiones eléctricas. ....	63
Fig. 44. Señal de voltaje. ....	63
Fig. 45. Niveles de voltaje. ....	64
Fig. 46. THDv mínimo, medio y máximo. ....	65
Fig. 47. Armónicos individuales de voltaje. ....	65
Fig. 48. THDi mínimo, medio y máximo. ....	66
Fig. 49. Armónicos individuales de corriente. ....	66
Fig. 50. Formas de onda de voltaje y corriente. ....	68
Fig. 51. Inversor monofásico simulado en Simulink. ....	69
Fig. 52. Voltaje de salida y THD antes del filtro. ....	70
Fig. 53. Voltaje de salida y THD después del filtro. ....	71
Fig. 54. Conexión de una carga lineal resistiva. ....	71
Fig. 55. Ondas de voltaje y corriente. ....	72
Fig. 56. THD de voltaje. ....	72
Fig. 57. THD de corriente. ....	72
Fig. 58. Conexión de una carga no lineal. ....	73
Fig. 59. Ondas de voltaje y corriente. ....	73
Fig. 60. THD de voltaje. ....	74
Fig. 61. THD de voltaje. ....	74
Fig. 62. Función del filtro. ....	75

Fig. 63. Filtro sintonizado.....	75
Fig. 64. Filtros amortiguadores.....	76
Fig. 65. Filtros amortiguadores.....	76
Fig. 66. Filtros amortiguadores.....	76
Fig. 67. THD sin filtro.....	77
Fig. 68. Parámetros ingresados al filtro.....	79
Fig. 69. THD con el filtro simulado.....	79

## INTRODUCCIÓN

**Antecedentes:** El presente tema se enmarca en la línea específica de investigación de la Universidad Técnica de Cotopaxi correspondiente a la maestría de

Electricidad: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental, en la sub línea Conversión y uso de la energía eléctrica, enfocándose en la eficiencia energética y desarrollo sostenibles, así como en la generación con fuentes convencionales y no convencionales y por último en la sostenibilidad energética y medio ambiente. Se estudia en esta investigación los efectos que producen los armónicos producidos en los inversores presentes en un sistema fotovoltaico autónomo.

La normativa vigente en el país y las nuevas regulaciones emitidas por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), hoy en día llamada Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) , apuntan hacia la implementación de generación distribuida y generación fotovoltaica para autoabastecimientos de consumidores finales.

La presente investigación es pertinente y se apoya en la regulación Nro. ARCONEL-003/18, que en su objetivo establece las condiciones para el desarrollo, implementación y participación de consumidores que cuenten con sistemas de micro generación fotovoltaica de hasta 100KW de capacidad instalada.

La mencionada regulación en su alcance indica las condiciones técnicas para la instalación de estos sistemas fotovoltaicos, condiciones para medición, la operación de sincronismo con la red de distribución y el tratamiento comercial de la energía producida.

La regulación ARCERNNR-005/21, que en su objetivo establece las condiciones técnicas, operativas y comerciales para la participación de autogeneradores y cogeneradores en el sector eléctrico ecuatoriano, conociéndose como autogenerador a la persona jurídica capaz de producir energía eléctrica y cuya producción este enfocada en el consumo propio y los excedentes de energía puedan ser puestos a disposición de la red de distribución.

En la especificación CFE G0100-04 del país de México en cuyo objetivo se definen los requisitos para el diseño, instalación, autorización y uso de sistemas

fotovoltaicos conectados a la red eléctrica y además de garantizar la calidad de energía en la red.

**Planteamiento del problema:** El desarrollo de nuevas tecnologías y el aprovechamiento de recursos renovables presentes en nuestro medio ha conllevado a la implementación y utilización de Sistemas Fotovoltaicos (SFV), los mismos que aprovechan de la incidencia de la radiación solar para generar energía eléctrica.

El uso de sistemas fotovoltaicos a través del tiempo se ha ido incrementando, hoy en día es posible disponer de estos equipos en sectores alejados donde no llega el suministro eléctrico. En el Ecuador la población rural se encuentra asentada en comunidades de difícil acceso, dando lugar a la problemática de no contar con un continuo suministro de energía eléctrica, por tal razón dichos sectores han optado por la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales de pequeñas potencias.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos al poseer una estructura compuesta por diferentes elementos electrónicos, siendo el inversor el encargado de convertir la corriente continua en alterna, y que su funcionamiento genera la aparición de armónicos, los mismos que afectan la calidad de las ondas de tensión y corriente presentes en un sistema eléctrico y a su vez provocando un daño considerable en los equipos si no se dispone de un adecuado control de esta distorsión armónica.

**Formulación del problema:** Debido a la perturbación producida en las ondas de voltaje y corriente de un sistema eléctrico, es importante realizar el análisis de los armónicos generados en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales.

**Objetivo General:** Analizar los armónicos que genera el inversor de un sistema fotovoltaico autónomo conectado a un sistema eléctrico residencial.

**Objetivos Específicos:**

- Revisar el estado del arte de los armónicos generados por los inversores de sistemas fotovoltaicos.
- Analizar las componentes armónicas de corriente y voltaje que se generan en el inversor de un SFV autónomo mediante el equipo FLUKE 435 SERIES II.
- Analizar el comportamiento del inversor utilizado en un SFV autónomo mediante la simulación en Simulink/Matlab.
- Evaluar posibles mejoras en el inversor para controlar las distorsiones armónicas que se generan en la red eléctrica.

**Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:** Con el fin de dar cumplimiento con los objetivos específicos, se han plantado las siguientes tareas o actividades:

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Revisar el estado del arte de los armónicos generados por los inversores de sistemas fotovoltaicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Búsqueda de información en medios físicos y digitales.</li> <li>• Recopilación de información bibliográfica de artículos científicos, libros, tesis, publicaciones, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marco teórico para el desarrollo de la investigación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuentes bibliográficas.</li> <li>• Procedimiento sistemático.</li> <li>• Ecuaciones.</li> </ul>
Analizar las componentes armónicas de corriente y voltaje que se generan en el inversor de un SFV autónomo mediante el equipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medición de los armónicos de voltaje y corriente.</li> <li>• Utilización del analizador de energía FLUKE 435.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valores en porcentaje de los armónicos obtenidos en referencia a su frecuencia fundamental.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resultados de los armónicos generados por los inversores de un SFV autónomo.</li> <li>• Grafica de los armónicos obtenidos en el equipo de</li> </ul>

FLUKE 435 SERIES II.			medición FLUKE 435.
Analizar el comportamiento del inversor utilizado en un SFV autónomo mediante la simulación en Simulink/Matlab.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación de los inversores analizados de un SFV autónomo en el software Simulink/Matlab.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resultados obtenidos de la simulación realizada en Simulink/Matlab.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación realizada en Matlab.</li> <li>• Graficas obtenidas de los resultados de la simulación.</li> </ul>
Evaluar posibles mejoras en el inversor para controlar las distorsiones armónicas que se generan en la red eléctrica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación en Simulink/Matlab.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proponer una mejora para mitigar la presencia de los armónicos en la red eléctrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de la distorsión armónica que se genera en el inversor.</li> </ul>

*Elaborado por o fuente:* Elaboración y Formulación propia.

**Justificación:** Un sistema fotovoltaico autónomo es un conjunto de elementos necesarios para satisfacer de forma permanente y fiable la demanda de energía eléctrica para un consumo determinado, siendo la radiación solar la única fuente de energía. [1]

Los armónicos son generados por cargas no lineales, esto significa que la impedancia no es constante. Estas cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red, los equipos que originan estos armónicos son: variadores de frecuencia, equipos informáticos, equipos de soldadura, luminarias y en general cualquier equipo con componentes electrónicos como diodos, transistores, tiristores, etc. [2]

Las señales de corriente o voltaje que circulen por una instalación eléctrica y cuya forma de onda no sea senoidal, puede provocar daños en los equipos que componen

la misma, el calentamientos de conductores , salto de protecciones, resonancia, etc.  
[2]

Por consiguiente, es importante el análisis de los armónicos que se generan en los inversores y así garantizar el correcto funcionamiento de los equipos conectados en una instalación eléctrica.

**Hipótesis:** Si se realiza el análisis de los armónicos generados en el inversor de un SFV autónomo, será posible controlar las distorsiones que se producen en las ondas de voltaje y corriente mediante la implementación de filtros.

## **CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLÓGICA**

### **1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.-**

DISEÑO DE UNA CENTRAL FOTOVOLTAICA PARA ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL CAMPUS DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, cuyo objetivo es realizar el estudio de factibilidad de una central fotovoltaica para abastecer de energía eléctrica al campus J. Rubén Orellana de la Escuela Politécnica Nacional [3].

Este proyecto fotovoltaico se realiza en base a la determinación de la radiación solar, a las sombras existentes en la zona, a la orientación e inclinación del panel fotovoltaico y a la ubicación del lugar donde se instalará la central. Como resultados de los análisis ejecutados, se obtiene que es factible instalar cuatro parqueaderos solares de 115, 65, 55 y 80 KW, conectados a los alimentadores 12A y 32E de la red de distribución del campus, el análisis del impacto de la conexión de las cuatro centrales fotovoltaicas a red de distribución no presenta mayores problemas y además este proyecto de energía renovable permite reducir la emisión de CO<sub>2</sub> al medio ambiente [3] .

DISEÑO DE UN SISTEMA DE MICRO GENERACIÓN FOTOVOLTAICO, CONECTADO A LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN PARA LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES CONSIDERANDO LA REGULACIÓN ARCONEL 003/18, su principal objetivo es desarrollar, de acuerdo a los requerimientos, un sistema de control de conversión de energía conectado a la red de baja tensión de EERSSA, el cual requiere de los softwares HOMER Pro, Solarius PV y SketchUp para permitir la simulación y diseño respectivamente [4]. Este proyecto cuenta con 56 paneles solares, cada uno de 365 Wp, generando una potencia instalada de 20,44KW, con lo cual existe un ahorro de 1424,84 dólares al año en facturación por consumo de energía eléctrica, además de disminuir 8,05 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> al año [4].

DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CONECTADO A LA RED UTILIZANDO PANELES FOTOVOLTAICOS PARA EL AUTOCONSUMO DEL COMPLEJO DEPORTIVO PLATAFORMA DEPORTIVA UBICADA EN EL CANTÓN LATACUNGA PROVINCIA DE COTOPAXI, cuyo objetivo es diseñar el sistema de generación fotovoltaico para el autoconsumo del complejo y así reducir el consumo de energía convencional [5]. Este proyecto incluye el diseño de un sistema fotovoltaico para la generación eléctrica, el mismo que estará conectado a la red de distribución y suplirá las necesidades eléctricas del complejo Plataforma Deportiva de la ciudad de Latacunga. El diseño se basa en las mediciones de radiación solar realizadas en un periodo de 3 meses en el año 2017, una vez completada la medición se determina el consumo máximo de energía por el complejo deportivo para posterior dimensionar los diferentes elementos que conforman el sistema fotovoltaico [5].

ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE 460W CONECTADOS A LA RED EN UNA CASA TIPO, el principal objetivo de este proyecto es realizar el estudio con generación distribuida con un sistema fotovoltaico de 460 W, el mismo generar energía eléctrica en las horas de incidencia solar sobre los paneles [6].

Este proyecto se enfoca en una casa tipo de clase media localizada en la ciudad de Cuenca, parroquia Ricaurte, en la misma se realiza las mediciones de las variaciones producidas por la incidencia del sol en horas hábiles sobre los paneles solares, estos resultados se obtienen con la ayuda del analizador de energía de la marca Fluke 434 y PQ-Box 100, variables medidas con y sin generación fotovoltaica. El análisis de la calidad de energía permite determinar el efecto que presenta la generación distribuida sobre la red eléctrica suministrada por la empresa distribuidora [6].

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN VIVIENDA AISLADA, el objetivo de este proyecto es implementar un sistema solar mediante la radiación solar para proveer de energía eléctrica a una vivienda aislada, además de evaluar el potencial fotovoltaico de la zona donde se encuentra la vivienda, así como también la demanda requerida por

la vivienda para posterior dimensionamiento del sistema de generación fotovoltaico [7].

El presente proyecto resuelve a la necesidad de energía eléctrica de una vivienda localizada en un lugar alejado del sistema eléctrico de distribución, con la recolección de datos en campo de la radiación solar de la zona, y juntamente con el análisis de los datos que refleja el portal de la NASA, se realiza el dimensionamiento de los elementos que conforman el sistema, como lo son paneles solares, baterías, regulador de carga, inversor y los demás elementos eléctricos presentes en una instalación. Como resultado se obtienen una radiación solar de 4.22 KW/h, aptos para la demanda de 225W de potencia de la vivienda [7].

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON EL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES COMO LA SOLAR EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN LA PARROQUIA ATAHUALPA, CANTÓN AMBATO, PROVINCIA TUNGURAHUA, el objetivo del presente proyecto es realizar el cálculo y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico aislado para abastecer de electricidad a viviendas unifamiliares en la parroquia Atahualpa de la ciudad de Ambato [8].

El proyecto inicia con la clasificación de las viviendas según el consumo energético mensual de cada una, para dimensionar los componentes fue necesario obtener el valor

de irradiación total diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada para lo cual se utilizaron los datos meteorológicos que exponen diferentes softwares especializados, el valor de irradiación obtenido por el Método de Lui y Jordán es de 3.887 kilovatios hora por metro cuadrado por día con una inclinación de paneles solares igual a 10 grados. Con ellos datos obtenidos se obtienen como resultado 10 paneles solares conectados en paralelo con una potencia de 350W, 8 baterías en paralelo con una capacidad de 150Ah, un inversor de 1500W y un regulador de carga [8].

DISEÑO DE CONEXIÓN DE GRANJA FOTOVOLTAICA A SISTEMA DE TRANSMISIÓN, cuyo objetivo se centra en diseñar el esquema de conexión de un

parque fotovoltaico de 150MW a un sistema de transmisión teniendo en cuenta las normativas y los análisis necesarios para la interconexión [9].

El proyecto muestra el proceso para diseñar la interconexión entre un parque fotovoltaico de 150MW a un sistema de transmisión planteándose dos alternativas de conexión, una por HVDC y otra por HVAC, a partir del análisis técnico y económico los resultados mostraron como mejor alternativa la interconexión por HVAC. La interconexión diseñada cuenta con dos líneas de transmisión HVAC de 230KV, tres transformadores de 100MVA y cuatro filtros armónicos pasivos. Una vez seleccionados los equipos se realizó la validación de la interconexión por medio de análisis de estado estable, contingencia y armónicos, se determina que el sistema cumple con los perfiles de voltaje y cargabilidad para la condición N y N-1 [9].

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO AISLADO PARA ZONAS RURALES DEL ECUADOR**, trabajo de investigación que pretende servir de base para el proceso de enseñanza aprendizaje de la asignatura de Energías alternativas, el mismo que permitirá el desarrollo de estudio de simulación para la implementación de sistemas fotovoltaicos en zonas rurales del Ecuador.

El proyecto describe el modelamiento de un sistema fotovoltaico en MATLAB/SIMULINK, además del desarrollo de una herramienta de dimensionamiento en Visual Basic para el estudio de cargas de tres zonas rurales del Ecuador y posterior simulación del SFVA en estas zonas rurales [10].

**CONTROL DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO ACTIVO UNIFICADO USANDO CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA**, trabajo de investigación que propone el método de compensación de corrientes armónicas, este método consiste en utilizar dos tipos de filtros activos, uno de ellos es el filtro serie el cual usa transformadores cuyo principio de funcionamiento es compensar los armónicos que están presentes en el voltaje, el otro tipo es el filtro de potencia en paralelo, el cual compensa los armónicos de corriente [11].

Para la investigación el análisis se realizó en un sistema IEEE de 13 buses que incorpora una carga no lineal en la séptima barra del sistema en cuestión. En este caso se analizaron los componentes de tensión, corriente y armónicos presentes en la barra 7 del sistema y en la carga. Los resultados obtenidos son la reducción de armónicos de corriente y tensión en la barra 7 del sistema, donde se reduce de 13,5% a 6% en THDi. [11]

ANÁLISIS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL ACOPLADO A LA RED UTILIZANDO UN CONVERTIDOR Q-Z CON ACUMULADORES DE ENERGÍA, proyecto que propone el diseño y modelamiento de un SFV monofásico conectado a la red residencial, mediante un inversor cuasi-Z Source Inverter (qZSI), evaluando el funcionamiento del mismo mediante simulación. Como resultado de la investigación el SFV con inversor qZSI obtienen excelentes resultados en las simulaciones, porque permite que la entrada de armónicos a la red se mantenga dentro de los parámetros establecidos [12].

MODELADO, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE MICRO-GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO MATLAB, proyecto de investigación cuyo objetivo es realizar el modelado, diseño y simulación de sistema de micro generación solar utilizando MATLAB. Mediante el estudio de cada uno de los elementos que componen el sistema fotovoltaico se ha profundizado en el comportamiento dinámico que presenta dicho sistema. Como resultado de la investigación los modelos matemáticos constituyen una herramienta importante para estudiar el comportamiento de sistemas físicos y además se ha logrado establecer el comportamiento de estos sistemas operando con cargas en AC como en DC [13].

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PWM Y DE LA CARGA EN EL THDI DE UNA MICRO RED BASADA EN GENERACIÓN FOTOVOLTAICA, proyecto realizado en la Universidad Nacional de Colombia, cuyo objetivo es analizar el efecto de la variación del índice de modulación PWM, las frecuencias de la señal moduladora,

y la distorsión armónica total (THDi) de una micro red basada en generación fotovoltaica.

Como parte de los resultados de este proyecto investigativo, se realiza un análisis del THDi a partir del grupo y subgrupo armónico; se presenta igualmente el análisis de sensibilidad correspondiente a la variación de parámetros del modelo eléctrico propuesto y se finaliza con una valoración normativa entre los resultados de las simulaciones y el documento IEEE Std 519-1992 [14].

DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS EN INVERSORES DE ENERGÍA SOLAR, IMPLEMENTANDO SISTEMAS EMBEBIDOS EN TIEMPO REAL, cuyo objetivo es detectar y corregir los armónicos presentes en inversores de energía solar, implementando sistemas embebidos en tiempo real [15].

Este proyecto consiste en diseñar un sistema embebido, basado en microprocesadores para la detección de armónicos, además de implementar un sistema de tratamiento de señales con algoritmos de filtrado y muestreo de señales, para efectuar un lazo de enganche y de esta manera detectar armónicos arriba de la frecuencia fundamental [15].

## **1.2 Fundamentación Teórica.**

### **1.2.1 Sistema Fotovoltaico**

Peñañiel y Gómez [16], señalan que los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar en sistemas autónomos (Off-Grid), cuya característica principal es satisfacer la demanda de energía eléctrica en el lugar donde van a ser instalados, por lo general su instalación es en lugares alejados o de difícil acceso de una red de distribución eléctrica; en sistemas conectados a la red (On Grid), conocidos como SFVCR, que tienen como objetivo aportar de energía eléctrica a la red de distribución mediante un medidor bidireccional y los sistemas híbridos que es una combinación de los dos sistemas mencionados anteriormente.

### 1.2.2 Partes de un sistema fotovoltaico autónomo

Según Grijalva y Vélez [17], los sistemas fotovoltaico autónomos están compuestos por:

- Un panel fotovoltaico conformado por celdas solares que reciben los rayos solares y mediante el efecto fotoeléctrico se consigue la conversión de radiación solar en corriente continua.
- Baterías que se encargan de acumular la energía generada por el panel fotovoltaico, las mismas que permiten mantener la autonomía del sistema.
- Regulador de carga, dispositivo que se encarga de controlar la carga y descarga de las baterías, trabaja en conjunto con el panel fotovoltaico y las baterías.
- Inversor, dispositivo que se encarga de convertir la corriente continua (C.C) en corriente alterna (C.A), con la finalidad de que las cargas que trabajan con C.A funcionen correctamente.

En la figura 1 se muestra la estructura de un SFV autónomo.



Fig. 1. Estructura de un sistema fotovoltaico autónomo

### 1.2.3 Panel Fotovoltaico

Un panel fotovoltaico aprovecha la energía solar que incide sobre él para convertirla en energía eléctrica en forma de corriente continua. Consta de células o celdas solares conectadas ente si para obtener valores específicos de voltaje continuo.

Las celdas solares más utilizadas son la de silicio (Si) y estas se pueden clasificar de la siguiente manera:

**Celdas de silicio monocristalino:** Construidas únicamente por un cristal de silicio obtenidas mediante el proceso de Czochralski, se muestran de color azul oscuro y son utilizadas en ambientes de climas fríos y zonas nubladas [18].

**Celdas de silicio policristalino:** Están formadas por grupos de cristales de silicio, obtenidas de un proceso de fundición en bruto (presencia de impurezas), lo que conlleva a un rendimiento inferior a las celdas monocristalinas. Presentan un color azul intenso y se utiliza en zonas cálidas [18].

Para determinar el número de paneles fotovoltaicos, se debe determinar el voltaje del sistema, para lo cual en la Tabla I se muestra los valores de acuerdo al consumo diario de energía eléctrica [10].

TABLA I  
VOLTAJE DEL SISTEMA

Consumo diario sobredimensionado	Voltaje del sistema	Unidades
1 a 2000 Wh	12	V
2001 a 4000 Wh	24	V
$\geq$ 4001 Wh	48	V

#### 1.2.4 Conversor DC/DC

Un conversor DC/DC está conformado por un inductor, un diodo, un mosfet (Switch) y un capacitor, la salida de voltaje es controlada por el switcheo generado en el Mosfet, la frecuencia de switcheo es conocida como Modulación por Ancho de Pulso (PWM) [19]. En la figura 2 se muestra el conversor DC/DC.

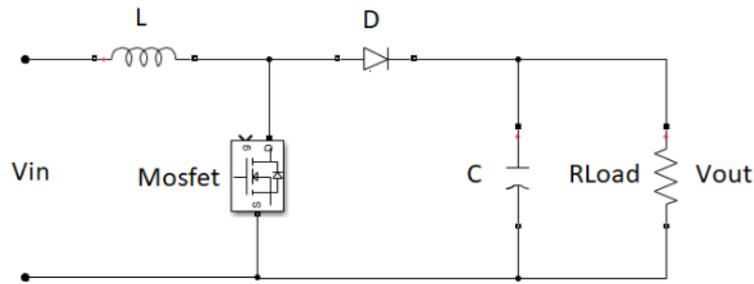


Fig. 2. Esquema de un convertor DC/DC. Fig. 3

### 1.2.5 Inversor

Es un dispositivo electrónico de potencia caracterizado por la conversión de un voltaje de entrada DC en un voltaje de salida AC [20]. Los inversores se clasifican según su aplicación en autónomos y de conexión a la red, según su forma de onda en inversores de onda cuadrada, onda modulada, onda senoidal pura y onda senoidal modificada y según la configuración del sistema en inversores centrales y modulares [21].

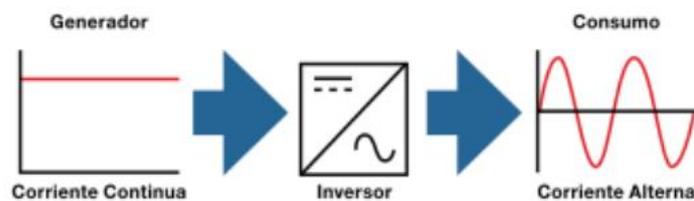


Fig. 4. Esquema de un inversor.

### 1.2.6 Inversor de onda cuadrada

Se basan en un simple recorte de la potencia de entrada de DC con muy poca modulación o filtrado. La onda resultante contiene muchos armónicos no deseados y la distorsión armónica total (THD) es bastante alta, alrededor del 40%. Tienen una eficiencia del 50 al 60% con una capacidad de sobrecarga pequeña del 10 al 20%. Su regulación de voltaje también es muy baja y por lo general se utilizan con cargas inductivas o resistivas pequeñas. En la figura 4 se muestra el diagrama de un inversor onda cuadrada [22].

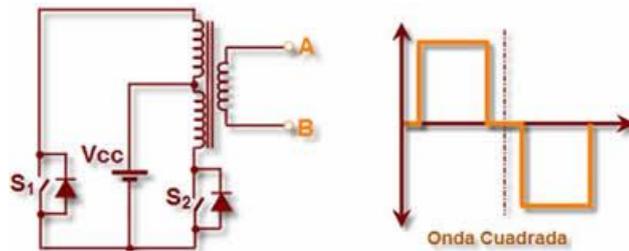


Fig. 5. Inversor onda cuadrada.

### 1.2.7 Inversor de onda senoidal modificada

Este tipo de inversor presenta un THD del 20% y su rendimiento es mayor al 90%. Son utilizados para alimentar cargas reactivas que no exijan una alta calidad de onda senoidal, como pequeños motores de inducción, variadores de frecuencia, electrodomésticos, etc. Al igual que los inversores de onda cuadrada poseen una capacidad de sobrecarga inferior a los inversores de onda senoidal pura [22]. En la figura 5 se observa un inversor de onda senoidal modificada.

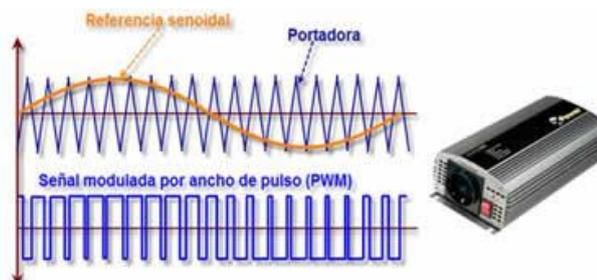


Fig. 6. Inversor onda senoidal modificada.

### 1.2.8 Inversor de onda senoidal pura

Este tipo de inversor tiene un cuidadoso filtrado de la señal generada, además cuenta con una eficiencia mayor al 90%, dependiendo de la potencia. La incorporación de microprocesadores ha permitido aumentar sus prestaciones con servicios de valor añadido como telecontrol, cómputo de energía consumida, selección de batería, etc. Sin embargo su costo es mayor al de los inversores menos sofisticados. Son utilizados en instalaciones industriales permitiendo el arranque de máquinas con picos de corrientes iniciales elevadas [22].

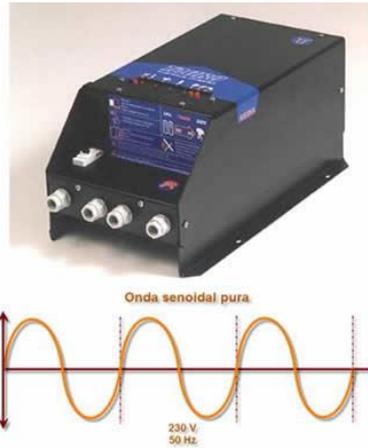


Fig. 7. Inversor onda senoidal pura.

### 1.2.9 Topologías monofásicas de los inversores

- a. **Monofásico de medio puente:** Un inversor monofásico de medio puente, como se muestra en la figura 7, consta de dos dispositivos semiconductores (IGBT o MOSFET) y una entrada de  $V_{DC}$  dividida por dos capacitores para mantener constante el nivel de voltaje deseado y el voltaje de salida correspondiente  $V_o$ . La tensión de salida ( $V_o$ ) se recibe en el centro de los condensadores, por lo que siempre es menor o igual a la mitad de la tensión de entrada ( $V_{DC}$ ) cuando se opera en el rango de conmutación lineal [23].

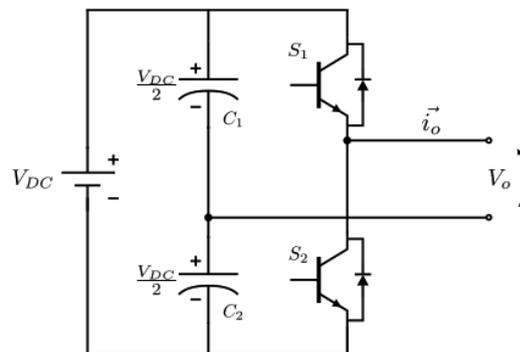


Fig. 8. Inversor monofásico de medio puente.

- b. **Monofásico de puente completo:** El inversor monofásico de puente completo que se muestra en la figura 8 está construido con cuatro semiconductores, en este caso conmutados por PWM (Pulse Width Modulation). Como el voltaje de salida  $V_o$  no está referenciado al centro de los capacitores, puede tomar valores mayores a la mitad del voltaje de

entrada DC. Cuando el inversor se usa en su rango lineal, el voltaje de salida es menor o igual que el voltaje de entrada.

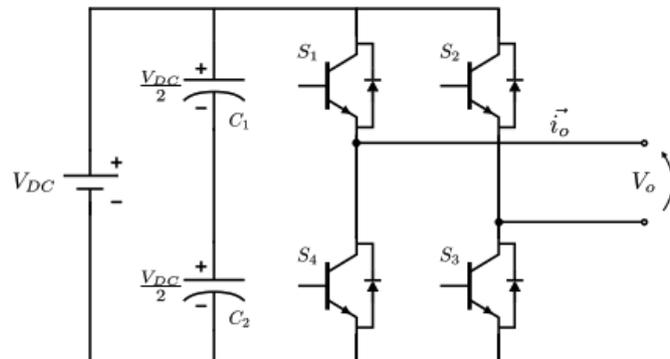


Fig. 9. Inversor monofásico de puente completo.

### 1.2.10 Conexiones de los inversores

- a. **Conexión sin regulador de carga:** Para una instalación fotovoltaica autónoma, el inversor se conecta directamente a la batería y alimenta la carga como se muestra en la figura 9.

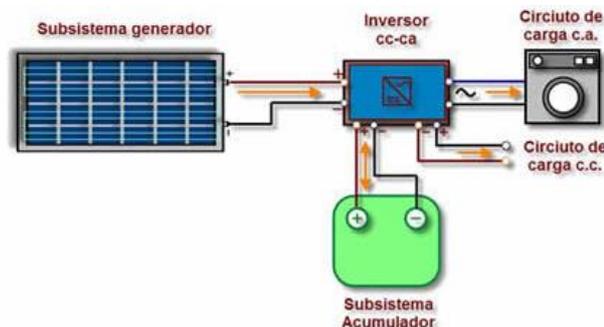


Fig. 10. Inversor sin regulador de carga.

- b. **Conexión con regulador de carga:** Estos inversores incorporan un módulo regulador de carga del sistema acumulador, controlando los ciclos de carga y descarga de las baterías.

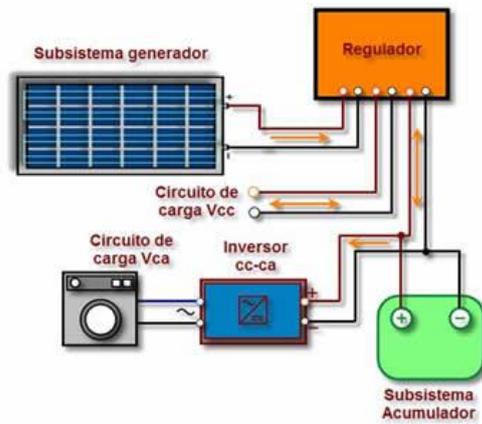


Fig. 11. Inversor con regulador de carga.

- c. **Conexión a la red eléctrica:** Estos inversores están conectados directamente a la red eléctrica inyectando corriente al sistema. Deben tener una salida senoidal pura y contar con la programación necesaria para el sincronismo con la frecuencia y corriente de la red de distribución en el punto de conexión, a este tipo de conexión se pueden añadir sistemas de generación auxiliares como por ejemplo aerogeneradores, dando lugar a los sistemas híbridos.

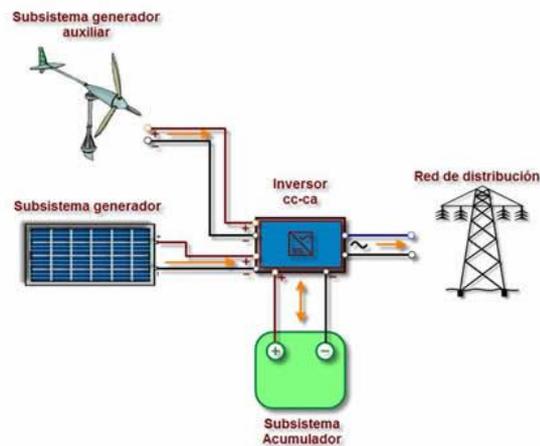


Fig. 12. Inversor conectado a la red eléctrica.

### 1.2.11 Filtrado

Para obtener una señal sinusoidal de baja distorsión, la salida del inversor debe tener un filtro para eliminar las componentes armónicas no deseadas. Los filtros más

utilizados en los inversores son aquellos que tienen la configuración LC, en la figura 12 se muestra el esquema general de un inversor con filtro LC.

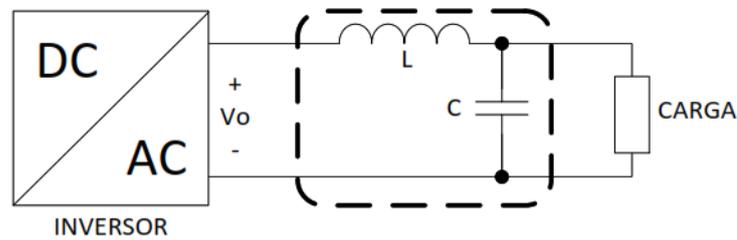


Fig. 13. Inversor con filtro LC.

### 1.2.12 Filtro L

Consta de una sola bobina. La atenuación de este filtro es de 20 dB/dec en todo el rango de frecuencias. Para reducir el contenido armónico de la corriente de salida, el valor del inductor debe ser alto, lo que lo hace muy costoso. La caída de tensión inductiva empeora la dinámica del sistema [24]. En la figura 13 se observa el esquema de un filtro L.



Fig. 14. Esquema de un filtro L.

### 1.2.13 Filtro LC

Es un filtro de segundo orden con una atenuación de 40 dB/dec. La estructura de este tipo de filtro es relativamente simple. Si los inversores están conectados a la red a través de un filtro LC, la frecuencia de resonancia del filtro se vuelve dependiente de la impedancia de la red [24]. En la figura 14 se muestra el esquema de un filtro LC.

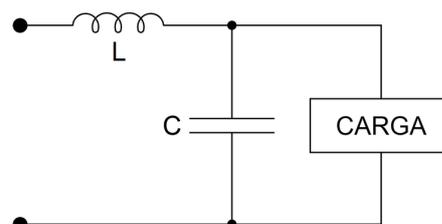


Fig. 15. Esquema de un filtro LC.

### 1.2.14 Filtro LCL

Este filtro de tercer orden es muy utilizado en inversores conectados a red debido a su alta atenuación fuera de la frecuencia de resonancia. En comparación con el filtro LC, el filtro LCL ofrece una mejor separación de las impedancias del filtro y de la red. El proceso de diseño debe tener en cuenta la resonancia del filtro y la ondulación de corriente a través de los inductores [24]. En la figura 15 se muestra el esquema de un filtro LCL.

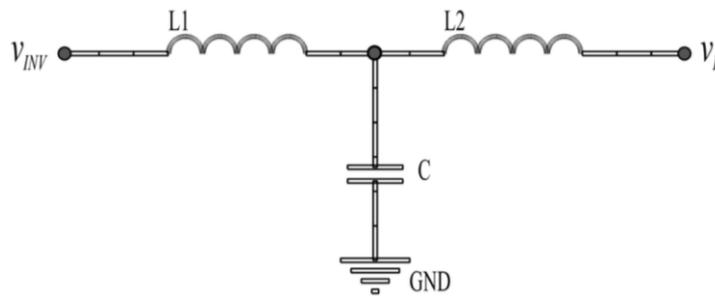


Fig. 16. Esquema de un filtro LCL.

### 1.2.15 Regulador de carga

Un regulador de carga o también de voltaje, es un convertidor de corriente utilizado para controlar la energía producida por los paneles fotovoltaicos. Sirve para garantizar el correcto funcionamiento de la instalación fotovoltaica permitiendo la conexión entre los paneles solares y las baterías.

Su principal función es evitar la sobrecarga y descarga excesiva de las baterías del sistema fotovoltaico, prolongando su vida útil. La figura 16 nos muestra un ejemplo de un regulador de carga [25].



Fig. 17. Regulador de carga.

### **1.2.16 Baterías o acumuladores**

Las baterías o también conocidas como sistemas de almacenamiento permiten acumular la energía eléctrica producida por el sistema fotovoltaico y utilizarla cuando la radiación recibida por los paneles no pueda alcanzar la energía solar necesaria para cubrir la demanda. Existen varios tipos de baterías, entre las más utilizadas en sistemas fotovoltaicos se encuentran [10]:

- Baterías AGM (Absorption Glass Mat)
- Baterías de Gel
- Baterías de Litio
- Baterías de Plomo Acido.

### **1.2.17 Carga Lineal**

Si la impedancia de un elemento alimentado por una fuente de voltaje se comporta invariante en el tiempo, se denomina carga lineal y se caracteriza por el cambio relativo de la onda de corriente en relación con la tensión sinusoidal aplicada. Si se les aplica una onda de voltaje sinusoidal, el resultado es una corriente sinusoidal. Este tipo de carga consiste principalmente en resistencias de calentamiento y bombillas incandescentes [26].

En una carga resistiva con un cierto valor en ohmios ( $\Omega$ ), la relación entre voltaje y corriente es una línea recta [27].

### **1.2.18 Carga No Lineal**

Se llama carga no lineal cuando la impedancia de un elemento conectado a una fuente de voltaje no se comporta de forma constante en el tiempo y por tanto la respectiva onda de corriente no es sinusoidal respecto a la forma de onda del voltaje aplicado. Este tipo de cargas producen pulsos cortos a medida que su impedancia se activa y desactiva cerca del pico de la onda de voltaje [26].

En una carga no lineal la relación voltaje y corriente no tiene una relación proporcional [27].

### 1.2.19 Armónicos

Los armónicos son producidos por cargas no lineales, si la impedancia de un elemento alimentado por una fuente de tensión no se comporta de manera constante a través del tiempo y sufre cualquier tipo de cambio trae como consecuencia que la respectiva onda de corriente para ese circuito no sea senoidal pura, haciendo que esta señal no se ajuste a la forma de onda del voltaje aplicado [26].

Los armónicos se pueden clasificar en impares y pares; los armónicos impares son aquellos que se encuentran en instalaciones eléctricas residenciales, industriales, etc. Los armónicos pares existen cuando hay asimetría en la señal debida a la componente continua.[2]

### 1.2.20 Distorsión Armónica

La cantidad de distorsión presente en una forma de onda de voltaje o corriente es cuantificada por un índice llamado Distorsión Armónica Total (THD), esta representa el contenido de armónicos presentes en la onda sinusoidal. Para el cálculo del THD de voltaje y corrientes se utilizan las ecuaciones 1 y 2, donde  $V_1$  e  $I_1$  son las componentes fundamentales del voltaje y corriente y  $V_h$  e  $I_h$  los armónicos h [28].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad \text{Ecuación 2.}$$

### 1.2.21 Efectos de los armónicos

- a. **Calentamiento:** A medida que aumenta la frecuencia en el voltaje o la corriente, esta tiende a circular fuera del conductor, generando que la resistencia del cable sea mayor y provoque el aumento de la temperatura del cable. Se puede generar en los devanados de un transformador, motores, conductores, cable de conexión a neutro, etc. [28].
- b. **Vibraciones:** Las altas frecuencias provocadas por la presencia de armónicos y el rápido descenso y ascenso de las señales distorsionadas provocan interferencias electromagnéticas que causan vibraciones en

tableros de control, transformadores, acoplamientos en redes de telefonía, etc. [28].

- c. **Deterioro de la forma de onda del voltaje:** La corriente distorsionada por la presencia de una gran cantidad de armónicos puede provocar la deformación de la onda de voltaje, presentando un aplanamiento en la parte superior e inferior de la onda, esto genera que la señal no alcance el valor pico, provocando el mal funcionamiento de equipos electrónicos [28].

### **1.2.22 Equipos que producen los armónicos**

Los dispositivos que producen o distorsionan la calidad de energía son aquellos equipos electrónicos industriales y de consumo residencial. Equipos monofásicos como computadoras, impresoras, televisores, refrigeradoras, electrodomésticos de uso residencial, además de balastos electrónicos para lámparas fluorescentes e iluminación LED. Equipos trifásicos como variadores de velocidad, equipos de soldadura, hornos de inducción, UPS, entre otros [18].

### **1.2.23 Calidad de la energía**

Para mantener la calidad de energía en un sistema eléctrico las ondas de tensión y corriente deben ser completamente senoidales con una amplitud y frecuencia constante, sin embargo, esto no se presenta debido a que los elementos conectados a la red poseen componentes electrónicos que distorsionan las ondas senoidales ideales, estas distorsiones provienen de las cargas no lineales y variantes en el tiempo, como convertidores de potencia, transformadores, inversores de corriente y voltaje, entre otro [29].

### **1.2.24 Normativa**

El servicio eléctrico de nuestro país Ecuador se encuentra regulado por la agencia de Regulación y Control de Electricidad y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). La regulación Nro. ARCERNNR 002/20 y la IEEE 519. establecen las tolerancias mínimas requeridas para una buena calidad de suministro de energía eléctrica.

### 1.2.25 Regulación ARCERNNR 002/20

Esta regulación tiene como objetivo establecer los indicadores, índices y límites de la calidad del servicio eléctrico de distribución y comercialización del país, además de definir los procedimientos de medición, registro y evaluación de las empresas de distribución [30].

La calidad del producto se evaluará mediante los siguientes índices o indicadores:

- Nivel de voltaje
- Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)
- Distorsión armónica de voltaje
- Desequilibrio de voltaje

La norma establece que las mediciones se deben desarrollar en intervalos de 10 minutos durante 7 días continuos.

### 1.2.26 Distorsión armónica de voltaje

En la tabla II se muestran en porcentaje los límites máximos de la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total (THD).

TABLA II  
LÍMITES MÁXIMOS DE ARMÓNICOS [30]

Nivel de Voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

### 1.2.27 Distorsión armónica de corriente

En la tabla III se observa los límites de la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total (THDi)

TABLA III  
LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE CORRIENTE (THDi)  
[30]

<b>Nivel máximo de armónicos impares <sup>a</sup> (% de la corriente máxima de demanda)</b>						
$I_{cc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^b$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$> 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

<sup>a</sup> Los límites para armónicos pares corresponden al 25% de los límites indicados.

<sup>b</sup> Todos los equipos están limitados a estos valores de distorsión de corriente, siendo  $I_{cc}$ =corriente máxima de corto circuito y  $I_L$ =corriente máxima de carga a frecuencia de 60Hz.

### 1.2.28 Analizador de Calidad de Energía

El analizador de calidad de energía es un equipo electrónico capaz de realizar un conjunto de mediciones eléctricas para analizar los sistemas de distribución de energía, proporcionando las características del sistema tales como voltaje, corriente, potencia, curvas de potencia, histogramas, análisis de armónicos, entre otros. El uso de este instrumento de medida permite dar solución a los problemas existente en una red eléctrica.

### 1.3 Fundamentación metodológica

#### Investigación documental

Se utiliza este tipo de investigación para la recolección de información referente a los armónicos que se generan en los diferentes tipos de inversores de los sistemas fotovoltaicos, en diferentes fuentes bibliográficas como libros, tesis, artículos científicos, monografías, revistas, publicaciones, etc.

### **Investigación descriptiva**

Este tipo de investigación facilito la interpretación de los resultados obtenidos en la medición de los armónicos que se generan en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos.

### **Investigación de campo**

Fue necesario usar este tipo de investigación para recolectar la información necesaria para el análisis de los armónicos que se generan en los inversores. Además, se utilizó el analizador de energía Fluke 435 para obtener los datos y realizar la comparación entre los diferentes tipos de inversores que tienen los sistemas fotovoltaicos autónomos.

### **Métodos de investigación**

#### **Método deductivo**

Se utilizó este método para deducir la información obtenida en las diferentes fuentes bibliográficas de consulta, y así emplear correctamente en el análisis del tema propuesto para la investigación.

#### **Método inductivo**

Con este método se recolectaron las diferentes mediciones obtenidas, con el fin de conseguir los resultados de los armónicos presentes en un inversor.

#### **Método analítico**

Para el respectivo análisis planteado en el tema de esta investigación, se utiliza el método analítico, con la finalidad de que los datos y mediciones obtenidas sean analizadas y así determinar la importancia que tiene la implementación de un inversor confiable que evite la distorsión en las ondas de voltaje y corriente en una instalación eléctrica residencial.

#### **Método sintético**

Método utilizado para sintetizar la información, datos y resultados que se obtienen del análisis de los armónicos generados en los inversores de un sistema fotovoltaico autónomo, información obtenida a través del equipo Fluke 435.

### **Método descriptivo**

A través de este método se desarrolló la descripción detallada de los resultados obtenidos, el análisis de los mismos y las conclusiones logradas de esta investigación.

### **Técnicas e instrumentos de investigación**

La recopilación de las distorsiones armónicas de voltaje y corriente que generan los inversores se obtuvieron con la ayuda del analizador de energía Fluke 435. Para el análisis se contó con tres sistemas fotovoltaicos autónomos.

### **Lectura comprensiva**

Durante el desarrollo de la investigación, la lectura comprensiva permitió relacionar los teoremas de diferentes autores, para alcanzar una ideología común.

### **Sinterización e interpretación de información**

Se logró adquirir la información necesaria con el propósito de realizar el análisis de los armónicos que se generan en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos. Además, permitió sintetizar de mejor manera los resultados obtenidos de las diferentes mediciones realizadas durante el desarrollo de esta investigación.

### **Medición**

Se utilizó esta técnica con el fin de obtener las mediciones de los armónicos que se generan en los inversores, se utilizaron tres sistemas fotovoltaicos autónomos para el estudio de dichas distorsiones, se empleó el analizador de energía Fluke 435. Por medio de estas mediciones se obtuvieron los datos que nos permitieron comparar y analizar los resultados obtenidos.

### **Modelado y simulación**

Se utilizó esta técnica con la finalidad de realizar el modelado y simulación de los inversores de los SFV autónomos analizados, para evaluar comportamiento de los mismos, y así mitigar las distorsiones armónicas que se generaran mediante la configuración o mejoras en la etapa de filtrado del inversor que presente problemas de eficiencia.

#### **1.4 Conclusiones Capítulo I**

- El diseño de sistemas fotovoltaicos aislados permite el autoconsumo y el ahorro de gasto en el consumo energético, además contribuir con el excedente de producción al sistema eléctrico, así también disminuir el impacto ambiental que provocan otros tipos de energías no renovables.
- El análisis del comportamiento de los armónicos que se generan en los inversores de sistemas fotovoltaicos permite mitigar los impactos que producen las componentes armónicas de voltaje y corriente, con ello también se asegura la calidad de energía en el sistema eléctrico.
- La utilización de elementos electrónicos de potencia en los inversores, provocan la presencia de distorsiones en la calidad de la energía eléctrica, es por ello la importancia de contar con filtros para eliminar estas anomalías en la red eléctrica.

## **CAPÍTULO II. PROPUESTA**

### **2.1 Título del proyecto.**

Análisis de los armónicos generadores en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos.

### **2.2 Objetivo del proyecto.**

Analizar la presencia de armónicos que se generan en los inversores y plantear mejoras en la configuración de los mismos mediante el modelado y simulación en el software Simulink/Matlab.

### **2.3 Descripción de la propuesta.**

Este estudio permitirá identificar el comportamiento de un sistema fotovoltaico autónomo frente a la conexión de cargas lineales y no lineales, donde se propone analizar los armónicos que se producen en el inversor de corriente continua a alterna.

Para este trabajo se propone realizar las mediciones del THD con el analizador de energía Fluke y la simulación del inversor en el software Simulink/Matlab con la finalidad de evaluar posibles mejoras en la configuración del inversor.

### **2.4 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados**

La investigación que se plantea es descriptiva y exploratoria, que a través de las mediciones y recolección de datos se busca mostrar los resultados referentes a la distorsión armónica generada por el inversor de un sistema fotovoltaico autónomo. Para el estudio se eligieron tres sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales instalados en lugares que no cuentan con el suministro de energía eléctrica provisto por la red de distribución.

#### **2.4.1 Descripción del sistema fotovoltaico N°1**

Para la descripción del sistema se tiene acceso al lugar instalado y a las características del mismo, este sistema fotovoltaico se encuentra ubicado en la provincia de Pastaza, en la parroquia Teniente Hugo Ortiz, en un emprendimiento local de nombre “Cascada Las Lajas”, el sistema se compone de los siguientes elementos:

## Panel solar

Del tipo monocristalino de la marca Sunpower, en la tabla 4 se muestra las características del panel y en el Anexo 1 el Datasheet.

TABLA IV  
CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SOLAR

Característica	Valor	Unidad
Número de paneles	2	
Número de celdas	96	
Potencia	345	W
Voltaje de circuito abierto Voc	68.2	V
Corriente de cortocircuito Isc	6.39	A
Voltaje en el máximo punto de potencia Vmpp	57.3	V
Corriente en el máximo punto de potencia Impp	6.02	A

En la figura 17 se muestra el panel fotovoltaico.



Fig. 18. Panel solar.

## **Inversor**

El inversor es el dispositivo encargado de convertir corriente continua a corriente alterna, este se encuentra instalado después del banco de baterías del sistema FV y alimenta a las cargas eléctricas. En la figura 18 se muestra el inversor a ser analizado y en el Anexo 2 se indican las características del mismo.



Fig. 19. Inversor Phoenix 24/1200.

El inversor tiene las siguientes características eléctricas:

- Potencia nominal: 1200VA
- Potencia máxima: 2200W
- Voltaje de salida C.A: 120V
- Frecuencia: 60Hz
- Voltaje de entrada: 24V
- Tipo: Onda sinusoidal pura.

### **2.4.2 Mediciones**

#### **Analizador de Redes Fluke 435**

El analizador de redes Fluke 435 es un equipo utilizado para el monitoreo y control de la calidad de energía en un sistema eléctrico, este permite medir todos los parámetros eléctricos como voltaje, corriente, frecuencia, potencia, armónicos, flickers, etc. presentes en una instalación eléctrica.

El analizador cuenta con los siguientes componentes: Anexo 3.

1. Pinzas de cocodrilo. Juego de 5.

2. Cables de prueba, 2.5m + pinzas codificadas con colores, juego de 5.
3. Sonda de corriente de CA 6000A flexible, juego de 4.
4. Adaptador de red.

En la figura 19 se muestra el analizador utilizado.



Fig. 20. Fluke 435-Series II.

### Configuración del analizador Fluke 435

La configuración inicial del equipo se la realiza en la pantalla principal, en la que se ingresan los parámetros como fecha, hora, la configuración de conexión, si es monofásica, bifásica o trifásica, la frecuencia del sistema, el voltaje nominal y los límites que estos ya vienen establecidos según la norma EN50160.

La configuración de conexión utilizada es del tipo monofásica, la misma que se muestra en la figura 20.

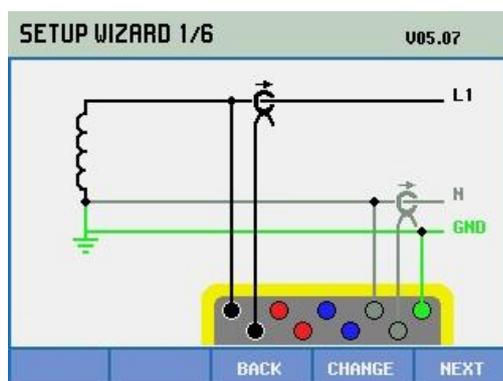


Fig. 21. Configuración de conexión.

Al ingresar en la configuración de los límites se establecen los porcentajes de variación del voltaje y de la distorsión armónica total, basados en la resolución

ARCERNNR 002/20, donde establece  $\pm 8\%$  en el voltaje y  $8\%$  en la THD . Cuando en el transcurso de la medición existan valores superiores a los establecidos, el equipo registrara un evento y lo guardara. En la figura 21 se muestra los limites ingresados.

SETUP LIMITS			U05.07	SETUP LIMITS			U05.07	
Urms	TENSIÓN	EDIT	U...	ARMÓNICOS	EDIT			
Nominal Voltage: 120 U				Reference: Fundamental Voltage				
Not exceeding probability			◀ 95.0 % ▶	Harmonic #			◀ THD ▶	
Upper limit			+8.0 % 130 U	Not exceeding probability			95.0 %	
Lower limit			-8.0 % 110 U	Upper limit			+8.0 %	
Not exceeding probability			100 %	Not exceeding probability			100 %	
Upper limit			+10.0 % 132 U	Upper limit			+8.0 %	
Lower limit			-15.0 % 102 U	Harmonic relative setting			<input checked="" type="radio"/> Fundamental <input type="radio"/> Unom	
PREV.	NEXT		BACK	PREV.	NEXT		BACK	

Fig. 22. Límites de voltaje y armónicos.

### Conexión del equipo

En base al diagrama de conexión mostrado en la figura 20 se procede con las conexiones en el sistema fotovoltaico. A continuación la figura 22 se muestra las conexiones realizadas in situ.



Fig. 23. Conexiones.

Para comprobar que las conexiones se han realizado correctamente se oprime la tecla SCOPE (Osciloscopio), para visualizar las ondas de voltaje y corriente. En la figura 23 se muestra la onda senoidal del voltaje.

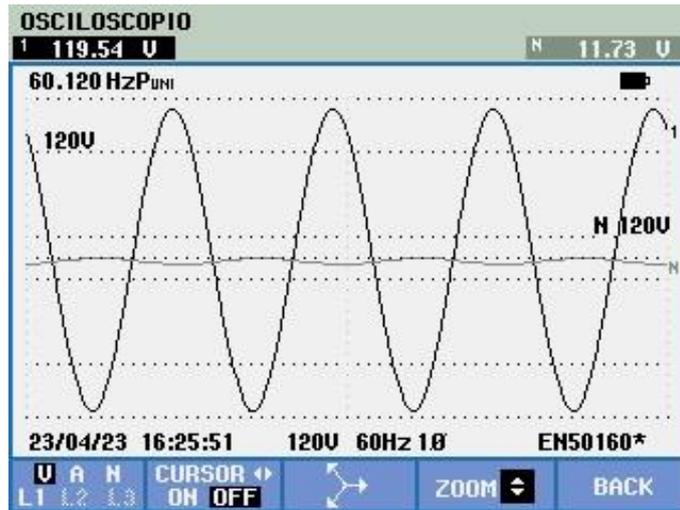


Fig. 24. Señal de voltaje.

### Niveles de voltaje

La medición se realiza desde el 23/04/2023 hasta el 30/04/2023, un total de 7 días en intervalos de 10 minutos según lo establecido en la regulación ARCERNNR 002/20. En la figura 24 se muestran los valores mínimos, medios y máximos de voltaje del sistema fotovoltaico N°1 registrados durante los 7 días de medición, se evidencia que los valores de voltaje se encuentran dentro de los límites establecidos de  $\pm 8\%$  (110V – 130V) en bajo voltaje.

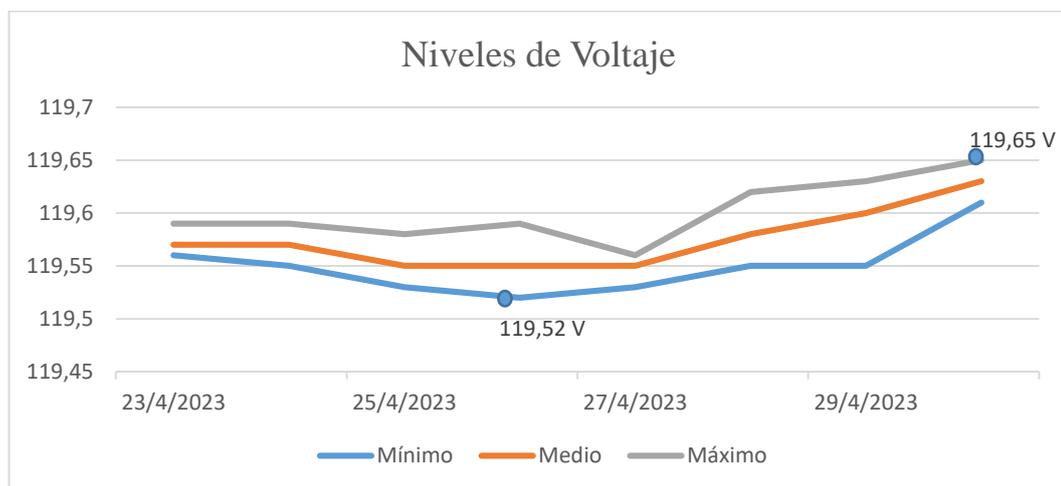


Fig. 25. Niveles de voltaje.

Los valores de voltaje mínimo y máximo del SFV N°1 se encuentran dentro de los límites establecidos, siendo el nivel mínimo de 119,52V y el máximo de 119,65V.

### Distorsión Armónica Total de Voltaje THDv

En la figura 25 se observa la Distorsión Armónica Total de Voltaje, la misma que no supera el límite del 8% establecido por la regulación ecuatoriana, por lo que no se infringe en la Calidad de la Energía.

Además el analizador de energía nos permite realizar capturas de pantalla, en la figura 26 se muestra el THDv registrado el 27/04/2023 a las 11:08, cuyo valor es de 1.3%.

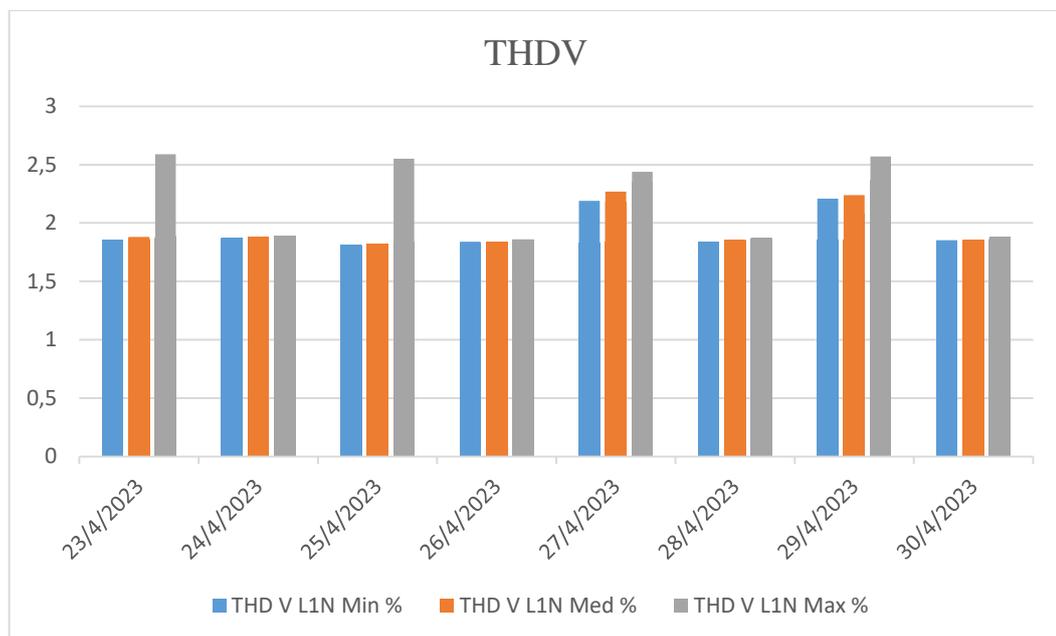


Fig. 26. THDv mínimo, medio y máximo.

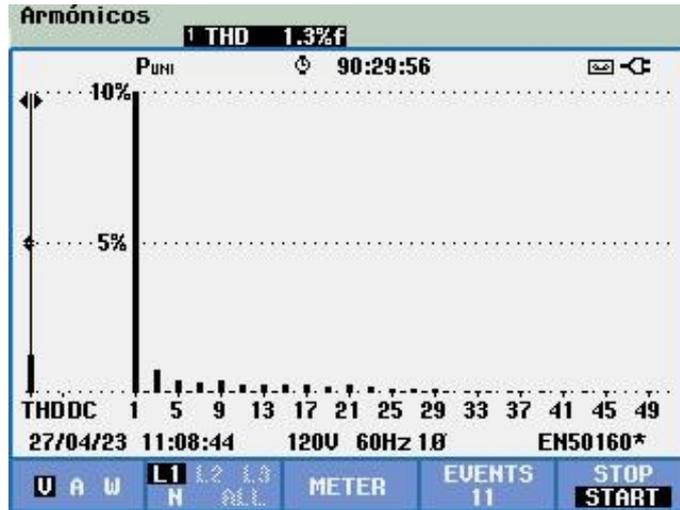


Fig. 27. Registro de mediciones del THDv.

### Armónicos individuales de voltaje

La figura 27 muestra los armónicos individuales de voltaje, se observa que los valores se encuentran por debajo del límite establecido en la normativa (5%), el armónico de orden 3 es el que tiene mayor valor (1.44%)

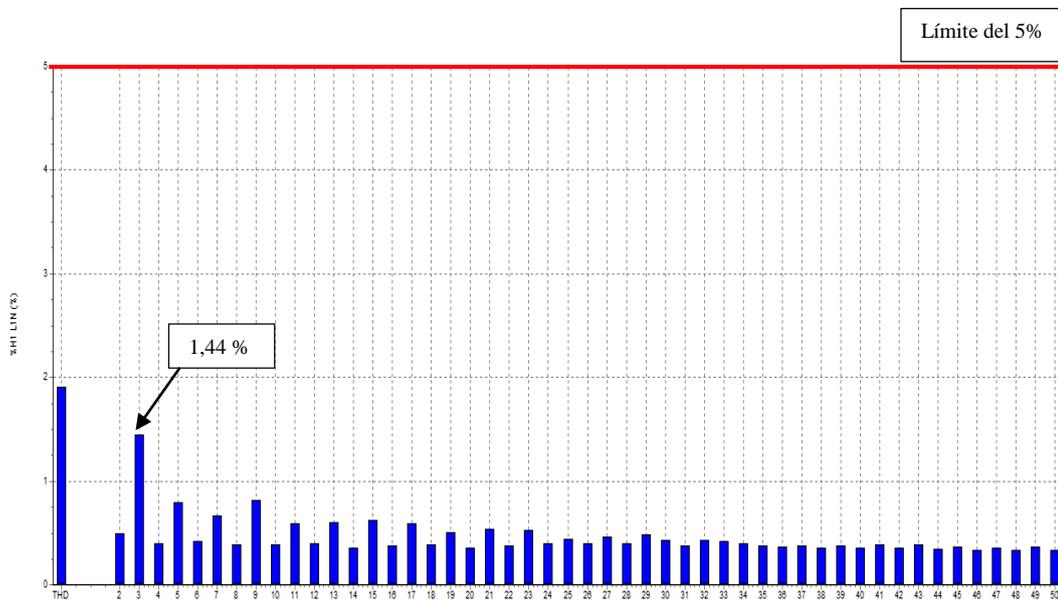


Fig. 28. Armónicos individuales de voltaje.

## Distorsión Armónica Total de Corriente THDi

De acuerdo a la normativa ARCERNNR 002/20 y IEEE Std 519-2014, se realiza el análisis de los armónicos de corriente, que según el estándar el límite del THDi es del 5%. En la figura 28 se observa que los valores medidos superan el 5% por lo que se está infringiendo en la calidad de energía.

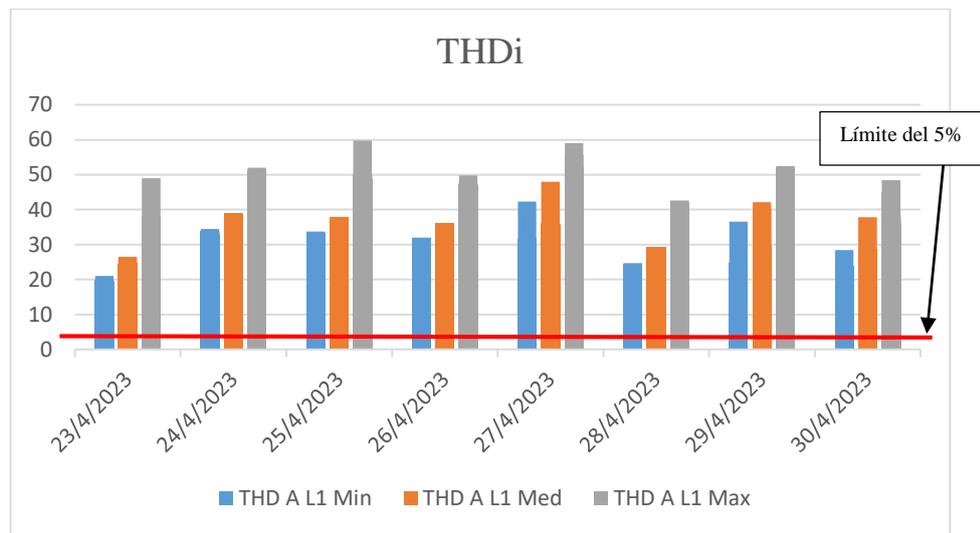


Fig. 29. THDi mínimo, medio y máximo.

## Armónicos individuales de corriente

En figura 29 se observan los resultados medidos de los armónicos individuales, los armónicos del orden 3, 5, 7 y 13 superan los límites establecidos. En la tabla 5 se muestran los valores registrados durante la medición.

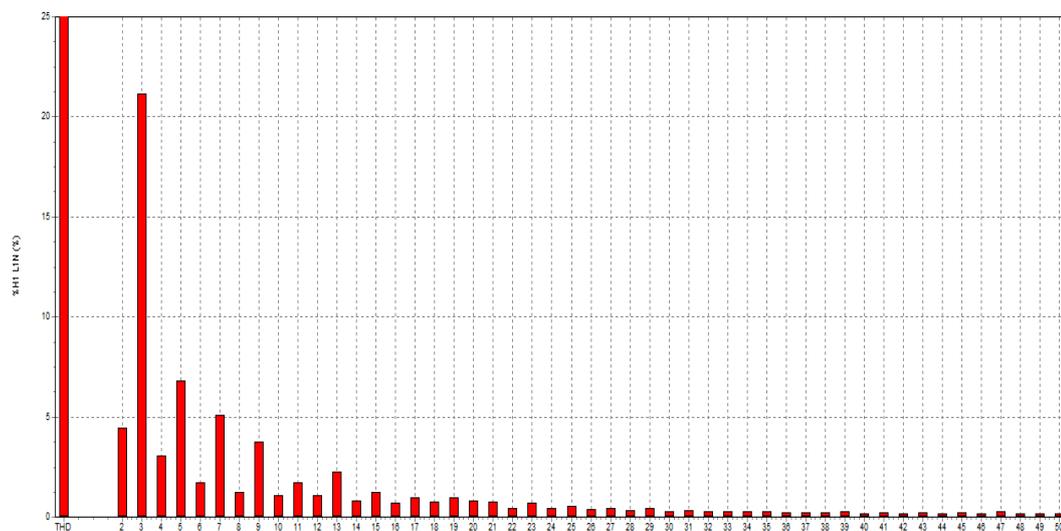


Fig. 30. Armónicos individuales de corriente.

TABLA V

ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE REGISTRADOS

<b>Componente armónica</b>	<b>L1 (%)</b>	<b>Límite (%)</b>	<b>Cumple con la normativa</b>
H3	21,151	4	NO
H5	6,795	4	NO
H7	5,109	4	NO
H9	3,745	4	SI
H11	1,733	2	SI
H13	2,230	2	NO
H15	1,248	2	SI
H17	0,952	1,5	SI
H19	0,968	1,5	SI
H21	0,767	1,5	SI
H23	0,590	0,6	SI
H25	0,519	0,6	SI
H27	0,453	0,6	SI
H29	0,453	0,6	SI
H31	0,311	0,6	SI
H33	0,252	0,6	SI
H35	0,290	0,3	SI
H37	0,233	0,3	SI
H39	0,247	0,3	SI
H41	0,236	0,3	SI
H43	0,192	0,3	SI
H45	0,219	0,3	SI
H47	0,248	0,3	SI
H49	0,184	0,3	SI

En la figura 30 se muestran las formas de onda del voltaje y de la corriente.

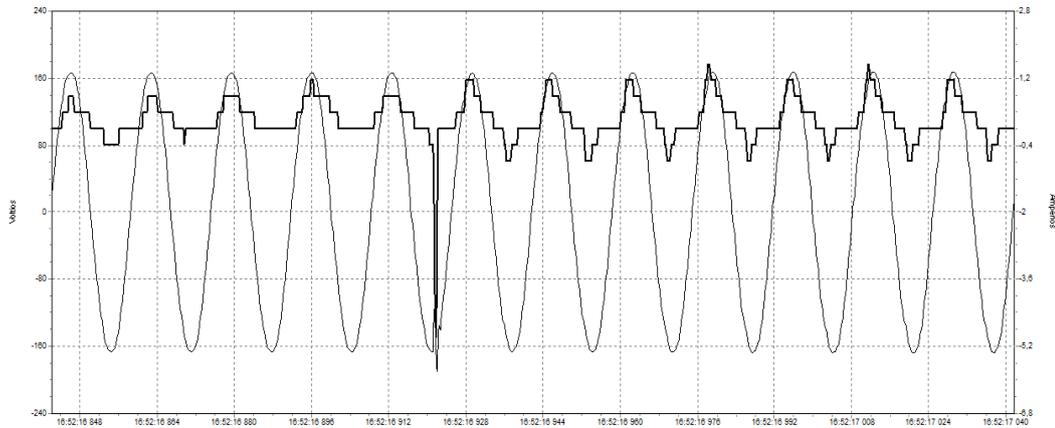


Fig. 31. Formas de onda de voltaje y corriente.

### 2.4.3 Descripción del sistema fotovoltaico N°2

Este sistema fotovoltaico autónomo se encuentra ubicado en la provincia de Pastaza, cantón Mera, en el centro de investigación “Sumak Kawsay”, el sistema se compone de los siguientes elementos:

#### Panel solar

Del tipo monocristalino de la marca Jinko Solar, en la tabla 6 se muestra las características del panel y en el Anexo 4 el Datasheet.

TABLA VI  
CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SOLAR

Característica	Valor	Unidad
Número de paneles	15	
Número de celdas	72	
Potencia	420	W
Voltaje de circuito abierto $V_{oc}$	38.11	V
Corriente de cortocircuito $I_{sc}$	14.07	A
Voltaje en el máximo punto de potencia $V_{mpp}$	31.51	V
Corriente en el máximo punto de potencia $I_{mpp}$	13.33	A

En la figura 31 se muestra el arreglo de paneles solares.



Fig. 32. Arreglo de paneles solares.

### **Inversor**

En la figura 32 se presenta el inversor a ser analizado y en el anexo 5 se indican las características generales del mismo utilizado en este sistema fotovoltaico.



Fig. 33. Inversor Quattro 48V/5000W.

El inversor tiene las siguientes características eléctricas:

- Potencia nominal: 5000VA
- Potencia máxima: 10000W
- Voltaje de salida C.A:  $120V \pm 2\%$
- Frecuencia:  $60\text{Hz} \pm 0.1\%$
- Voltaje de entrada: 48V
- Configuración: Onda sinusoidal pura

## 2.4.4 Mediciones

### Conexión del equipo

En la figura 33 se muestra las conexiones realizadas in situ.



Fig. 34. Conexiones eléctricas.

Para comprobar que las conexiones se han realizado correctamente se oprime la tecla SCOPE (Osciloscopio), para visualizar las ondas de voltaje y corriente. En la figura 34 se muestra la onda senoidal del voltaje.

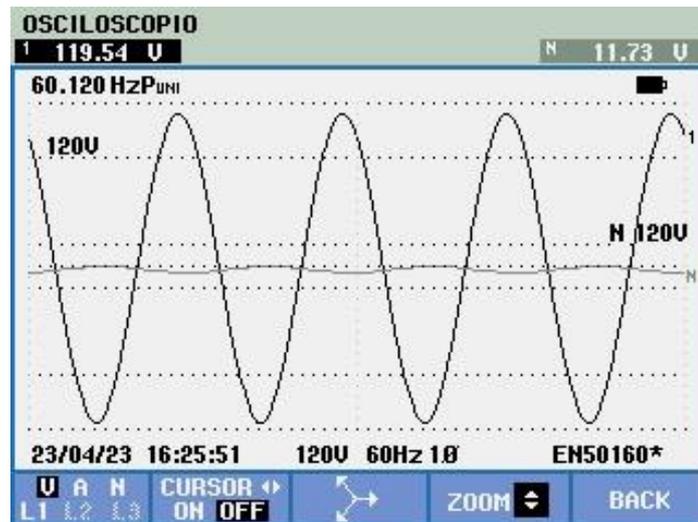


Fig. 35. Señal de voltaje.

### Niveles de voltaje

La medición se realiza desde el 05/05/2023 hasta el 12/05/2023, un total de 7 días en intervalos de 10 minutos según lo establecido en la regulación ARCERNNR 002/20. En la figura 35 se muestran los valores mínimos, medios y máximos de voltaje del sistema fotovoltaico N°2, se evidencia que los valores de voltaje se encuentran dentro de los límites establecidos de  $\pm 8\%$  (110V – 130V) en bajo voltaje.

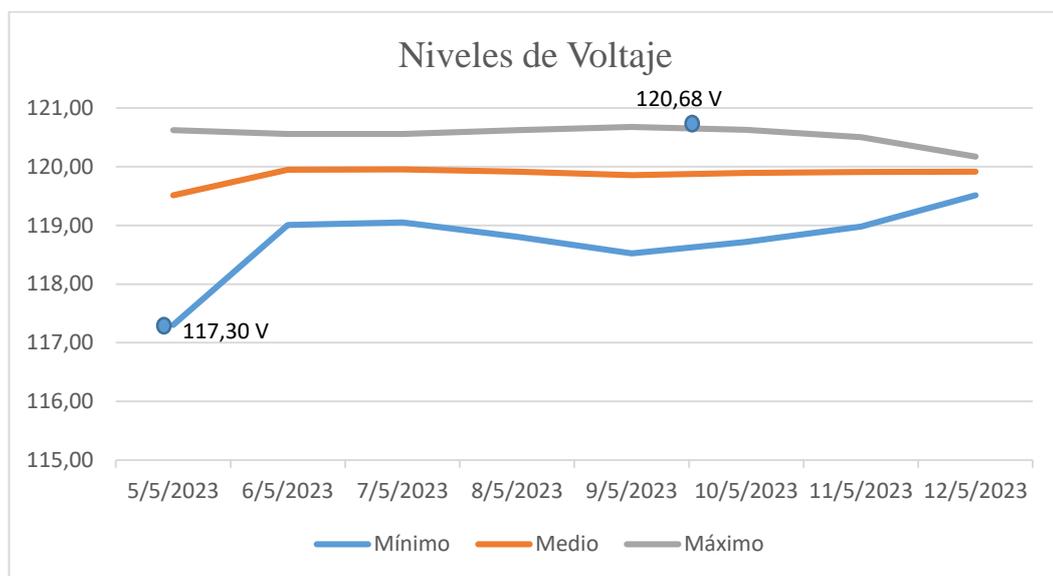


Fig. 36. Niveles de voltaje.

Los valores de voltaje mínimo y máximo del SFV N°2 se encuentran dentro de los límites establecidos, siendo el nivel mínimo de 117,30V y el máximo de 120,68V.

### Distorsión Armónica Total de Voltaje THDv

En la figura 36 se observa la Distorsión Armónica Total de Voltaje, la misma que no supera el límite del 8% establecido por la regulación ecuatoriana, por lo que no se infringe en la Calidad de la Energía.

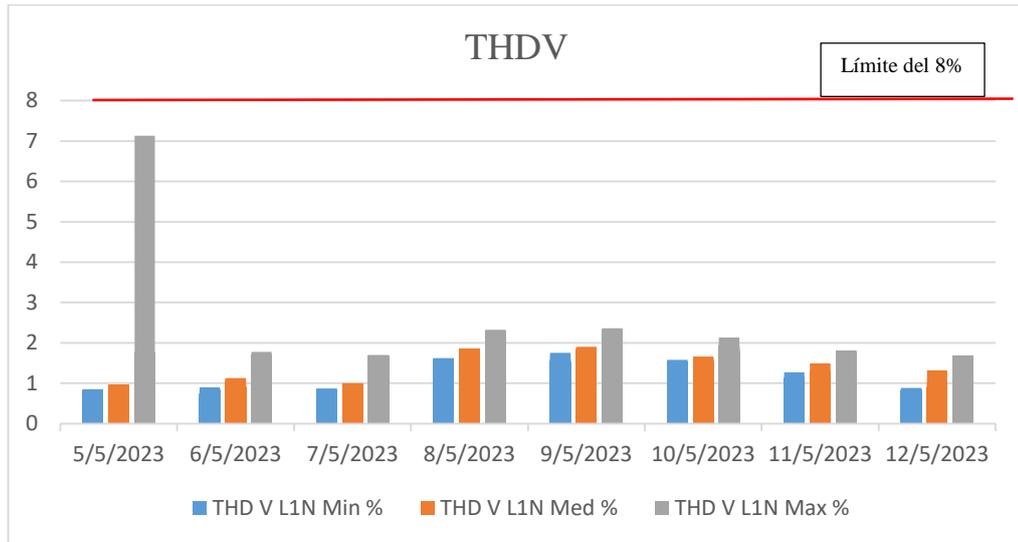


Fig. 37. THDv mínimo, medio y máximo.

### Armónicos individuales de voltaje

La figura 37 muestra los armónicos individuales de voltaje, se observa que los valores se encuentran por debajo del límite establecido en la normativa (5%), el armónico de orden 3 es el que tiene mayor valor (0.415%)

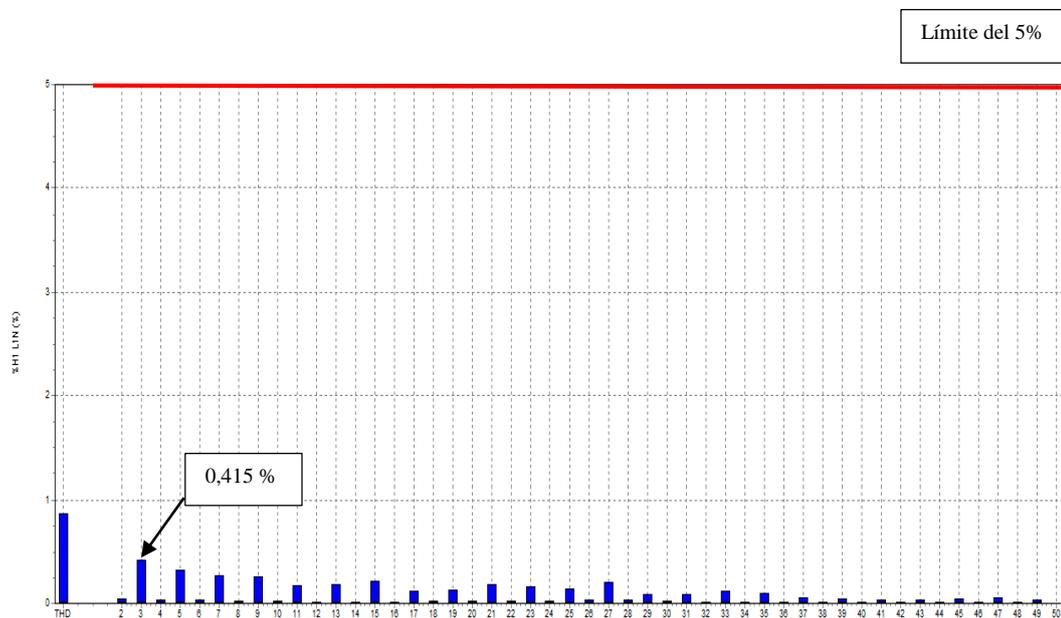


Fig. 38. Armónicos individuales de voltaje.

### Distorsión Armónica Total de Corriente TDHi

De acuerdo a la normativa ARCERNNR 002/20 y IEEE Std 519-2014, se realiza el análisis de los armónicos de corriente, que según el estándar el límite del THDi es

del 5%. En la figura 38 se observa que los valores medidos superan el 5% por lo que se está infringiendo en la calidad de energía.

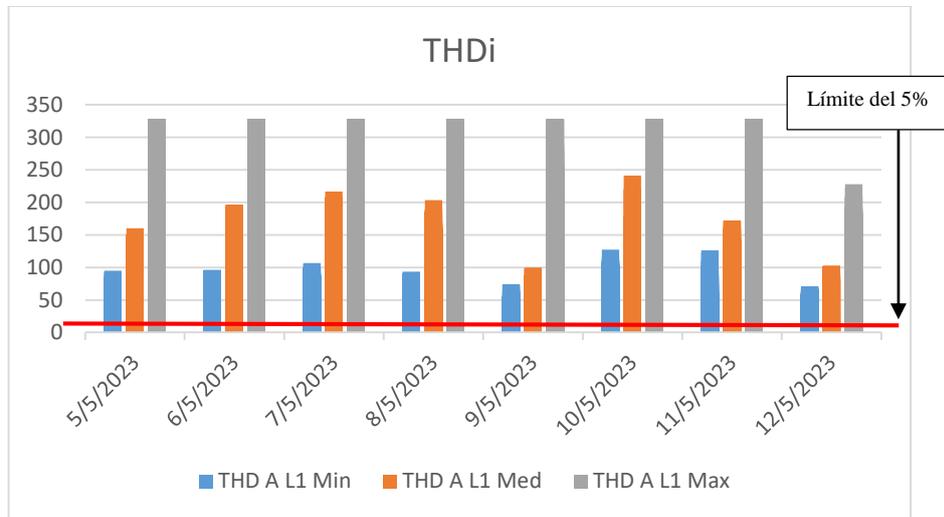


Fig. 39. THDi mínimo, medio y máximo.

### Armónicos individuales de corriente

En figura 39 se observan los resultados medidos de los armónicos individuales. En la tabla 7 se muestran los valores registrados durante la medición.

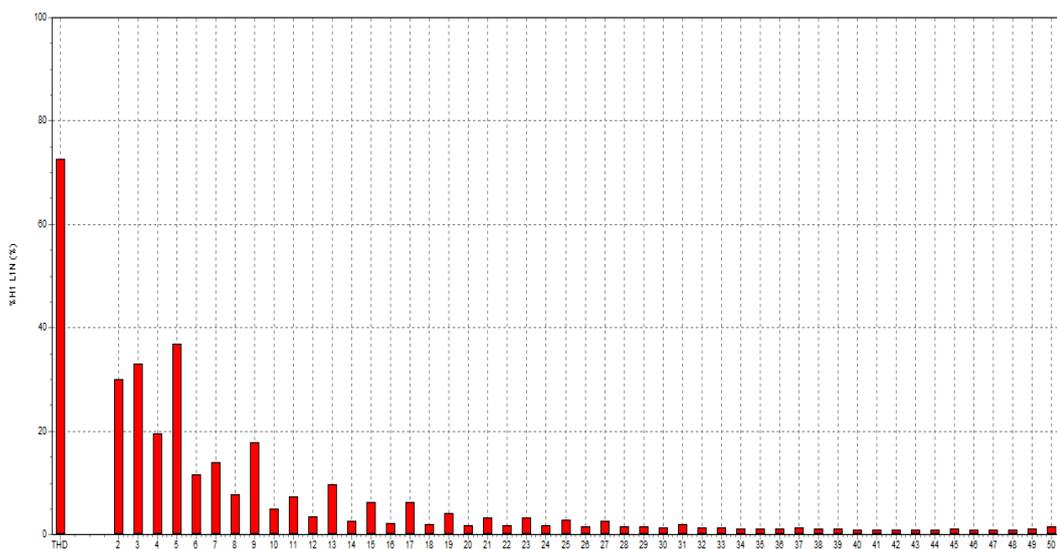


Fig. 40. Armónicos individuales de corriente.

TABLA VII

ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE REGISTRADOS

<b>Componente armónica</b>	<b>L1 (%)</b>	<b>Límite (%)</b>	<b>Cumple con la normativa</b>
H3	33,078	4	NO
H5	36,741	4	NO
H7	13,903	4	NO
H9	17,702	4	NO
H11	7,216	2	NO
H13	9,638	2	NO
H15	6,182	2	NO
H17	6,269	1,5	NO
H19	4,009	1,5	NO
H21	3,170	1,5	NO
H23	3,301	0,6	NO
H25	2,856	0,6	NO
H27	2,536	0,6	NO
H29	1,472	0,6	NO
H31	1,997	0,6	NO
H33	1,192	0,6	NO
H35	1,126	0,3	NO
H37	1,269	0,3	NO
H39	1,173	0,3	NO
H41	0,948	0,3	NO
H43	0,959	0,3	NO
H45	1,018	0,3	NO
H47	0,850	0,3	NO
H49	0,996	0,3	NO

En la figura 40 se muestran las formas de onda del voltaje y de la corriente.

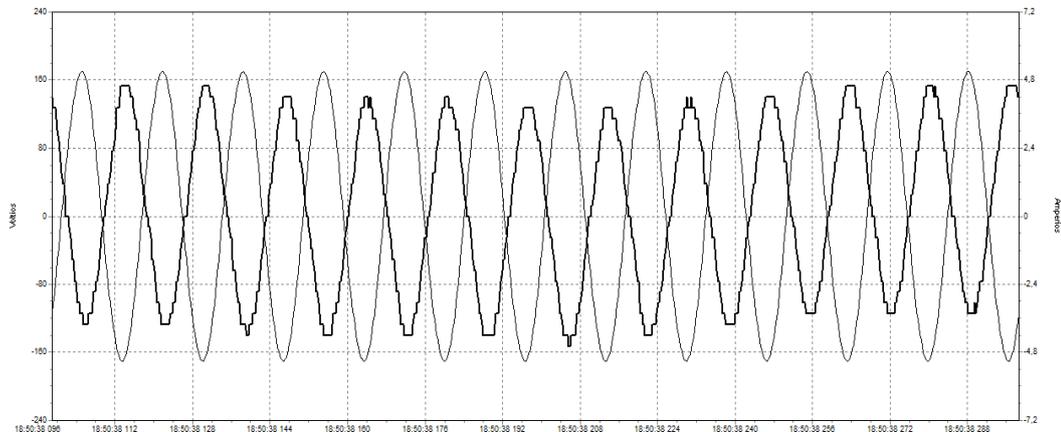


Fig. 41. Formas de onda de voltaje y corriente.

#### 2.4.5 Descripción del sistema fotovoltaico N°3

Este sistema fotovoltaico autónomo se encuentra ubicado en la provincia de Pastaza, cantón Pastaza, en una pequeña vivienda de la familia Muñoz, el sistema se compone de los siguientes elementos:

##### Panel solar

Del tipo monocristalino de la marca Eco Green Energy, en la tabla 8 se muestra las características del panel y en el Anexo 6 el Datasheet.

TABLA VIII  
CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SOLAR

Característica	Valor	Unidad
Número de paneles	2	
Número de celdas	72	
Potencia	400	W
Voltaje de circuito abierto Voc	48.60	V
Corriente de cortocircuito Isc	10.40	A
Voltaje en el máximo punto de potencia Vmpp	39.92	V
Corriente en el máximo punto de potencia Impp	10.02	A

En la figura 41 se muestra el arreglo de paneles solares.



Fig. 42. Arreglo de paneles solares.

### **Inversor**

En la figura 42 se presenta el inversor a ser analizado y en el anexo 7 se indican las características generales del mismo utilizado en este sistema fotovoltaico.



Fig. 43. Inversor Zonhjan 24V/500W.

El inversor tiene las siguientes características eléctricas:

- Potencia nominal: 500VA
- Potencia máxima: 1000W
- Voltaje de salida C.A: 110V – 120V
- Frecuencia: 60Hz  $\pm$  0.1%
- Voltaje de entrada: 24V

## 2.4.6 Mediciones

### Conexión del equipo

En la figura 43 se muestra las conexiones realizadas in situ.



Fig. 44. Conexiones eléctricas.

Para comprobar que las conexiones se han realizado correctamente se oprime la tecla SCOPE (Osciloscopio), para visualizar las ondas de voltaje y corriente. En la figura 44 se muestra la onda senoidal del voltaje.

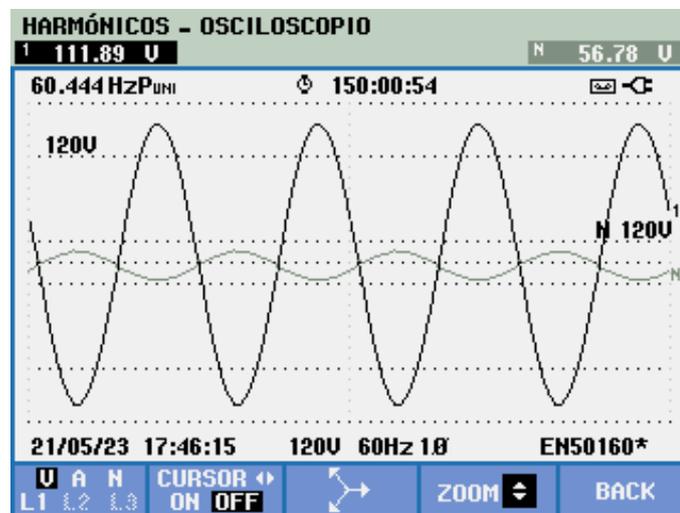


Fig. 45. Señal de voltaje.

### Niveles de voltaje

La medición se realiza desde el 15/05/2023 hasta el 22/05/2023, un total de 7 días en intervalos de 10 minutos según lo establecido en la regulación ARCERNNR 002/20. En la figura 45 se muestran los valores mínimos, medios y máximos de

voltaje del sistema fotovoltaico N°3, se evidencia que los valores de voltaje se encuentran dentro de los límites establecidos de  $\pm 8\%$  (110V – 130V) en bajo voltaje.

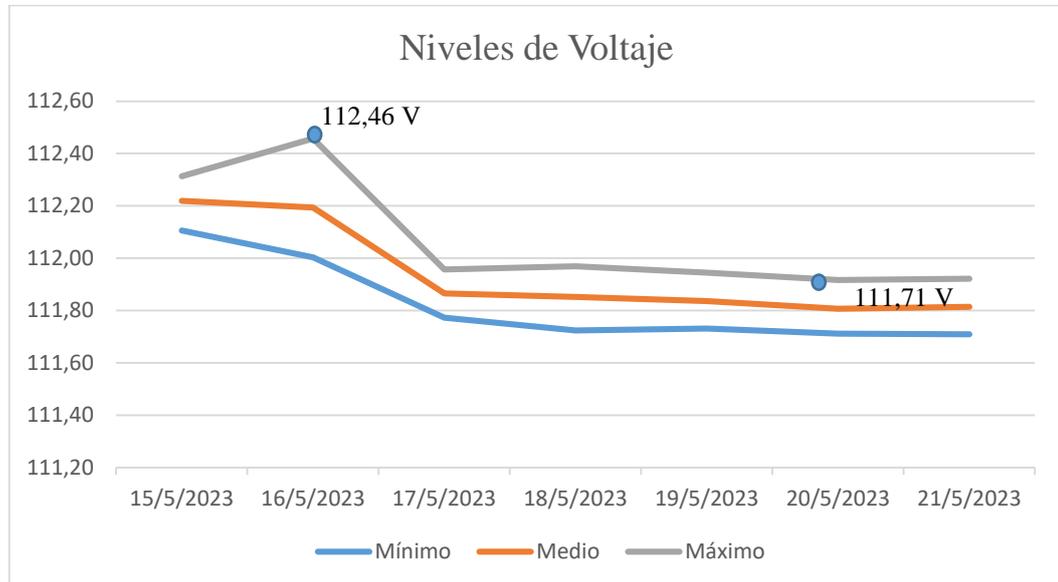


Fig. 46. Niveles de voltaje.

Los valores de voltaje mínimo y máximo del SFV N°3 se encuentran dentro de los límites establecidos, siendo el nivel mínimo de 111,71V y el máximo de 112,46 V.

#### **Distorsión Armónica Total de Voltaje THDv**

En la figura 46 se observa la Distorsión Armónica Total de Voltaje, la misma que no supera el límite del 8% establecido por la regulación ecuatoriana, por lo que no se infringe en la Calidad de la Energía.

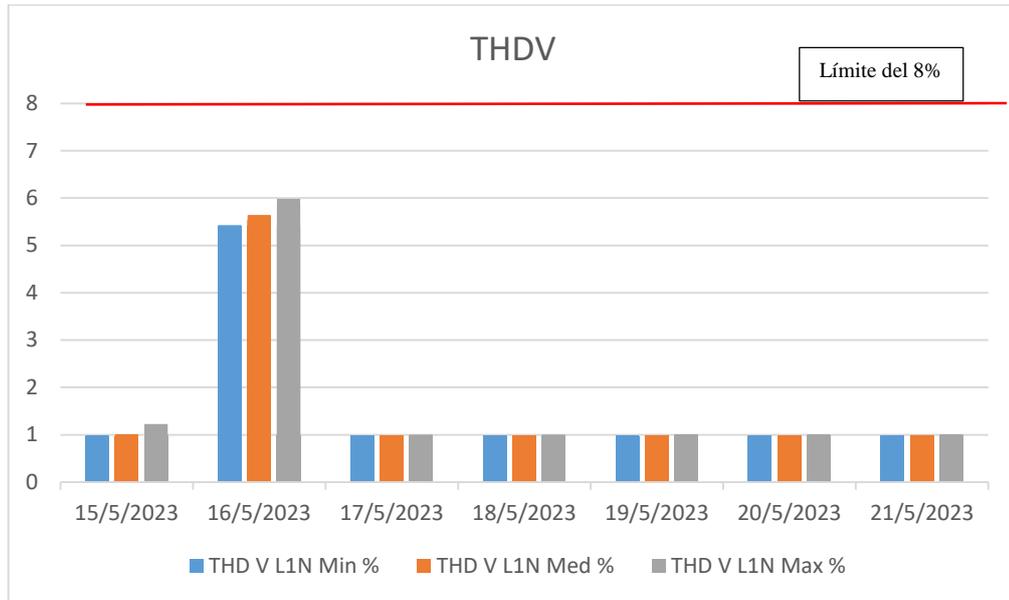


Fig. 47. THDv mínimo, medio y máximo.

### Armónicos individuales de voltaje

En la figura 47 muestra los armónicos individuales de voltaje, se observa que los valores se encuentran por debajo del límite establecido en la normativa (5%), el armónico de orden 3 es el que tiene mayor valor (0.518%).

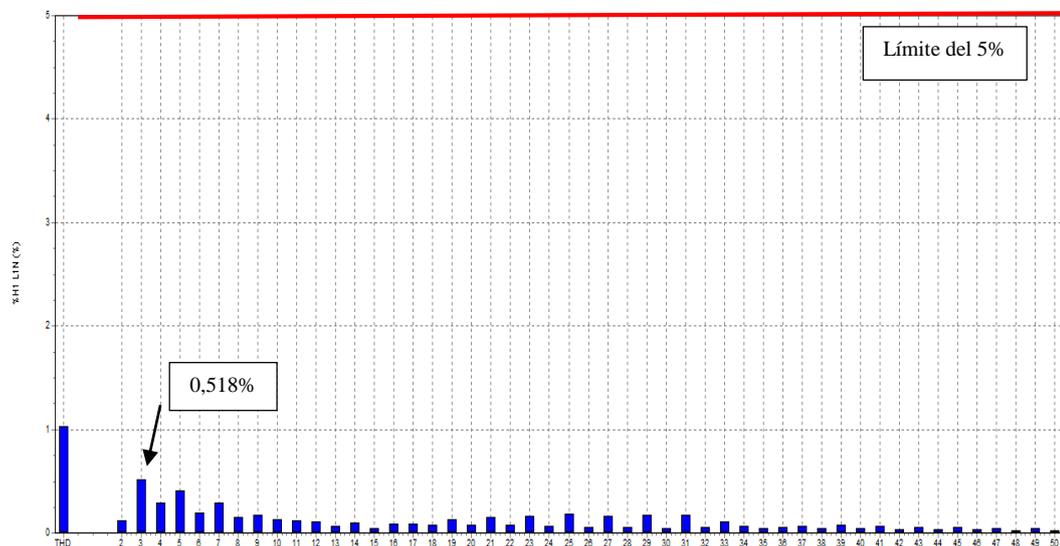


Fig. 48. Armónicos individuales de voltaje.

### Distorsión Armónica Total de Corriente TDHi

De acuerdo a la normativa ARCERNR 002/20 y IEEE Std 519-2014, se realiza el análisis de los armónicos de corriente, que según el estándar el límite del THDi es

del 5%. En la figura 48 se observa que los valores medidos superan el 5% por lo que se está infringiendo en la calidad de energía.

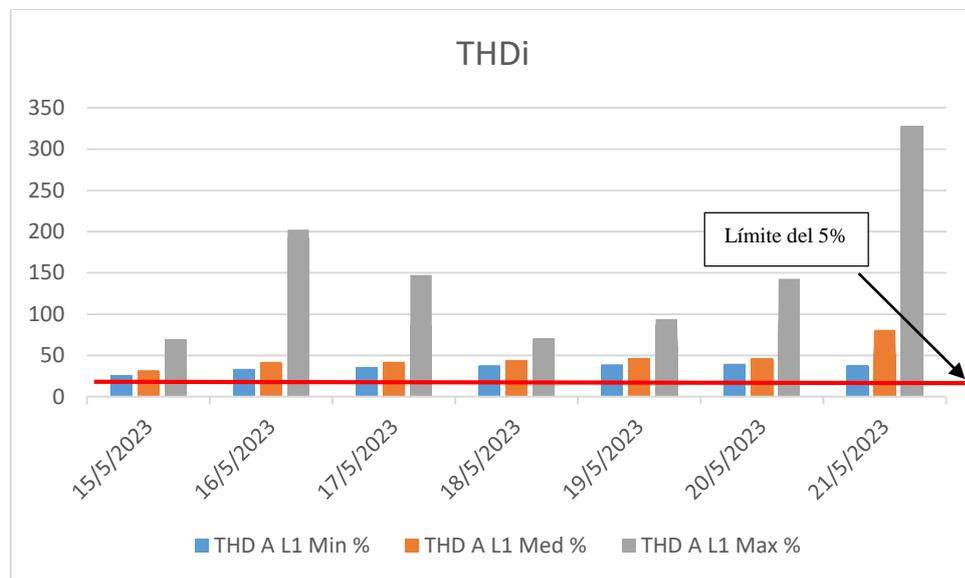


Fig. 49. THDi mínimo, medio y máximo.

### Armónicos individuales de corriente

En figura 49 se observan los resultados medidos de los armónicos individuales, los armónicos individuales superan los límites establecidos. En la tabla 9 se muestran los valores registrados durante la medición.



Fig. 50. Armónicos individuales de corriente.

TABLA IX

ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE REGISTRADOS

<b>Componente armónica</b>	<b>L1 (%)</b>	<b>Límite (%)</b>	<b>Cumple con la normativa</b>
H3	16,100	4	NO
H5	11.404	4	NO
H7	8,708	4	NO
H9	7,675	4	NO
H11	6,958	2	NO
H13	6,671	2	NO
H15	5,651	2	NO
H17	5,565	1,5	NO
H19	4,881	1,5	NO
H21	4,380	1,5	NO
H23	4,134	0,6	NO
H25	3,782	0,6	NO
H27	3,558	0,6	NO
H29	3,363	0,6	NO
H31	3,341	0,6	NO
H33	3,067	0,6	NO
H35	3,123	0,3	NO
H37	2,925	0,3	NO
H39	2,863	0,3	NO
H41	2,741	0,3	NO
H43	2,708	0,3	NO
H45	2,608	0,3	NO
H47	2,553	0,3	NO
H49	2,522	0,3	NO

En la figura 50 se muestran las ondas de voltaje y corriente del SFV N°3.

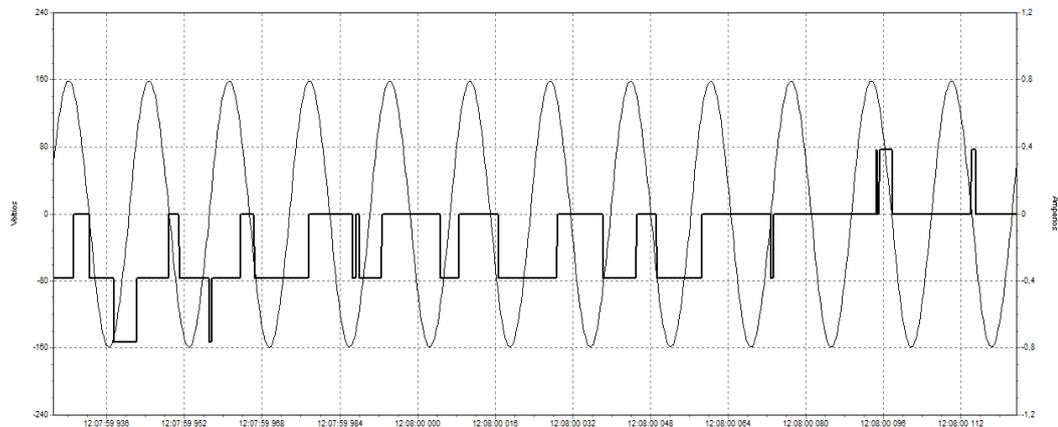


Fig. 51. Formas de onda de voltaje y corriente.

## 2.5 Conclusiones Capítulo II.

- La implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos en sectores de difícil acceso al sistema de distribución eléctrica, han permitido el desarrollo de emprendimientos, centros de investigación y viviendas, que además contribuyen con el cuidado del medio ambiente.
- Las mediciones realizadas con el Analizador de Energía Fluke 435 indican la presencia de distorsión en la calidad de energía, el SFV N°1 presenta armónicos de corriente del orden 3, 5, 7 y 13, mientras que los SFV N°2 y SFV N°3 muestran en todas las componentes armónicas de corriente que infringen los límites establecidos en la Normativa Ecuatoriana e Internacional.
- La presencia de cargas no lineales en los sistemas eléctricos y los componentes electrónicos de los inversores generan la presencia de distorsiones en la calidad de energía, la misma que debe ser mitigada para cumplir con las regulaciones establecidas.

## CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

### 3.1 Análisis de los resultados

En el Capítulo II se realizaron las mediciones de Armónicos en los inversores de los tres sistemas fotovoltaicos autónomos estudiados, a continuación se plantean mejoras para mitigar la presencia de dichas distorsiones armónicas.

#### 3.1.1 Modelado y simulación del inversor en Matlab/Simulink.

Para realizar el modelado de los inversores monofásicos analizados en esta investigación, se utiliza el entorno virtual Simulink de Matlab, programa que nos permite realizar la simulación del funcionamiento de estos inversores.

En general los tres inversores analizados en su electrónica disponen de tres partes principales:

1. El controlador SPWM (Sine Pulse Width Modulator) encargado de realizar los pulsos para el disparo de los IGBTs.
2. El inversor conformado por cuatro transistores IGBTs en configuración puente H.
3. La etapa de filtrado de tipo RLC.

Además de contar con los elementos de protección, transformadores y disipadores de calor. En la figura 51 se muestra el diseño implementado del inversor monofásico de puente H para el correspondiente análisis.

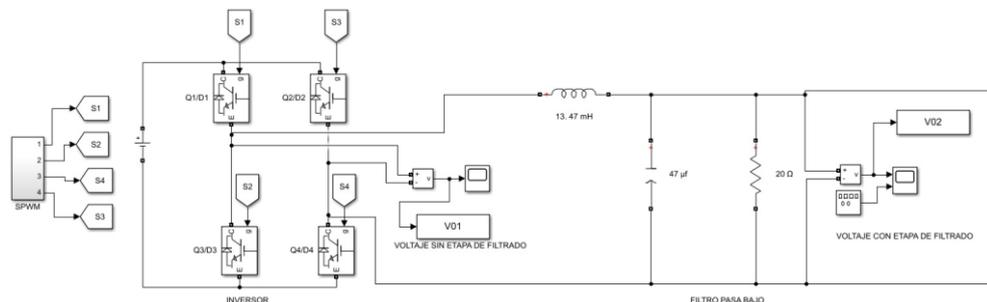


Fig. 52. Inversor monofásico simulado en Simulink.

### Simulación

Con la herramienta FFT (Fast Fourier Transform) de Matlab, se ejecuta la simulación del inversor modelado, en primera instancia se analiza el voltaje de

salida después del puente de H, la figura 52 muestra el resultado de la onda de voltaje y la distorsión armónica presente.

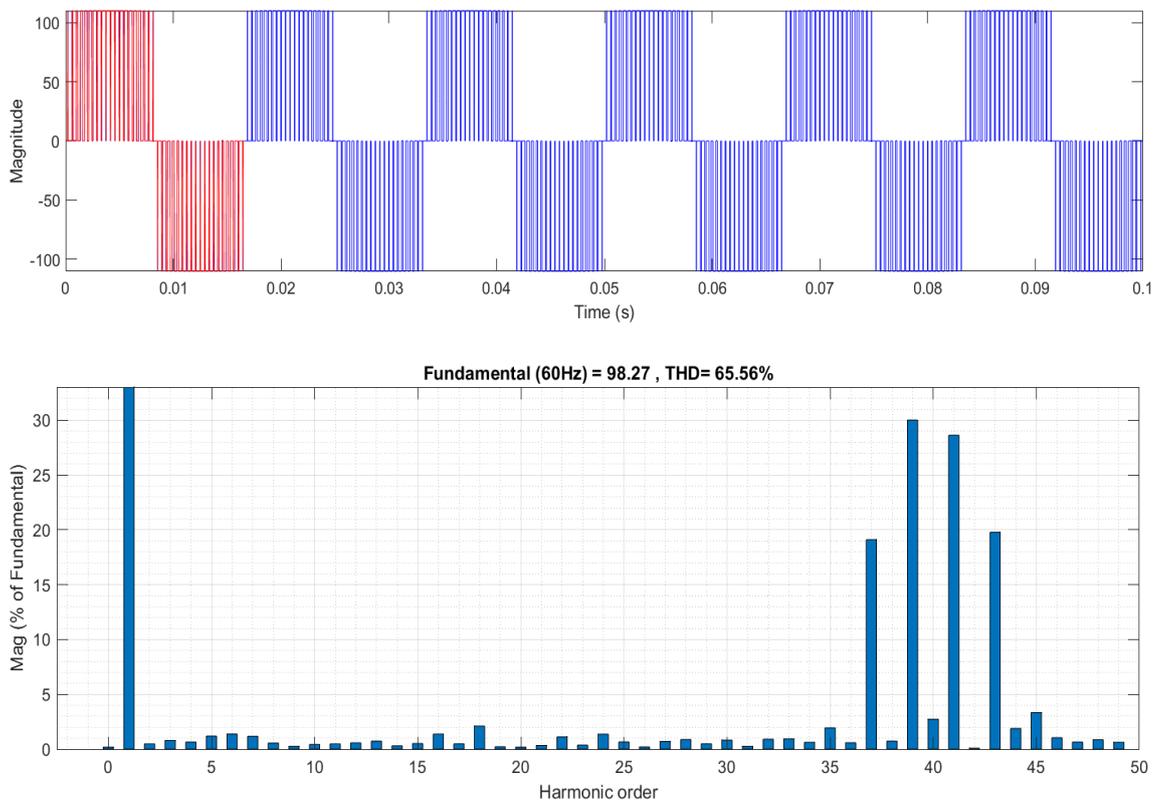
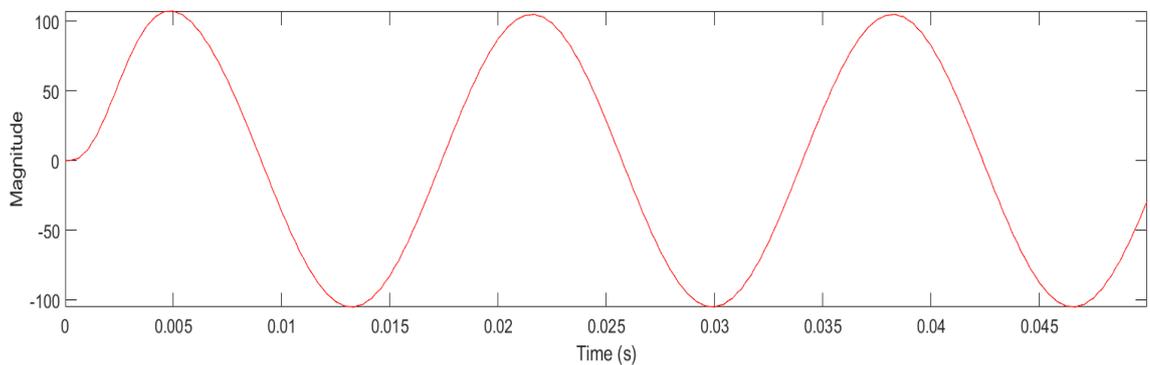


Fig. 53. Voltaje de salida y THD antes del filtro.

En la figura 53 se muestra el voltaje de salida después de la etapa de filtrado y el THD, se observa que la onda del voltaje es de forma sinusoidal y que además que el valor de la distorsión armónica se reduce.



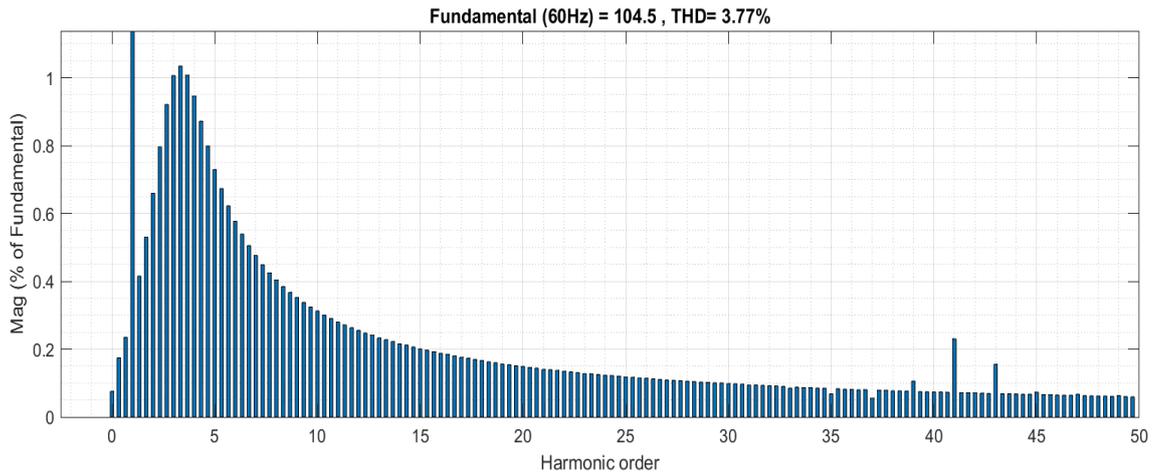


Fig. 54. Voltaje de salida y THD después del filtro.

Para analizar el comportamiento del inversor conectado a una carga eléctrica, se realiza la simulación con la conexión de cargas lineales y no lineales.

### Carga Lineal

Como se explicó en el Capítulo I, si se aplica una onda de voltaje sinusoidal, el resultado es una corriente sinusoidal. En la figura 54 se muestra la conexión de la carga eléctrica.

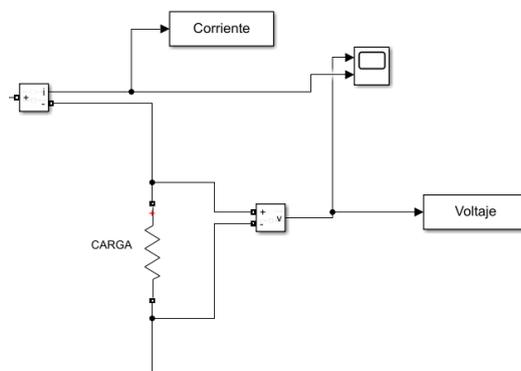


Fig. 55. Conexión de una carga lineal resistiva.

Se ejecuta la simulación y la figura 55 muestra la onda de voltaje y corriente, las mismas que son sinusoidales.

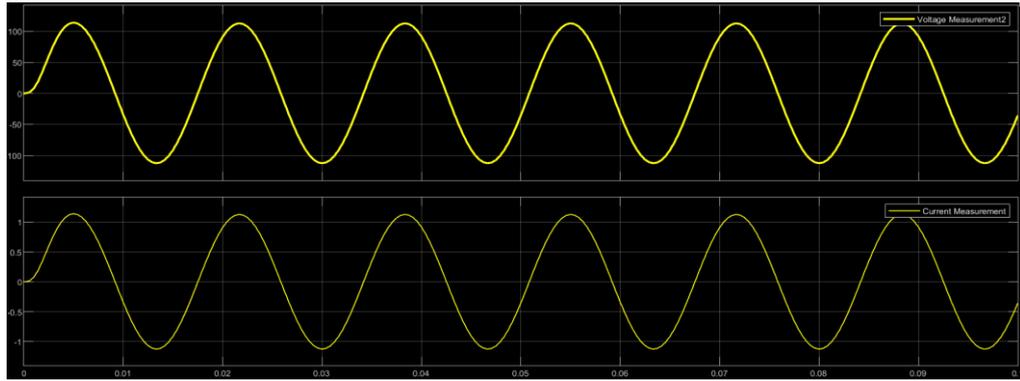


Fig. 56. Ondas de voltaje y corriente.

En la figura 56 y 57 se muestran los resultados de distorsión armónica del voltaje y la corriente. Los valores del THD de voltaje están por debajo del límite establecido del 8%, así como lo armónicos individuales que no superan el 5%.

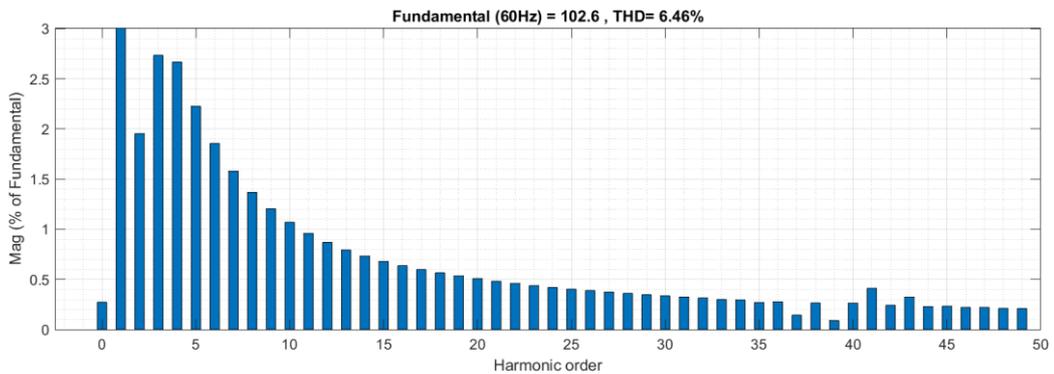


Fig. 57. THD de voltaje.

Los valores del THD de corriente están por debajo del 5% del límite establecido y además los armónicos individuales no superan los valores según la normativa IEEE Std 519-2014.

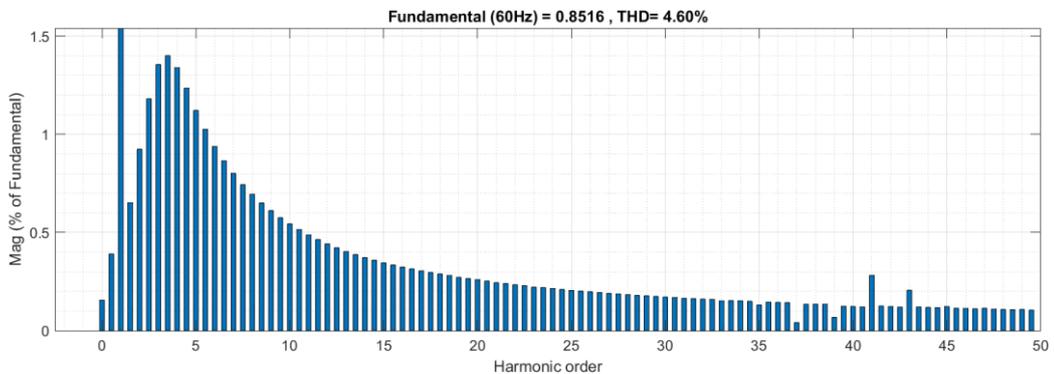


Fig. 58. THD de corriente..

## Carga No Lineal

Las cargas no lineales no se comportan de forma constante en el tiempo y por tal razón su onda de corriente no es sinusoidal respecto a la onda de voltaje aplicado, estas cargas son las más comunes en domicilios e industrias, la mismas que pueden producir distorsiones en la calidad de energía eléctrica.

En la figura 58 se muestra la conexión de la carga eléctrica.

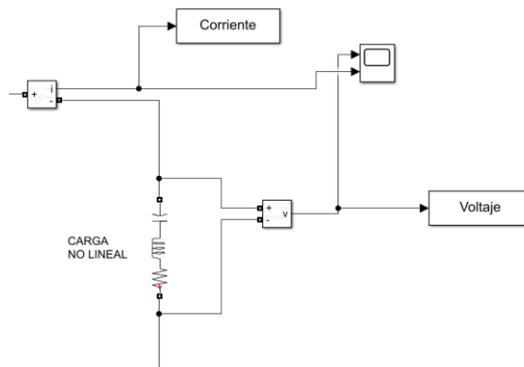


Fig. 59. Conexión de una carga no lineal.

En la figura 59 se muestra el resultado de las ondas de voltaje y corriente con una carga no lineal, se observa que la onda de corriente presenta distorsión en su forma.

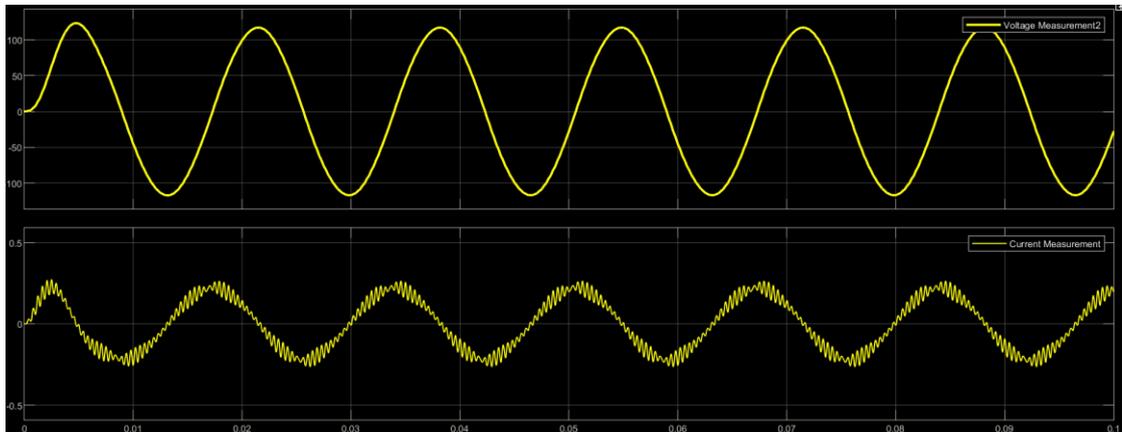


Fig. 60. Ondas de voltaje y corriente.

En las figuras 60 y 61 se muestran los valores de THD de voltaje y corriente, el THD de voltaje se encuentra en los límites establecidos así también los armónicos individuales de voltaje. El THD de corriente total e individuales se encuentran sobre los niveles establecidos.

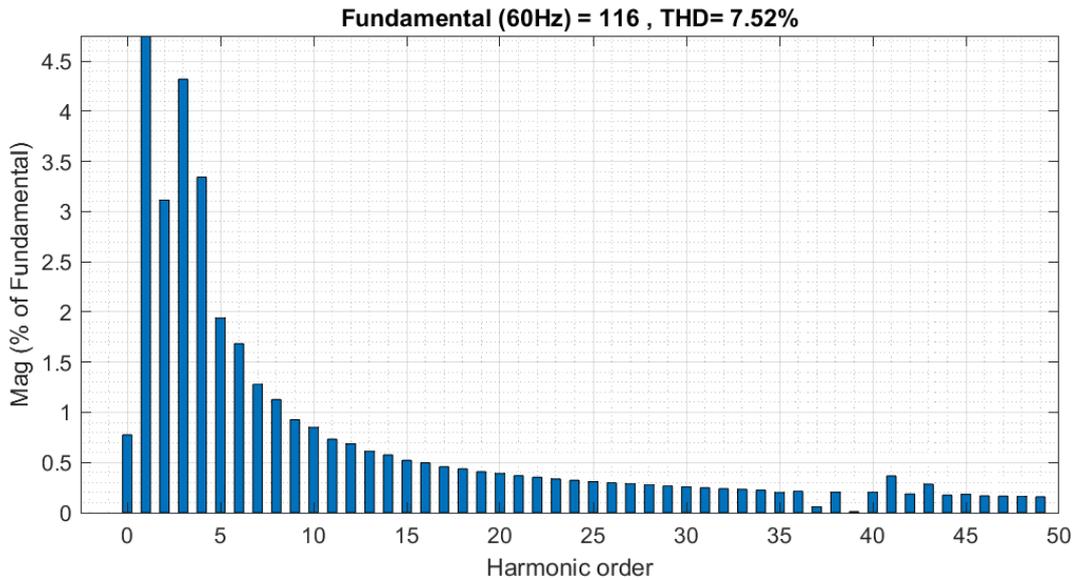


Fig. 61. THD de voltaje.

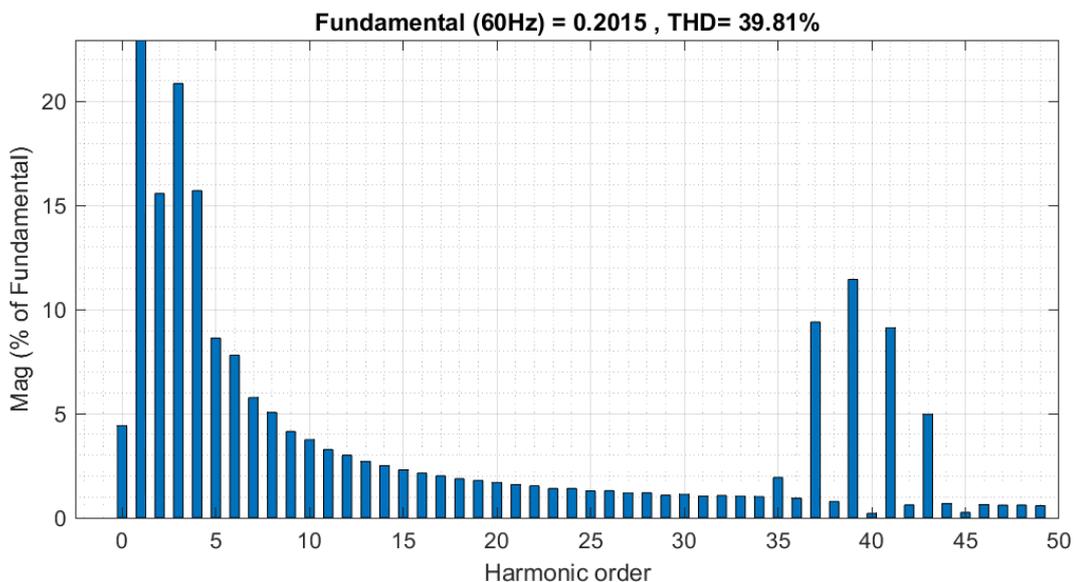


Fig. 62. THD de voltaje.

### 3.1.2 Compensación de los armónicos

Debido a la presencia de los armónicos en un circuito eléctrico, se necesita de soluciones para mitigar estas distorsiones. Para solucionar los problemas de armónicos se emplean filtros como se muestra en la figura 62 que pueden ser pasivos o activos. Los filtros pasivos aunque son más económicos, impiden compensar más allá de la frecuencia sintonizada, mientras que los filtros activos permiten eliminar en su totalidad los armónicos presentes en la red.

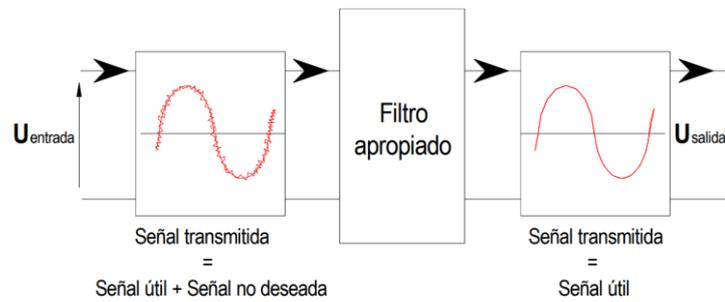


Fig. 63. Función del filtro.

Los tres inversores analizados en las mediciones del capítulo II y en la simulación realizada en el apartado 3.1.1 presentan distorsión armónica en la onda de corriente, por lo que se propone las siguientes opciones de mejora para mitigar la presencia de estos armónicos en la red eléctrica.

### Filtros pasivos

Están conformados por un banco de condensadores conectados a una inductancia y resistencia, es utilizado para eliminar una armónica determinada. En la figura 63 se muestra la configuración del filtro.

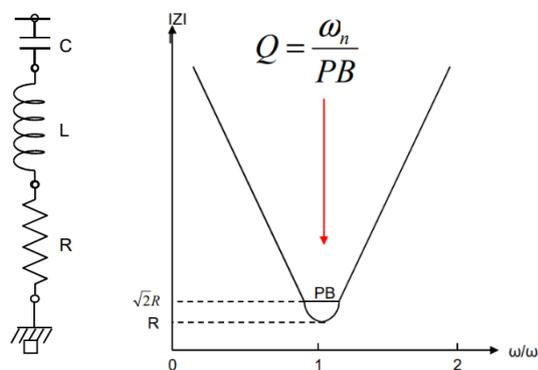


Fig. 64. Filtro sintonizado.

### Filtros amortiguados

Los más comunes y utilizados son los de segundo orden, tercer orden y tipo C como se muestra en la figura 64.

- a. Filtro de segundo orden
- b. Filtro de tercer orden
- c. Filtro tipo C.

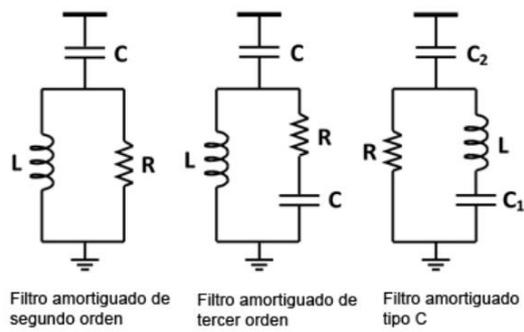


Fig. 65. Filtros amortiguadores.

### Filtro activo de corriente

Conocido también como filtro paralelo, permite la eliminación de los armónicos de corriente y mejora el factor de potencia de la carga, en la figura 65 se muestra la conexión del filtro.

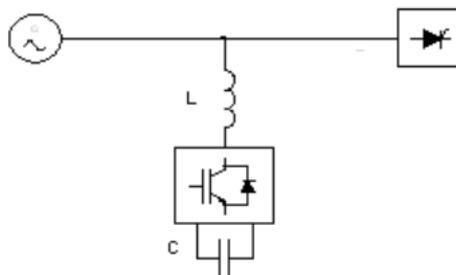


Fig. 66. Filtro activo de corriente

### Filtro activo de voltaje

Conocido también como filtro serie, elimina los armónicos de voltaje presentes en la red, logrando que la onda de corriente sea sinusoidal, en la figura 66 se muestra la conexión del filtro.

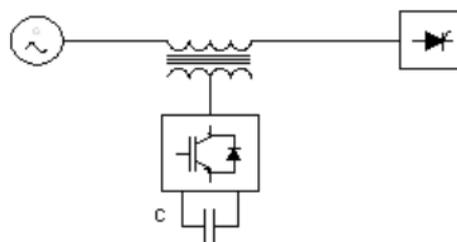


Fig. 67. Filtros amortiguadores.

### 3.1.3 Diseño del filtro y simulación en Simulink

Para la propuesta de mejora en los inversores de los sistemas fotovoltaicos estudiados, se plantea la implementación de un filtro pasivo, el mismo que se lo realiza en base a la normativa IEEE 1531-2003.

Para la simulación del filtro propuesto, se estima un consumo de la carga de 1000W con un factor de potencia de 0.85.

Con la herramienta FFT se obtiene el THD total de la corriente como se muestra en la figura 67 siendo del 21.96%, además se observa que el armónico de orden 3 presenta mayor porcentaje de distorsión.

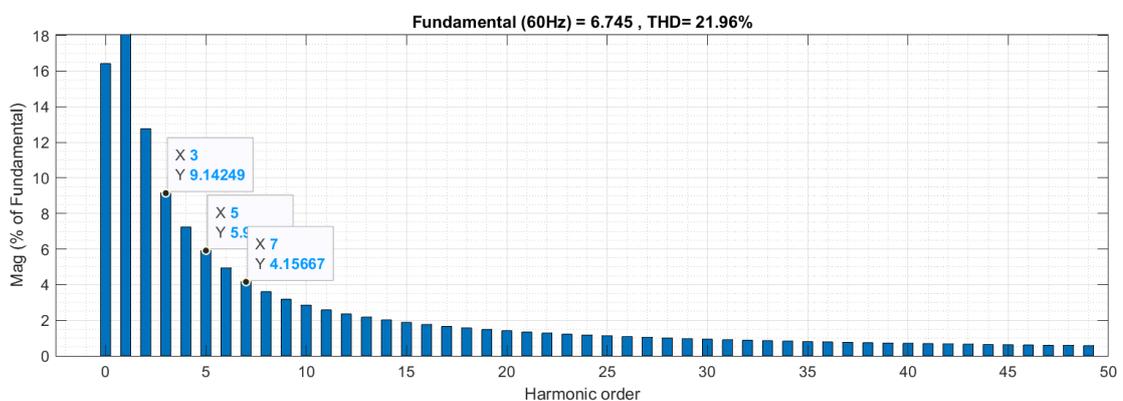


Fig. 68. THD sin filtro.

En la tabla 10 se muestran los 10 primeros registros de los armónicos generados en la simulación.

TABLA X

#### ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE

Componente armónica	L1 (%)	Límite (%)	Cumple con la normativa
H3	9.14	4	NO
H5	5.92	4	NO
H7	4.16	4	NO
H9	3.18	4	SI

### Eliminación del armónico de tercer orden.

Para el dimensionamiento del filtro se inicia con el cálculo de compensación reactiva que va aportar el filtro, mejorando el factor de potencia a 0.95.

$$Q = \tan(fp) * P = \tan(31.788^\circ) (1000W) \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$Q = 620VAR$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} * 0.95 = 18.19^\circ \quad \text{Ecuación 4.}$$

La compensación reactiva es la siguiente.

$$Q_c = [620VAR] - [1000W * \tan(18.19^\circ)] = 291VAR \quad \text{Ecuación 5.}$$

De acuerdo a la normativa IEEE 1531 2003, el filtro se sintonizará un 6% por debajo de 180Hz, este valor es 2.82 veces la frecuencia fundamental de 60 Hz.

$$X_{filtro} = \frac{V^2}{Q_c} = \frac{(120V)^2}{291VAR} = 49.5\Omega \quad \text{Ecuación 6.}$$

$$X_C = \frac{h^2}{h^2-1} \times X_{filtro} = \frac{2.82^2}{2.82^2-1} \times 49.5 = 56.62\Omega \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi(60Hz)(56.62)} = 46.85\mu f \quad \text{Ecuación 8.}$$

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{56.62\Omega}{(2.82)^2} = 7.12\Omega \quad \text{Ecuación 9.}$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{7.12\Omega}{2\pi(60Hz)} = 18.89mH \quad \text{Ecuación 10.}$$

Con un factor de calidad de 20 se tiene.

$$R = \frac{X_L}{Q} = \frac{7.12\Omega}{20} = 0.35\Omega \quad \text{Ecuación 11.}$$

Los valores de R, L y C se ingresan en el filtro simulado en Simulink, la figura 68 muestra los parámetros ingresados.

Resistance (Ohms):

Inductance (H):

Set the initial inductor current

Capacitance (F):

Fig. 69. Parámetros ingresados al filtro.

La figura 69 muestra la THD después de la implementación del filtro que es de 8.04% y la tabla 11 los valores obtenidos de las armónicas individuales.

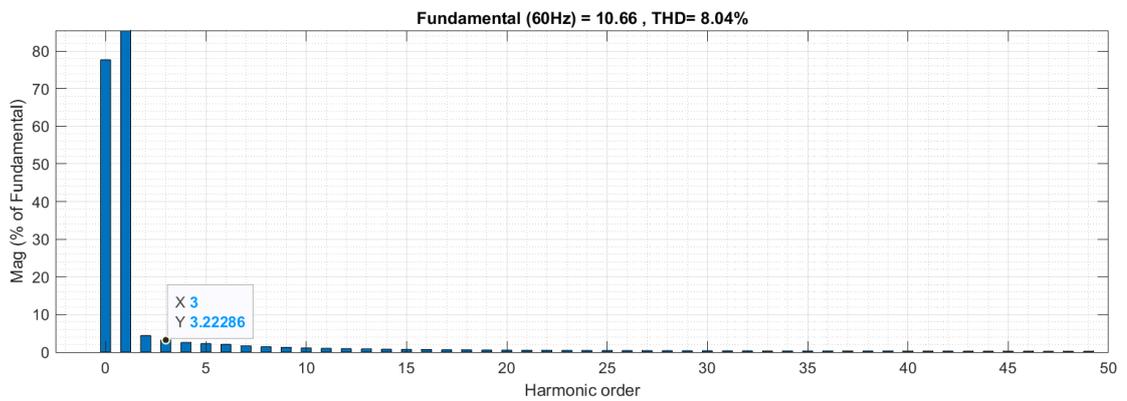


Fig. 70. THD con el filtro simulado.

TABLA XI

ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE

Componente armónica	L1 (%)	Límite (%)	Cumple con la normativa
H3	3.22	4	SI
H5	2.28	4	SI
H7	1.67	4	SI
H9	1.25	4	SI

### 3.2 Validación técnica -económica de los resultados

Después de haber realizado el análisis y la simulación del filtro pasivo para la reducción del armónico de tercer orden, se busca cotizaciones de filtros similares en el mercado.

TABLA XII  
ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE

<b>Modelo</b>	<b>Precio</b>
Filtro EMI 115/250 VAC 10A	\$15.00
Filtro IEC 10A 110V	\$25.00

### 3.3 Evaluación de expertos

#### **CERTIFICADO DE VALIDACIÓN DEL VERIFICADOR**

En mi calidad de verificador del tema del proyecto de investigación y desarrollo titulado “Análisis de los armónicos generados en los inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales”, del posgraduado:

**APELLIDOS:** Barrionuevo Simbaña

**NOMBRES:** Alex Paul

**PROGRAMA:** Maestría en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

#### **CERTIFICO:**

Que: se ha realizado el diagnóstico el tema del proyecto de investigación y desarrollo, presentado como requisito previo a la aprobación y desarrollo del trabajo de titulación para optar por el grado de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

**Revisado por:** Ing. Octavio Edelberto Guijarro Rubio.

**Cédula de ciudadanía N°:** 1600399875

**Profesión:** Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones

**Posgrado:** Magister en Automatización y Sistemas de Control

Sugiero su aprobación y permita continuar con el diseño del proyecto de investigación y desarrollo.

Puyo, junio de 2023



Mgs. Octavio Edelberto Guijarro Rubio

### **3.4 Conclusiones del capítulo III**

- Mediante la simulación del inversor monofásico en Simulink, el voltaje de salida después del puente H de IGBTs presenta una forma de onda cuadrada sinusoidal, resultado del circuito de control SPWM, después de la etapa de filtrado propia de cada inversor se logra obtener una onda sinusoidal pura, ideal para los circuitos alternos.
- La presencia de cargas lineales, no lineales y de equipos con circuitos electrónicos conmutables como los inversores, generan distorsiones en la calidad de la energía eléctrica, lo que conlleva a implementarse soluciones de filtrado para la mitigación de las componentes armónicas presentes en la corriente y/o voltaje.
- Los resultados obtenidos después de haber realizado el diseño y simulación del filtro para mitigar el armónico de orden 3, comprueba la importancia y función del mismo para corregir los problemas de distorsión en una instalación eléctrica.

#### **Conclusiones generales**

- Con la ayuda de fuentes bibliográficas de proyectos similares al realizado, se observa que estos estudios respaldan la investigación propuesta y la importancia de implementar metodologías para medir y mitigar las distorsiones armónicas presentes en una instalación eléctrica.
- Mediante las mediciones realizadas con el analizador de calidad de energía Fluke 435 en los tres sistemas fotovoltaicos autónomos, se observa la presencia de distorsiones armónicas en la onda de corriente.
- En el SFV N°1 los valores en porcentaje de los armónicos del orden 3, 5, 7, y 13 de 21.51%, 6.795%, 5.109% y 2.230% respectivamente se encuentran por encima de los valores establecidos en la normativa ARCERNNR 002/20 y en la IEEE Std. 519, mientras que en los SFV N°2 y N°3 las armónicas individuales de corriente infringen a los límites establecidos en estas normativas de regulación.
- La simulación de un inversor realizado en Simulink/Matlab, permite analizar el funcionamiento de cada una de las partes que lo componen, la etapa de control SPWM que se encarga de generar los pulsos para la conmutación de los IGBTs,

la etapa de potencia compuesta por los transistores y la etapa de filtrado compuesta por elementos pasivos.

- El diseño del filtro pasivo para mitigar el tercer armónico reduce la distorsión del 9.14% al 3.22%, así mismo se reduce el THD del 21.96% al 8.04%.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda realizar mediciones en sistemas fotovoltaicos autónomos de mayor capacidad de potencia generada, para analizar la presencia de distorsión armónica y plantear soluciones para mitigar estas anomalías.
- Se recomienda la utilización de equipos adecuados para el análisis de la calidad de energía como el utilizado en esta investigación, para así obtener lecturas fiables en la instalación eléctrica intervenida.
- Se recomienda la utilización de filtros pasivos para la mitigación de las distorsiones armónicas que se generan en una instalación eléctrica al conectarse un sistema fotovoltaico mediante un inversor de CD a CA.
- Se recomienda analizar otras alternativas de filtrado a la propuesta en este trabajo de investigación.

### **Referencias bibliográficas.**

- [1] J. Vera and W. Mereles, “Modelo de Simulación para Sistemas Fotovoltaicos Autónomos en entorno MATLAB / SIMULINK,” pp. 82–90, 2009.
- [2] I. Horikoshi, “Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red,” 2009, [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/6901>.
- [3] L. A. Escuela, “Escuela politécnica nacional,” 2020.
- [4] K. Cortés Diaz, “Diseño de un sistema de microgeneración fotovoltaico, conectado a la red de distribución de baja tensión para la facultad de la energía, las industrias y los recursos naturales no renovables considerando la regulación,” vol. 1, p. 100, 2015, [Online]. Available: <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/14070>.

- [5] L. Herrera, “Diseño del sistema de generación eléctrica conectado a la red utilizando paneles fotovoltaicos para el autoconsumo del complejo deportivo PLATAFORMA DEPORTIVA ubicada en el cantón Latacunga Provincia de Cotopaxi,” Univ. Técnica Cotopaxi, vol. 1, p. 125, 2018, [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4501/1/PI-000727.pdf>.
- [6] U. A. D. E. Ingeniería and C. D. E. I. Eléctrica, “Comunidad al servicio del Pueblo Y CONSTRUCCIÓN,” 2018.
- [7] D. H. Lasluisa Morocho and C. D. Tobar Jami, “Sistema Fotovoltaico Para Suministro De Energía Eléctrica En Vivienda Aislada,” Univ. Técnica Cotopaxi Fac., vol. 1, p. 101, 2018.
- [8] R. Quintana, “Diseño De Un Sistema De Abastecimiento De Energía Eléctrica Con El Uso Deenergías Renovables Como La Solar En Viviendas Unifamiliares En La Parroquia Atahualpa, Cantón Ambato, Provincia Tungurahua,” pp. 1–194, 2020.
- [9] D. D. E. Ingeniería, E. Y. Electrónica, C. Eduardo, P. Santana, and D. C. Bogotá, “Presentado a,” pp. 1–43, 2017.
- [10] A. Para and Z. Rurales, “Escuela politécnica nacional,” 2020.
- [11] N. P. Tupiza García and W. D. Pavón Vallejos, “Control de armónicos de corriente mediante la implementación de un filtro activo unificado usando control proporcional integral en el sistema de distribución con generación fotovoltaica.,” Univ. Politécnica Sales., pp. 5–33, 2022.
- [12] D. Armijos Armijos and C. Encarnación Castro, Análisis de un sistema fotovoltaico residencial acoplado a la red utilizando un convertidor Q-Z con acumuladores de energía. 2018.
- [13] M. A. Ponce-jara, C. Velásquez-figueroa, and G. Velásquez-figueroa, “[Http://Dx.Doi.Org/10.35381/R.K.V5I2.960](http://Dx.Doi.Org/10.35381/R.K.V5I2.960),” vol. V, pp. 98–130, 2020.
- [14] D. H. Lemus, “Análisis del efecto de la variación de parámetros del

controlador PWM y de la carga en el THDi de una micro red basada en generación fotovoltaica.,” p. 97, 2018.

- [15] R. H. Locón, “Detección Y Corrección De Armónicos En Inversores De Energía Solar, Implementando Sistemas Embebidos En Tiempo Real,” p. 112, 2020.
- [16] M. Peñafiel, A. Joel, G. Bravo, and D. Andrés, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL CARRERA DE ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICOS APLICADOS AL ÁREA RESIDENCIAL EN UN SECTOR COSTERO DE LA PROVINCIA DEL GUAYAS , ECUADOR Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico Gu,” 2022.
- [17] C. Grijalva Campoverde and F. Vélez Mosquera, ““Estudio e implementación de un Sistema Fotovoltaico aplicado a luminarias: Caso de estudio Unidad educativa Dr. Francisco Falquez Ampuero”,” Univ. Politec. Sales., vol. 0, no. 0, pp. 1–97, 2020.
- [18] P. D. E. Cargas, N. O. Lineales, A. Steven, M. Atiencia, L. Francisco, and O. Santana, “Comportamiento de un sistema fotovoltaico en presencia de cargas no lineales,” 2022.
- [19] G. A. (Universidad N. de C. Vargas Marín, “Evaluación de los cambios en los indicadores de calidad de potencia en el sistema de distribución eléctrica debido a la entrada de paneles solares a partir de un modelo de red típica,” pp. 1–98, 2020.
- [20] M. P. Llerena Barragán and J. E. Menéndez Velásquez, “Diseño E Implementación De Un Inversor De Conexión a La Red (Grid-Tie Inverter) Para Paneles Fotovoltaicos,” p. 105, 2015.
- [21] P. F. I. N. D. E. Carrera, “Ingeniería Técnica Industrial Electrónica Industrial.”
- [22] M. A. Abella, F. C. Romero, and S. D. B. Fotovoltaico, “Master en Energías

Renovables y Mercado Energético Energía Solar Fotovoltaica Escuela de Organización Industrial Sistemas de Bombeo Fotovoltaico,” *Dimens. Sist. Fotovoltaicos*, vol. 1, no. 1, p. 73, 2017.

- [23] I. David and A. Porras, “Estrategia de Control para VSI con Filtro LC de Dos Etapas,” 2019.
- [24] S. De and E. De, “Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior De Ingeniería Mecánica Y Eléctrica Sistema De Generación Fotovoltaico Con Máxima Transferencia De Potencia Tesis,” 2018.
- [25] Prosumidores, “Inversores y baterías,” *Acad. las Renov.*, pp. 1–30, 2018, [Online]. Available: [https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/12/Módulo-4-Inversores-reguladores baterías.pdf](https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/12/Módulo-4-Inversores-reguladores-baterías.pdf).
- [26] I. Final, D. E. T. D. E. Grado, E. N. Modalidad, and E. Y. Seminario, “24 De Julio De 2021,” 2021.
- [27] J. A. Arias and C. S. Pullaguari, “Análisis De La Calidad De Energía En La Red De Baja Tensión Del Transformador #19597P, Debido a La Conexión Del Sistema De Generación Fotovoltaico Para Electromovilidad En La Universidad Politécnica Salesiana,” p. 140, 2019, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18041>.
- [28] N. E. Cortes Vallarades and H. E. Valladares Coredero, “Estudio de los efectos en el factor de potencia y en el contenido armónico producido por el montaje de un generador fotovoltaico en una instalación eléctrica,” pp. 1–143, 2017.
- [29] D. H. Domínguez Guamán and B. G. Salvatierra Cánepa, “Análisis de calidad de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos conectados a la red,” p. 93, 2016, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12710>.
- [30] ARCERNNR, “Regulación 002/20 - Calidad del servicio de distribución y

comercialización.” p. 36, 2020, [Online]. Available:  
<https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2021/01/Regulacion-002-20.pdf>.

# ANEXOS

**Anexo 1.**

## SunPower® X-Series Commercial Solar Panels | X21-345-COM

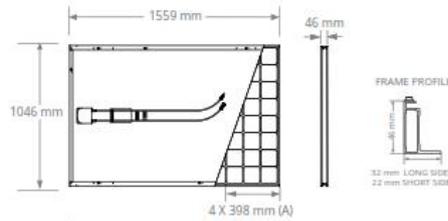
Electrical Data		
	SPR-X21-345-COM	SPR-X20-327-COM
Nominal Power (Pnom) <sup>1</sup>	345 W	327 W
Power Tolerance	+5/-3%	+5/-3%
Avg. Panel Efficiency <sup>2</sup>	21.5%	20.3%
Rated Voltage (Vmpp)	57.3 V	57.3 V
Rated Current (Impp)	6.02 A	5.71 A
Open-Circuit Voltage (Voc)	68.2 V	67.6 V
Short-Circuit Current (Isc)	6.39 A	6.07 A
Max. System Voltage	1000 V UL & 1000 V IEC	
Maximum Series Fuse	15 A	
Power Temp Coef.	-0.29% / °C	
Voltage Temp Coef.	-167.4 mV / °C	
Current Temp Coef.	2.9 mA / °C	

Tests And Certifications	
Standard Tests <sup>7</sup>	UL1703 (Type 2 Fire Rating), IEC 61215, IEC 61730
Management System Certs	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
EHS Compliance	RoHS, OHSAS 18001:2007, lead free, REACH SVHC-163, PV Cycle
Sustainability	Cradle to Cradle Certified™ Silver (contributes to LEED categories) <sup>8</sup>
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	10.1109/PVSC.2013.6744437
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	1000V; IEC62804, PVEL 600hr duration
Available Listings	UL, TUV, CEC

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40° F to +185° F (-40° C to +85° C)
Impact Resistance	1 inch (25 mm) diameter hail at 52 mph (23 m/s)
Appearance	Class B
Solar Cells	96 Monocrystalline Moxeon Gen III
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP-65, MC4 Compatible
Weight	41 lbs (18.6 kg)
Max. Load	Wind: 50 psf, 2400 Pa front & back Snow: 112 psf, 5400 Pa front
Frame	Class 2 silver anodized; stacking pins

### REFERENCES:

- 1 SunPower 360W compared to a Conventional Panel on same sized arrays (200W, 10% efficient, approx. 1.6 m<sup>2</sup>), 4% more energy per watt (based on 3ply module characterization and PVSim), 0.75%/yr slower degradation (Campeau, Z. et al. "SunPower Module Degradation Rate," SunPower white paper, 2013)
- 2 "SunPower Module 40-Year Useful Life" SunPower white paper, May 2015. Useful life is 99 out of 100 panels operating at more than 70% of rated power.
- 3 X-Series same as E-Series, 5 of top 8 panel manufacturers, tested in 2013 report, 3 additional panels in 2014. Ferrara, C., et al. "Fraunhofer PV Durability Initiative for Solar Modules Part 2," Photovoltaics International, 2014.
- 4 See [us.sunpower.com/home-solar-system-warranty/](http://us.sunpower.com/home-solar-system-warranty/) for more details.
- 5 Standard Test Conditions (1000 W/m<sup>2</sup> irradiance, AM 1.5, 25° C), NREL calibration Standard: 30MS current, LACCS FF and Voltage.
- 6 Based on average of measured power values during production.
- 7 Type 2 fire rating per UL1703-2013, Class C fire rating per UL1703-2002.
- 8 See salesperson for details.



Please read the safety and installation guide.

## Anexo 2.

Inversor Phoenix	12 voltios 24 voltios 48 voltios	12/250 24/250 48/250	12/375 24/375 48/375	12/500 24/500 48/500	12/800 24/800 48/800	12/1200 24/1200 48/1200
Potencia cont. a 25°C (1)	250VA / 375VA / 500VA / 800VA / 1200VA					
Potencia cont. a 25°C / 40°C	200 / 175W / 300 / 260W / 400 / 350W / 650 / 560W / 1000 / 850W					
Pico de potencia	400W / 700W / 900W / 1500W / 2200W					
Tensión / frecuencia CA de salida (ajustable)	230VCA o 120VCA +/- 3% 50Hz o 60Hz +/- 0,1%					
Rango de tensión de entrada	9,2 - 17 / 18,4 - 34,0 / 36,8 - 62,0V					
Desconexión por CC baja (ajustable)	9,3 / 18,6 / 37,2V					
Dinámica (dependiente de la carga)	Desconexión dinámica, ver					
Desconexión por CC baja (totalmente ajustable)	<a href="https://www.victronenergy.com/live/vv-direct:phoenix-inverters-dynamic-cutoff">https://www.victronenergy.com/live/vv-direct:phoenix-inverters-dynamic-cutoff</a>					
Reinicio y alarma por CC baja (ajustable)	10,9 / 21,8 / 43,6V					
Detector de batería cargada (ajustable)	14,0 / 28,0 / 56,0V					
Eficacia máx.	87 / 88 / 88%	89 / 89 / 90%	90 / 90 / 91%	90 / 90 / 91%	91 / 91 / 92%	
Consumo en vacío	4,2 / 5,2 / 7,9W	5,6 / 6,1 / 8,5W	6 / 6,5 / 9W	6,5 / 7 / 9,5W	7 / 8 / 10W	
Consumo en vacío predeterminado en modo ECO (Intervalo de reintento: 2,5 s, ajustable)	0,8 / 1,3 / 2,5W	0,9 / 1,4 / 2,6W	1 / 1,5 / 3,0W	1 / 1,5 / 3,0W	1 / 1,5 / 3,0	
Ajuste de potencia de parada y arranque en modo ECO	Ajustable					
Protección (2)	a - f					
Rango de temperatura de trabajo	-40 to +65°C (refrigerado por ventilador) (reducción de potencia del 1,25% por cada °C por encima de 25°C)					
Humedad (sin condensación)	máx. 95%					
<b>CARCASA</b>						
Material y color	Chasis de acero y carcasa de plástico (azul RAL 5012)					
Conexión de la batería	Bornes de tornillo					
Sección de cable máxima:	10mm <sup>2</sup> / AWG8	10mm <sup>2</sup> / AWG8	10mm <sup>2</sup> / AWG8	25/10/10mm <sup>2</sup> / AWG4/8/8	35/25/25 mm <sup>2</sup> / AWG 2/4/4	
Tomas de corriente CA estándar	230V: Schuko (CEE 7/4), IEC-320 (enchufe macho incluido) UK (BS 1363), AU/NZ (AS/NZS 3112) 120V: Nema 5-15R					
Tipo de protección	IP 21					
Peso	2,4kg / 3,3lbs	3,0kg / 6,6lbs	3,9kg / 8,5lbs	5,5kg / 12lbs	7,4kg / 16,3lbs	
Dimensiones (al x an x p en mm.) (al x an x p, pulgadas)	86 x 165 x 260 3.4 x 6.5 x 10.2	86 x 165 x 260 3.4 x 6.5 x 10.2	86 x 172 x 275 3,4 x 6,8 x 10,8	105 x 216 x 305 4.1 x 8.5 x 12.1 (12V modelo: 105 x 230 x 325)	117 x 232 x 327 4.6 x 9.1 x 12.9 (12V modelo: 117 x 232 x 362)	
<b>ACCESORIOS</b>						
On/Off remoto	Sí					
Conmutador de transferencia automático	Filax					
<b>ESTÁNDARES</b>						
Seguridad	EN-IEC 60335-1 / EN-IEC 62109-1					
EMC	EN 55014-1 / EN 55014-2 / IEC 61000-6-1 / IEC 61000-6-2 / IEC 61000-6-3					
Directiva de automoción	ECE R10-4					
1) Carga no lineal, factor de cresta 3:1 2) Claves de protección: a) cortocircuito de salida b) sobrecarga c) tensión de la batería demasiado alta d) tensión de la batería demasiado baja h) temperatura demasiado alta f) ondulación CC demasiado alta						

### Anexo 3.

El kit del analizador contiene los siguientes elementos:

*Nota:*

*Esta nota de envío refleja el contenido del producto estándar. El contenido de una versión especial puede ser distinto. La diferencia se indica en un suplemento del manual que forma parte del envío.*

*Nota:*

*De fábrica, la batería de iones de litio recargable del analizador no está cargada. Consulte el Capítulo 4 – Conexión del analizador.*

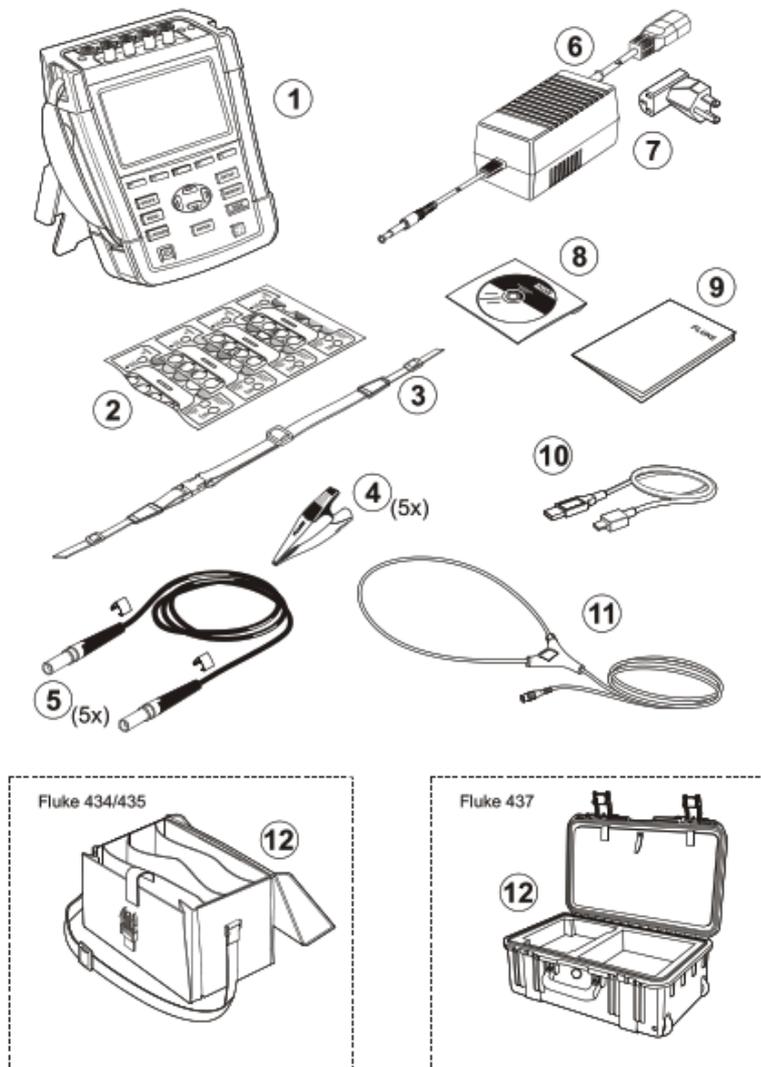
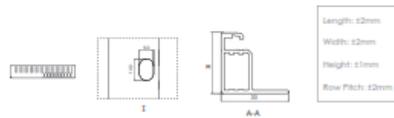
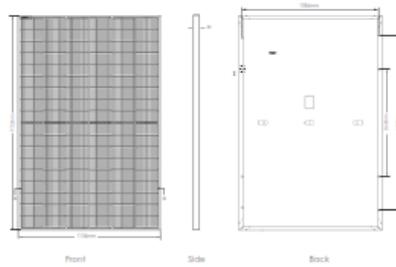


Figura 1-1. Contenido del kit del analizador

## Anexo 4.

### Engineering Drawings

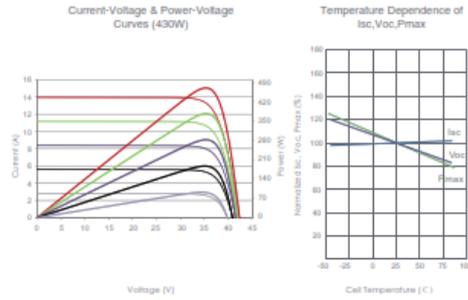


### Packaging Configuration

[ Two pallets = One stack ]

36pcs/pallets, 72pcs/stack, 936pcs/ 40HQ Container

### Electrical Performance & Temperature Dependence



### Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	108 (6×18)
Dimensions	1722×1134×30mm (67.79×44.65×1.18 inch)
Weight	22 kg (48.50 lbs)
Front Glass	3.2mm Anti Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

### SPECIFICATIONS

Module Type	JKM410N-54HL4		JKM415N-54HL4		JKM420N-54HL4		JKM425N-54HL4		JKM430N-54HL4	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	410Wp	308Wp	415Wp	312Wp	420Wp	316Wp	425Wp	320Wp	430Wp	323Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	31.13V	29.06V	31.32V	29.21V	31.51V	29.34V	31.70V	29.50V	31.88V	29.63V
Maximum Power Current (Imp)	13.17A	10.61A	13.25A	10.68A	13.33A	10.76A	13.41A	10.83A	13.49A	10.91A
Open-circuit Voltage (Voc)	37.73V	35.84V	37.92V	36.02V	38.11V	36.20V	38.30V	36.38V	38.49V	36.56V
Short-circuit Current (Isc)	13.91A	11.23A	13.99A	11.29A	14.07A	11.36A	14.15A	11.42A	14.23A	11.49A
Module Efficiency STC (%)	21.00%		21.25%		21.51%		21.76%		22.02%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.30%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.23%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.046%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

\*STC: ☀ Irradiance 1000W/m<sup>2</sup> 🌡 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5  
 NOCT: ☀ Irradiance 800W/m<sup>2</sup> 🌡 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌬 Wind Speed 1m/s

©2021 Jinko Solar Co., Ltd. All rights reserved.  
 Specifications included in this datasheet are subject to change without notice. JKM410-430N-54HL4-(V)-F1-EN-EU Only (IEC 2016)  
 Datasheet valid in Europe only.

## Anexo 5.

Quattro	48/3000/35-50/50 120V	12/5000/220-100/100 120V 24/5000/120-100/100 120V 48/5000/70-100/100 120V	48/10000/140-100/100 120V
PowerControl / PowerAssist	Yes		
Integrated Transfer switch	Yes		
AC Inputs (2x)	Input voltage range: 90-140 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz Power factor: 1		
Maximum feed through current	2x 50 A	2x 100 A	2x 100 A
<b>INVERTER</b>			
Input voltage range	9,5 – 17 V 19 – 33V 38 – 66 V		
Output (1)	Output voltage: 120 VAC ± 2% Frequency: 60 Hz ± 0,1%		
Cont. output power at 25°C (3)	3000 VA	5000 VA	10000 VA
Cont. output power at 25°C	2400 W	4000 W	8000 W
Cont. output power at 40°C	2200 W	3700 W	6500 W
Cont. output power at 65°C	1700 W	3000 W	4500 W
Peak power	6000 W	10000 W	20000 W
Maximum efficiency	94 %	94 / 94 / 95 %	96 %
Zero load power	25 W	30 / 30 / 35 W	60 W
Zero load power In AES mode	20 W	20 / 25 / 30 W	40 W
Zero load power In Search mode	12 W	10 / 10 / 15 W	15 W
<b>CHARGER</b>			
Charge voltage 'absorption' (V DC)	57,6 V	14,4 / 28,8 / 57,6 V	57,6 V
Charge voltage 'float' (V DC)	55,2 V	13,8 / 27,6 / 55,2 V	55,2 V
Storage mode (V DC)	52,8 V	13,2 / 26,4 / 52,8 V	52,8 V
Charge current house battery (A) (4)	35 A	200 / 120 / 70 A	140 A
Charge current starter battery (A)	4 A (12V and 24V models only)		
Battery temperature sensor	Yes		
<b>GENERAL</b>			
Auxiliary output (5)	32 A	50 A	50 A
Programmable relay (6)	3x		
Protection (2)	a-g		
VE.Bus communication port	For parallel, split phase and three phase operation, remote monitoring and system integration		
General purpose com. port	2x		
Remote on-off	Yes		
Common Characteristics	Operating temp.: -40 to +65°C		Humidity (non-condensing): max. 95%
<b>ENCLOSURE</b>			
Common Characteristics	Material & Colour: aluminium (blue RAL 5012) Protection category: IP 21		
Battery-connection	Four M8 bolts (2 plus and 2 minus connections)		
120 V AC-connection	Screw terminals 13 mm <sup>2</sup> (6 AWG)	Bolts M6	
Weight (kg)	42 lb 19 kg	75 / 66 / 66 lb 34 / 30 / 30 kg	128 lb 58 kg
Dimensions (hxwxwd)	14.3 x 10.2 x 8.6 Inch 362 x 258 x 218 mm	18,5 x 14,0 x 11,2 Inch	470 x 350 x 280 mm
		17,5 x 13,0 x 9,6 Inch	444 x 328 x 240 mm
		17,5 x 13,0 x 9,6 Inch	444 x 328 x 240 mm
<b>STANDARDS</b>			
Safety	EN-IEC 60335-1, EN-IEC 60335-2-29, EN-IEC 62109-1		
Emission, immunity	EN 55014-1, EN 55014-2, EN-IEC 61000-3-2, EN-IEC 61000-3-3, IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-3		
Road vehicles	12V and 24V models: ECE R10-5		
Anti-islanding	See our website		
1) Can be adjusted to 60 Hz; 120 V 60 Hz on request			
2) Protection key: a) output short circuit b) overload c) battery voltage too high d) battery voltage too low e) temperature too high f) 120 VAC on inverter output g) input voltage ripple too high	3) Non-linear load, crest factor 3:1 4) Up to 25°C ambient 5) Switches off when no external AC source available 6) Programmable relay that can a.o. be set for general alarm, DC under voltage or genset start/stop function AC rating: 230 V / 4 A DC rating: 4 A up to 35 VDC, 1 A up to 60 VDC		

## Anexo 6.

# EOS MONO by Eco Green Energy

EGE-380/400M-72

### ELECTRICAL DATA AT STC\*

Power output (Pmax)	380 W	385 W	390 W	395 W	400 W
Power tolerance	0~+5 W				
Module efficiency	19.15 %	19.41 %	19.66 %	19.91 %	20.16%
Maximum power voltage (Vmp)	39.50 V	39.65 V	39.76 V	39.86 V	39.92 V
Maximum power current (Imp)	9.62 A	9.71 A	9.81 A	9.91 A	10.02 A
Open circuit voltage (Voc)	48.20 V	48.25 V	48.37 V	48.48 V	48.6 V
Short circuit current (Isc)	9.99 A	10.08 A	10.18 A	10.28 A	10.4 A

\*Standard Test Conditions (STC) : Irradiance : 1,000 W / m<sup>2</sup> • Cell temperature : 25°C • AM : 1.5

### ELECTRICAL DATA AT NOCT\*\*

Power output (Pmax)	283.34 W	287.07 W	290.79 W	294.52 W	298.25 W
Maximum power voltage (Vmp)	37.03 V	37.17 V	37.27 V	37.37 V	37.42 V
Maximum power current (Imp)	7.64 A	7.71 A	7.79 A	7.87 A	7.96 A
Open circuit voltage (Voc)	44.70 V	44.74 V	44.86 V	44.96 V	45.07 V
Short circuit current (Isc)	8.12 A	8.19 A	8.28 A	8.36 A	8.45 A

\*\*Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) : Irradiance: 800 W / m<sup>2</sup> • Environment temperature : 20°C • AM : 1.5 • Wind speed : 1 m/s

### MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cell type	Monocrystalline (158.75x158.75 mm)
Number of cells	72
Dimensions	1,980x1,002x35mm
Weight	22.9 kg
Glass	3.2 mm Tempered Glass, High Transmission (>94%), Anti-Reflective Coating
Frame	Anodized aluminium alloy
Junction box	IP68 rated (3 by pass diodes)
Cable	4mm <sup>2</sup> , 900mm (+) 900mm (-); Length can be customized
Connector	MC4 or MC4 compatible
Max front load (e.g.: snow)	5,400 Pa
Max back load (e.g.: wind)	2,400 Pa

### TEMPERATURE CHARACTERISTICS

NOCT	45 °C ±2 °C
Temperature coefficient of Pmax	-0.396%/°C
Temperature coefficient of Voc	-0.31%/°C
Temperature coefficient of Isc	+0.06%/°C

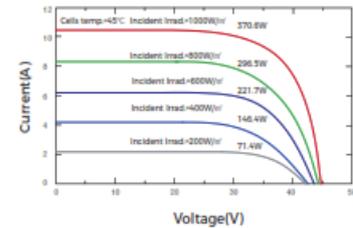
### MAXIMUM RATINGS

Operating temperature range	-45 °C ~+85 °C
Maximum system voltage	1,500V/DC(IEC) 1,500V/DC(UL)
Max series fuse rating	25 A

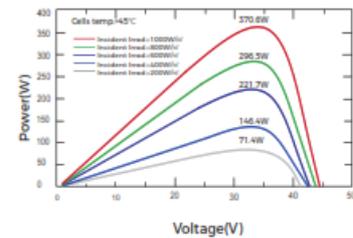
### PACKAGING (1,980x1,002x35mm)

Type	Quantity	Weight
Per pallet	31 pcs	740 kg
40ft HQ Container	784 pcs	18.75 t

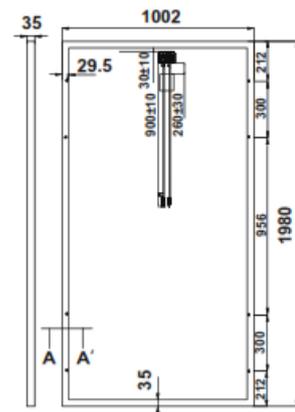
### PV MODULE : EGE-400M-72



### PV MODULE : EGE-400M-72



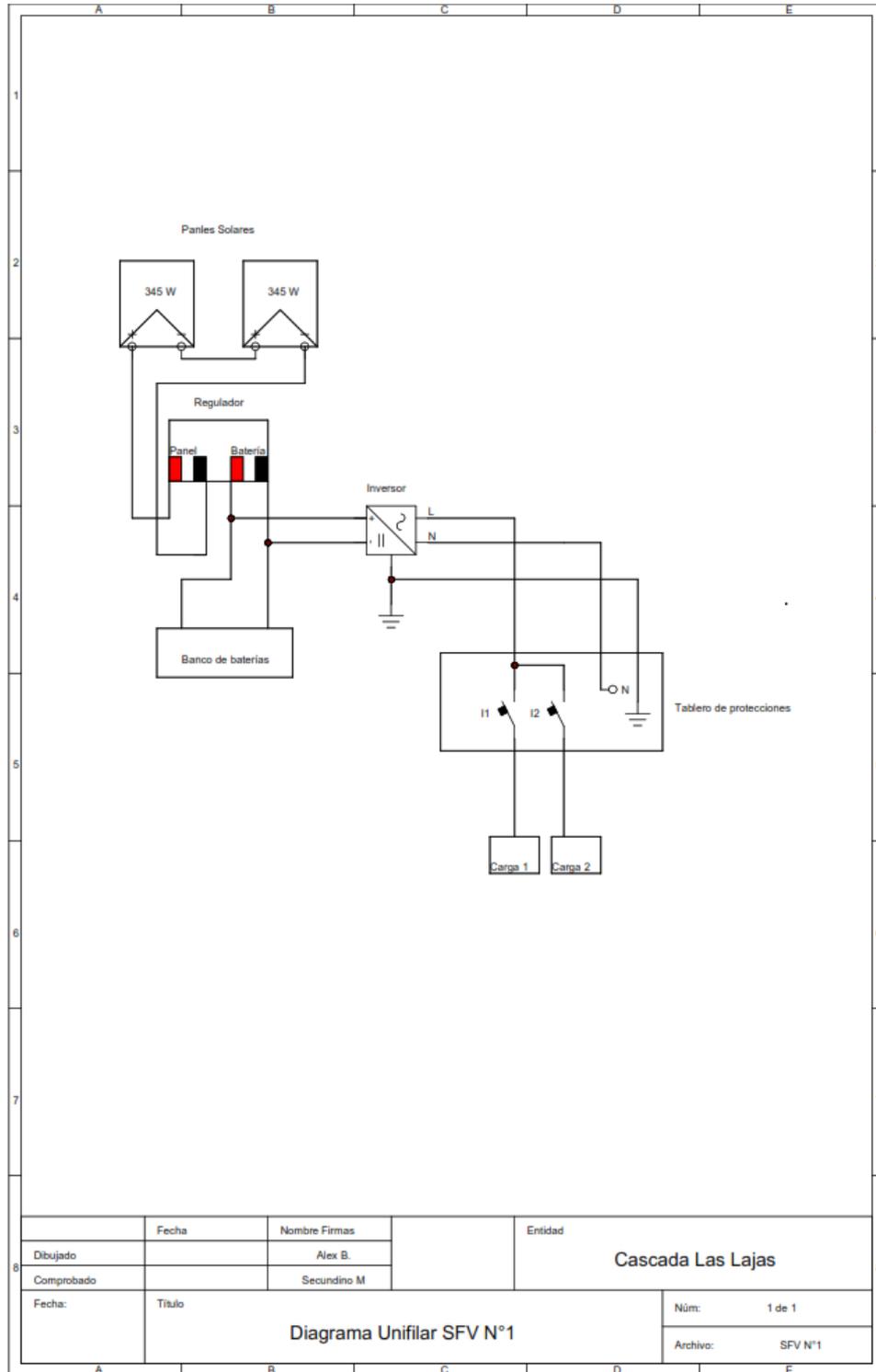
### Dimension of PV Module (mm)



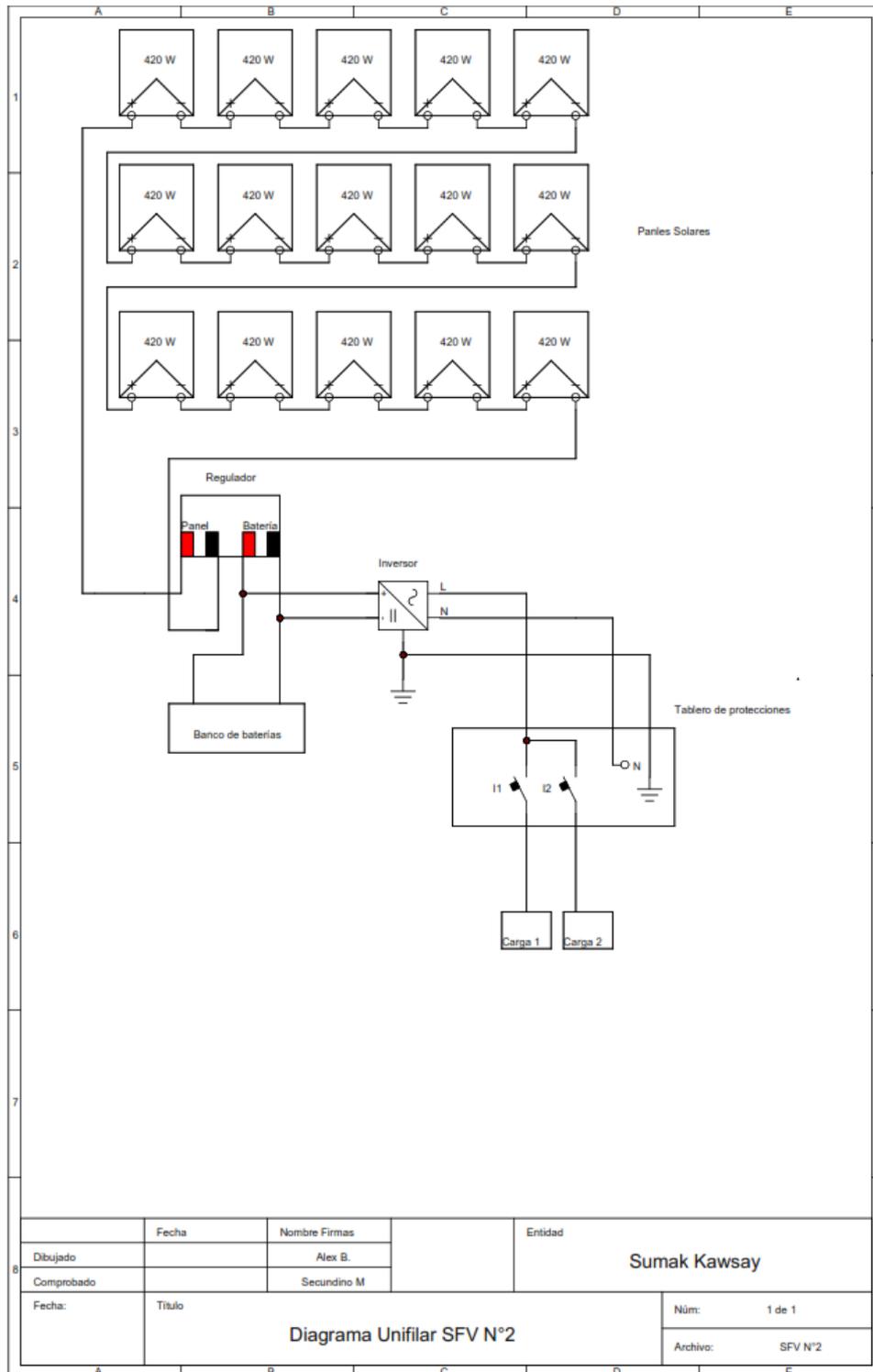
## Anexo 7.

Model : TW-500		TW-500-12V	TW-500-24V	TW-500-48V
AC Output	Continuous power:	500W		
	Surge power:	<b>1000W</b>		
		120%<load<load</load		
		150%<load<load</load		
	Output Waveform	Pure Sine Wave (THD < 3%)		
	Output Frequency	50Hz±0.1% or 60Hz±0.1% (Optional)		
	AC Output Voltage	100~120VAC / 200~240VAC (Optional)		
DC Input	DC Input Voltage	12V DC	24V DC	48V DC
	Voltage Range	10.8V-15.5V	21.6V-31V	43.2V-62V
	Low Voltage Alarm	10.8V± 0.2V	21.6V±0.4V	43.2V±0.8V
	Low Voltage Shut down	10.2V±0.2V	20.4V±0.4V	40.8V±0.8V
	Over Voltage Shut down	15.5V±0.2V	31V±0.4V	62V±0.8V
Converting Max. Efficiency		90% (Full Loading) / 95% (1/3 Loading)		
No Load Consumption		<0.4A	<0.2A	<0.1A
Protection	Over Thermal:	Shut Off Output Automatically, Temperature >75°C		
	Short circuit protection:	Reverse Polarity (External Fuse)		
	Cooling Fan automatically run	Temperature ≥45°C		
Environment	Working temperature	-10°C~+50°C		
	Working humidity	20%~90% RH Non-Condensing		
	Storage Temperature Range	-30°C~+70°C		
LED Indicator Light		Inverter, Fault		
Packing	Inner Box Dimensions (mm)	315*195*135mm		6 pcs /Carton
	Inner Box Weight (kg)	2.5kg		
	Carton Dimensions (mm)	420*340*460 mm		
	Carton Weight (kg)	15 kg		

## Anexo 8.



**Anexo 9.**



**Anexo 10.**

