



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**“ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS”**

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

AUTORES: MARLON ARTURO BARRETO NAULA

ARIEL OSWALDO GUANANGA GUANANGA

TUTOR: ING. EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN

Cuenca - Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Marlon Arturo Barreto Naula con documento de identificación N° 0107182768 y Ariel Oswaldo Guananga Guananga con documento de identificación N° 0105862890; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

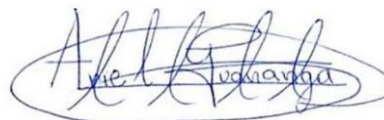
Cuenca, 09 de agosto del 2022

Atentamente,



Marlon Arturo Barreto Naula

0107182768



Ariel Oswaldo Guananga Guananga

0105862890

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Marlon Arturo Barreto Naula con documento de identificación N° 0107182768 y Ariel Oswaldo Guananga Guananga con documento de identificación N° 0105862890, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico con enfoque investigativo: “Análisis de calidad de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

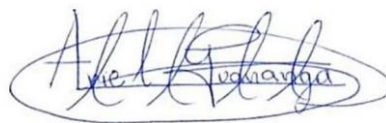
Cuenca, 09 de agosto del 2022

Atentamente,



Marlon Arturo Barreto Naula

0107182768



Ariel Oswaldo Guananga Guananga

0105862890

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edgar Antonio Barragán Escandón con documento de identificación N° 0102516457, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS”, realizado por Marlon Arturo Barreto Naula con documento de identificación N° 0107182768 y por Ariel Oswaldo Guananga Guananga con documento de identificación N° 0105862890, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico con enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 09 de agosto del 2022

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**EDGAR ANTONIO
BARRAGAN
ESCANDON**

Ing. Edgar Antonio Barragán Escandón
0102516457

AGRADECIMIENTO

Primero agradecer a Dios por la voluntad de levantarme cada día y materializar mis anhelos. A mis padres, quienes desde pequeño me aconsejaron, apoyaron y creyeron en todos mis objetivos. A mis hermanas y familia, su compañía y buenos deseos nunca faltaron. A todos mis amigos y futuros colegas, por su infinita ayuda y buena voluntad.

Marlon Arturo Barreto Naula

AGRADECIMIENTO

Estas líneas no son lo suficientemente largas para dar un reconocimiento a cada una de las personas que fueron piezas claves en la obtención de este nuevo logro. Sin embargo, me gustaría agradecer a mi familia y amigos en general por el apoyo, por sus enseñanzas y por su gran ayuda que me han brindado durante esta etapa de mi vida.

Por supuesto, quiero dar las gracias a mi madre Ruth y a mi padre Galo por brindarme su apoyo durante el transcurso de mi vida escolar y por permitirme vivir este momento tan especial ya que sin ellos esto no hubiera sido posible. Siento gran orgullo al poder decir que son mi ejemplo a seguir para ser una mejor persona y desde ahora un gran profesional.

A mis hermanos Dennis y Adrián quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional y palabras de aliento en momentos difíciles. Espero ser un gran ejemplo para ellos y hacer que se sientan un gran orgullo de mí.

Ariel Oswaldo Guananga Guananga

DEDICATORIA

A mis padres Arturo y Trancito, por ser los guías de mi vida, su paciencia, comprensión y solidaridad durante mi preparación profesional.

A mis hermanas Jenny y Johmayra, por ser el impulso de mis sueños y esperanzas desde la infancia, Este logro también es de ustedes.

A mi sobrino Andrés, que este logro represente un estímulo para el largo camino que debes recorrer.

A Leonardo, mi cuñado, por siempre brindarme su apoyo y consejos.

A mis amigos y familia, por su apoyo, necesario en los momentos difíciles.

A mi difunta hermana Mariela, siempre estuviste presente para mi, te dedico mi éxito desde el fondo de mi corazón mi compañera de infancia.

Marlon Arturo Barreto Naula

DEDICATORIA

Quiero dedicar todo el trabajo y esfuerzo realizado en todos estos años a las personas que tuvieron una gran influencia en mí y tristemente hoy ya no están.

Este logro se lo dedico especialmente a mi tía Marianita quién con gran amor y paciencia supo guiarme, aconsejarme y corregirme para ser una persona responsable, juiciosa y dedicada que creo ser. Todo este camino recorrido fue el resultado de sus enseñanzas que hoy y siempre procuraré seguir para continuar hacia adelante.

Por supuesto a mi abuelita Martha quién siempre soñó estar junto a mí en este momento. Siempre quedará en mí corazón todo el amor que me brindó, su apoyo incondicional y la sabiduría para obrar correctamente en este camino.

Ariel Oswaldo Guananga Guananga

RESUMEN

En este trabajo de titulación, se estudió la calidad de energía eléctrica de varios sistemas fotovoltaicos conectados a la red ubicados en la ciudad de Cuenca. Se realizó una búsqueda de normativas ecuatorianas, americanas y europeas referentes a la calidad de energía para así estudiar los parámetros y límites establecidos por cada una de ellas. Utilizando datos reales medidos por los autores, e información entregada por el laboratorio de microrred de la Universidad de Cuenca y la Empresa Eléctrica Centrosur, se elaboraron informes de calidad de energía de cada sistema, aplicando la normativa nacional e internacional vigente en la actualidad.

Palabras clave: Calidad de energía, sistema fotovoltaico, perturbación, nivel de tensión, nivel de corriente, desequilibrio, flicker, distorsión armónica, frecuencia.

ÍNDICE

RESUMEN	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	1
1.2 Estado del arte	2
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo General	7
1.3.2 Objetivos Específicos	7
2 MARCO TEÓRICO	8
2.1 Situación nacional de los sistemas fotovoltaicos	8
2.2 Normativa nacional	9
2.2.1 ARCERNNR 001/2021: Marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regula- dos de energía eléctrica	9
2.2.1.1 Caracterización de la generación distribuida para au- toabastecimiento	9
2.2.1.2 Potencia nominal del sistema de generación dis- tribuida para autoabastecimiento	10
2.2.1.3 Factibilidad de conexión de sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento	10
2.2.2 ARCERNNR 002/20: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica	11
2.2.2.1 Distorsión armónica de tensión	11
2.2.2.2 Desequilibrio de tensión	12
2.3 Normativa Americana	12
2.3.1 ANSI C84.1: Electric power systems voltage ratings	13
2.3.1.1 Sistemas de 120V a 600V	13
2.3.2 IEEE 519: Recommended practice and requirements for har- monic control in electric power systems	13
2.3.3 IEEE 1159: Recommended practice for monitoring electric power quality	15

2.3.4	IEEE 1250: Guide for identifying and improving voltage quality in power systems	15
2.3.4.1	Límite recomendado de voltaje	15
2.3.4.2	Desequilibrio de tensión	16
2.3.4.3	Límites recomendados de armónicos	16
2.4	Normativa Europea	17
2.4.1	EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks	17
2.4.1.1	Frecuencia	17
2.4.1.2	Variación de tensión	18
2.4.1.3	Flicker y huecos de tensión	18
2.4.1.4	Interrupciones	18
2.4.1.5	Distorsión Armónica de Voltaje	19
2.4.2	IEC 61000-2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems	19
2.4.2.1	Desequilibrio de tensión	19
2.4.2.2	Variación de frecuencia	20
2.4.3	IEC 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances	20
2.5	Comparación entre normativas	22
3	METODOLOGÍA	24
3.1	Introducción	24
3.2	Recopilación de normas y regulaciones	25
3.3	Determinar variables e indicadores	26
3.4	Recolección de datos	26
3.4.1	Equipo utilizado	26
3.5	Procesamiento de datos	26
3.6	Interpretación, análisis y evaluación de datos	27
4	RESULTADOS	28
4.1	Caso I	29
4.2	Caso II	30
4.3	Caso III	31
4.4	Caso IV	32
4.5	Caso V	33
4.6	Resumen	34
5	DISCUSIÓN	38

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
6.1 Conclusiones	40
6.2 Recomendaciones	42
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	46
A Caso I	47
B Caso II	66
C Caso III	86
D Caso IV	106
E Caso V	119

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Capacidad instalada en Ecuador de sistemas fotovoltaicos	8
3.1	Diagrama de flujo	25
A.1	Niveles de tensión - Fase A	50
A.2	Niveles de tensión - Fase B	50
A.3	Niveles de tensión - Fase C	51
A.4	Desequilibrio de tensión	52
A.5	Niveles de corriente - Fase A	54
A.6	Niveles de corriente - Fase B	54
A.7	Niveles de corriente - Fase C	55
A.8	Desequilibrio de corriente	56
A.9	Flicker - Fase A	58
A.10	Flicker - Fase B	58
A.11	Flicker - Fase C	59
A.12	Armónicos pares	61
A.13	Armónicos impares múltiplos de 3	62
A.14	Armónicos impares	62
A.15	Distorsión armónica total de voltaje	64
A.16	Niveles de Frecuencia	65
B.1	Niveles de tensión - Fase A	69
B.2	Niveles de tensión - Fase B	69
B.3	Niveles de tensión - Fase C	70
B.4	Desequilibrio de tensión	71
B.5	Niveles de corriente - Fase A	73
B.6	Niveles de corriente - Fase B	73
B.7	Niveles de corriente - Fase C	74
B.8	Desequilibrio de corriente	75
B.9	Flicker - Fase A	77
B.10	Flicker - Fase B	77
B.11	Flicker - Fase C	78
B.12	Armónicos pares	81

B.13 Armónicos impares múltiplos de 3	81
B.14 Armónicos impares	82
B.15 Distorsión armónica total de voltaje	84
B.16 Niveles de Frecuencia	85
C.1 Niveles de tensión - Fase A	89
C.2 Niveles de tensión - Fase B	89
C.3 Niveles de tensión - Fase C	90
C.4 Desequilibrio de tensión	91
C.5 Niveles de corriente - Fase A	93
C.6 Niveles de corriente - Fase B	93
C.7 Niveles de corriente - Fase C	94
C.8 Desequilibrio de corriente	95
C.9 Flicker - Fase A	97
C.10 Flicker - Fase B	97
C.11 Flicker - Fase C	98
C.12 Armónicos pares	101
C.13 Armónicos impares múltiplos de 3	101
C.14 Armónicos impares	102
C.15 Distorsión armónica total de voltaje	104
C.16 Niveles de Frecuencia	105
D.1 Niveles de tensión - Fase A	108
D.2 Niveles de tensión - Fase B	109
D.3 Desequilibrio de tensión	110
D.4 Niveles de corriente - Fase A	112
D.5 Niveles de corriente - Fase B	112
D.6 Desequilibrio de corriente	113
D.7 Flicker - Fase A	115
D.8 Flicker - Fase B	116
D.9 Distorsión Armónica Total de voltaje	118
E.1 Niveles de tensión - Fase A	121
E.2 Niveles de tensión - Fase B	122
E.3 Desequilibrio de tensión	123
E.4 Niveles de corriente - Fase A	125
E.5 Niveles de corriente - Fase B	125
E.6 Desequilibrio de corriente	126
E.7 Flicker - Fase A	128
E.8 Flicker - Fase B	128

E.9 Distorsión armónica total de voltaje	130
--	-----

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Resumen del estado del arte	6
2.1	Potencia nominal sGDA categoría 1	10
2.2	Límites para el índice de nivel de tensión	11
2.3	Límites máximos de armónicos de tensión	12
2.4	Límites de operación para sistemas de 120V a 600V	13
2.5	Límites de distorsión de voltaje	14
2.6	Límites de distorsión de corriente	14
2.7	Límites según la norma IEEE 1250	16
2.8	Límites armónicos norma IEEE 1250	16
2.9	Límites según la norma EN 50160	18
2.10	Límites armónicos norma EN 50160	19
2.11	Límites armónicos norma IEC 61000-2-2	20
2.12	Límites de tolerancia de perturbaciones norma IEC 61000-2-4	21
2.13	Límites de armónicos norma IEC 61000-2-4	21
2.14	Comparación de perturbaciones según cada normativa	22
2.15	Comparación de armónicos múltiplos 3 según cada normativa	22
2.16	Comparación de armónicos impares no múltiplos de 3 según cada normativa	23
2.17	Comparación de armónicos pares según cada normativa	23
3.1	Normativas vigentes - 2022	27
4.1	Resumen de resultados - Normativa ecuatoriana	35
4.2	Resumen de resultados - Normativa americana	36
4.3	Resumen de resultados - Normativa europea	37
A.1	Niveles de tensión - Fase A	48
A.2	Niveles de tensión - Fase A	48
A.3	Niveles de tensión - Fase B	48
A.4	Niveles de tensión - Fase B	49
A.5	Niveles de tensión - Fase C	49
A.6	Niveles de tensión - Fase C	49
A.7	Desequilibrio de tensión	51

A.8 Desequilibrio de tensión	52
A.9 Niveles de corriente - Fase A	53
A.10 Niveles de corriente - Fase B	53
A.11 Niveles de corriente - Fase C	53
A.12 Desequilibrio de corriente	55
A.13 Nivel de flicker - Fase A	57
A.14 Nivel de flicker - Fase B	57
A.15 Nivel de flicker - Fase C	57
A.16 Componentes armónicos pares de voltaje	60
A.17 Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3	60
A.18 Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3	61
A.19 Distorsión armónica total - Fase A	63
A.20 Distorsión armónica total - Fase B	63
A.21 Distorsión armónica total - Fase C	63
A.22 Niveles de frecuencia	64
A.23 Niveles de frecuencia	65
B.1 Niveles de tensión - Fase A	67
B.2 Niveles de tensión - Fase A	67
B.3 Niveles de tensión - Fase B	67
B.4 Niveles de tensión - Fase B	68
B.5 Niveles de tensión - Fase C	68
B.6 Niveles de tensión - Fase C	68
B.7 Desequilibrio de tensión	70
B.8 Desequilibrio de tensión	71
B.9 Niveles de corriente - Fase A	72
B.10 Niveles de corriente - Fase B	72
B.11 Niveles de corriente - Fase C	72
B.12 Desequilibrio de corriente	74
B.13 Nivel de flicker - Fase A	76
B.14 Nivel de flicker - Fase B	76
B.15 Nivel de flicker - Fase C	76
B.16 Componentes armónicos pares de voltaje	79
B.17 Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3	80
B.18 Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3	80
B.19 Distorsión armónica total - Fase A	82
B.20 Distorsión armónica total - Fase B	83

B.21	Distorsión armónica total - Fase C	83
B.22	Niveles de frecuencia	84
B.23	Niveles de frecuencia	85
C.1	Niveles de tensión - Fase A	87
C.2	Niveles de tensión - Fase A	87
C.3	Niveles de tensión - Fase B	87
C.4	Niveles de tensión - Fase B	88
C.5	Niveles de tensión - Fase C	88
C.6	Niveles de tensión - Fase C	88
C.7	Desequilibrio de tensión	90
C.8	Desequilibrio de tensión	91
C.9	Niveles de corriente - Fase A	92
C.10	Niveles de corriente - Fase B	92
C.11	Niveles de corriente - Fase C	92
C.12	Desequilibrio de corriente	94
C.13	Nivel de flicker - Fase A	95
C.14	Nivel de flicker - Fase B	96
C.15	Nivel de flicker - Fase C	96
C.16	Componentes armónicos pares de voltaje	99
C.17	Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3	99
C.18	Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3100	
C.19	Distorsión armónica total - Fase A	102
C.20	Distorsión armónica total - Fase B	103
C.21	Distorsión armónica total - Fase C	103
C.22	Niveles de frecuencia	104
C.23	Niveles de frecuencia	105
D.1	Niveles de tensión - Fase A	107
D.2	Niveles de tensión - Fase A	107
D.3	Niveles de tensión - Fase B	107
D.4	Niveles de tensión - Fase B	108
D.5	Desequilibrio de tensión	109
D.6	Desequilibrio de tensión	110
D.7	Niveles de corriente - Fase A	111
D.8	Niveles de corriente - Fase B	111
D.9	Desequilibrio de corriente	113
D.10	Nivel de flicker - Fase A	114
D.11	Nivel de flicker - Fase B	115

D.12	Distorsión Armónica Total - Fase A	117
D.13	Distorsión Armónica Total - Fase B	117
E.1	Niveles de tensión - Fase A	120
E.2	Niveles de tensión - Fase A	120
E.3	Niveles de tensión - Fase B	120
E.4	Niveles de tensión - Fase B	121
E.5	Desequilibrio de tensión	122
E.6	Desequilibrio de tensión	123
E.7	Niveles de corriente - Fase A	124
E.8	Niveles de corriente - Fase B	124
E.9	Desequilibrio de corriente	126
E.10	Nivel de flicker - Fase A	127
E.11	Nivel de flicker - Fase B	127
E.12	Distorsión armónica total	129
E.13	Distorsión armónica total	130

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Las fluctuaciones de tensión y la distorsión armónica son los problemas más comunes en los sistemas eléctricos fotovoltaicos. La existencia de estas anomalías, a su vez producen en los equipos eléctricos fallos como: atenuación en luminarias, desconexión de equipos, pérdida de datos y problemas en el control de las protecciones eléctricas.

Es por ello que, se propone analizar la calidad de energía de los sistemas fotovoltaicos para valorar si los diferentes parámetros como: sobretensiones, subten-siones, variaciones de frecuencia, flickers, interrupciones y armónicos cumplen con los límites especificados en la normativa eléctrica actual.

Para cada sistema fotovoltaico, se va a establecer condiciones de la tensión, corriente y distorsión armónica. Toda esta información se recopila en un período de una semana. Utilizando estos datos se procede a evaluar los valores medidos, comparándolos con los límites especificados en normas y regulaciones vigentes, tanto nacionales como internacionales.

Este trabajo proporciona información sobre la calidad de energía de algunos sistemas fotovoltaicos instalados en la ciudad de Cuenca, para así determinar si el suministro eléctrico proporcionado por estos sistemas es seguro y confiable. También se busca comparar la normativa ecuatoriana con normativas internacionales, a fin de determinar si las características y límites establecidos en la normativa local son suficientes para evaluar la calidad de energía de un sistema fotovoltaico.

1.2 Estado del arte

En la Universidad de Murdoch (Australia) se realizó un estudio de calidad de energía con la inserción de un sistema de generación fotovoltaico [1]. Se obtuvo información de: distorsión de voltaje y corriente, ángulo de desfase de la tensión, además de la temperatura de los equipos utilizados por la universidad que funcionan con sistemas trifásicos. Como referencia de análisis se empleó las normas IEC 61000-2-2 [2] y NEMA [3]. Se estableció una variación de voltaje dentro del 2% determinado por la norma. Con respecto a la corriente, esta superaba el 5% descrito por la norma IEC y NEMA. Al realizar el estudio de temperatura en el transformador se observó un sobrecalentamiento. La razón de este fenómeno se debe a que el tercer armónico de corriente es superior al límite de la norma IEEE 519 [4]. Otra causa de esta anomalía es el mal dimensionamiento del transformador.

Oliva y Balda [5], realizaron mediciones de armónicos de dos sistemas fotovoltaicos ubicados al oeste de Texas en el área de Davis. En dicho estudio se presentan los resultados obtenidos de un análisis de calidad de energía eléctrica aplicando la norma IEEE 519 [6]. De las mediciones adquiridas se reveló que los armónicos pares producidos superaban hasta un 25% los límites a excepción del armónico 34. El valor elevado de los armónicos no se puede atribuir a la inserción de los sistemas fotovoltaicos, debido a que incluso cuando no había generación, los valores armónicos se mantenían en condiciones similares. Se cree que la causa de este fenómeno es la alta demanda de cargas no lineales conectadas al sistema.

En Canadá se analizó la calidad de energía estudiando el impacto de sistemas fotovoltaicos en perfiles de tensión en barrios residenciales. En la evaluación del sistema, se determinaron sobrevoltajes según la norma IEEE 1547 [7] de hasta un 11,25 % en el alimentador y hasta 75 % en el transformador de la red de distribución. Se estableció que la calidad se puede mejorar variando parámetros de la red de bajo voltaje y reduciendo la impedancia de cortocircuito tanto del transformador como del alimentador, logrando así reducir los problemas existentes [8]. Finalmente se determinó que la tensión en la red no sería afectada por los sistemas fotovoltaicos cuando la potencia distribuida por estos sistemas no supere los 2,5 kW en cada hogar.

En Moscú (Rusia), se realizaron estudios de calidad de energía en centrales fotovoltaicas teniendo como base las condiciones meteorológicas de la zona. Como resultado del estudio se obtuvo que la temperatura del ambiente tiene nula inter-

vención sobre la calidad de energía del sistema. Sin embargo, la irradiación influye, pues al producirse una sombra en el panel fotovoltaico se determinó que, el voltaje del sistema fotovoltaico fluctúa en un $\pm 15\%$. También se diagnosticó que las componentes armónicas se elevaron hasta 0.2% de los límites establecidos en la norma IEC 61000-2-4 [9]. Se definió que los parámetros de la calidad de energía dependen del tipo de inversor utilizado [10].

En el año 2021, se realizaron estudios para la interconexión de sistemas fotovoltaicos a una red de bajo o medio voltaje en Estados Unidos. El objetivo fue minimizar el impacto en la calidad de energía al implementar estos sistemas. Los resultados de este estudio demuestran que la interconexión de un sistema fotovoltaico puede variar los parámetros de calidad de energía de la red, pues aumenta la distorsión armónica y eleva los voltajes entre el 4% y 9% . Una posible solución para que los límites de calidad de energía se encuentren dentro de lo establecido, es restringir la carga para que no supere la potencia generada por el sistema fotovoltaico [11].

En Guatemala se realizó un estudio de calidad de energía en el edificio del Ministerio de Relaciones Exteriores. Se analizaron varios parámetros como: voltajes, flickers, distorsión armónica de voltaje y distorsión armónica de corriente, con la finalidad de mejorar la eficiencia energética del edificio. El resultado del estudio encontró que, varios equipos reducen la calidad de energía especialmente en horas de la tarde al elevarse el consumo de la energía eléctrica en el edificio. El autor recomienda dar seguimiento a los equipos electrónicos debido a que estos inyectan armónicos en la red y se aconseja la inclusión de un sistema fotovoltaico para elevar la calidad de energía eléctrica del edificio [12].

En [13], se presenta un estudio realizado en la India en el entorno SIMULINK. Estas simulaciones tienen la finalidad de estudiar el sistema eléctrico a fin de mejorar la calidad de energía de un sistema fotovoltaico con la implementación de un control de detección de armónicos. El algoritmo funciona detectando la potencia activa y reactiva fundamental de las cargas para posteriormente compensar sus desequilibrios. Al compensar la energía reactiva y corregir el factor de potencia se determina que las fluctuaciones de tensión y la distorsión armónica son reducidas.

Debido al incremento de producción de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos surge la necesidad de conseguir la máxima potencia del sistema y de mejorar su calidad de la energía. Para analizar esto, en Alemania se desarrolló un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) el cual se basa en un controlador de inteligencia artificial. Al realizar simulaciones en el entorno

SIMULINK se pudo observar que el algoritmo MPPT puede conseguir la máxima potencia del sistema fotovoltaico y reducir las distorsiones armónicas al aumentar el voltaje de salida mejorando la calidad de energía [14].

El análisis de calidad de energía en el Hospital San José, cantón Taisha, determinó los índices de tensión en las líneas A y B con valores de 17.2% y 7.4% respectivamente, incumpliendo los valores admisibles adoptados por la regulación ARCONEL 005/18 [15], vigente en su momento. Se realizaron mediciones durante una semana y se definió el día de mayor demanda con una potencia de 33.3 kW, valor a considerar para el diseño del sistema [16]. Se concluye que con la implementación de un sistema fotovoltaico en el hospital, el nivel de voltaje va a mejorar aumentando la calidad de energía.

En la Universidad Politécnica Salesiana se realizó un estudio de calidad de energía del sistema fotovoltaico [17], adaptándose a las normas indicadas en [4], [15] y [18], vigentes en ese momento. Se realizó el estudio analizando las ondas de voltaje y la distorsión armónica producida cuando este sistema entra en operación. El desequilibrio de voltaje una vez terminado el estudio se encuentra por debajo del 2% permitido, pero en cuanto al desequilibrio de corriente, se pudo evidenciar que esta supera el 10%. La causa de este desequilibrio se debe al alto consumo de electricidad durante horas de la mañana, mientras que, en las noches cuando el sistema no genera electricidad este se comporta como una carga más, pues introduce perturbaciones en la red eléctrica.

En un transformador particular perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana se realizó un estudio de calidad de energía [19]. Se evaluaron los índices de calidad del sistema fotovoltaico diseñado para alimentar electrolineras que puedan cargar baterías de vehículos eléctricos, cuando se conecta y desconecta a la red de energía. Para ambos casos se realizaron mediciones en un período de 7 días, según dicta la regulación ARCONEL 005/18 [15]. Al analizar los parámetros se observó que ninguno supera los límites establecidos por la normativa ecuatoriana. Concluyendo que el sistema fotovoltaico no repercute en la calidad de energía dentro de los límites de las normas pertinentes. Aunque se introducen armónicos en la red de energía, estos se encontraron dentro de los límites indicados en la norma.

En el año 2012, en la ciudad de Cuenca debido a la necesidad de evaluar la calidad de energía suministrada en la red [20], se desarrolla un software que permite evaluar y monitorear estos parámetros. Se obtuvieron muestras en puntos de acoplamiento de sistemas fotovoltaicos y en cualquier otro punto de la red. Se midieron factores de

severidad de flickers Pst (corto plazo) y Plt (largo plazo). La evaluación estableció que el sistema muestreado cumple con los parámetros de calidad de energía establecidos en las normas IEEE 519 [4] y en IEEE 1159 [21].

En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de los estudios y simulaciones realizadas en el estudio del arte sobre la calidad de energía en sistemas fotovoltaicos.

Tabla 1.1: Resumen del estado del arte

RESUMEN DE ESTUDIOS REALIZADOS				
Ubicación	Estudio	Potencia	Parámetros	Resultado
Universidad de Murdoch (Australia)	Calidad de energía	56 kW	Nivel de voltaje, nivel de corriente y desequilibrios	Nivel de corriente fuera de los límites establecidos
Área de Davis (Texas)	Calidad de energía	25 kW	Armónicos	Todos cumplen a excepción del armónico 34
Moscú (Rusia)	Calidad de energía	Varios sistemas	Nivel de voltaje según las condiciones meteorológicas	Dependiendo de la irradiación solar el voltaje fluctúa en $\pm 15\%$
Canadá	Impacto de sistemas fotovoltaicos		Nivel de tensión en transformadores	No tiene ninguna afección si cada sistema no supera la generación de 2.5 kW
Estados Unidos	Simulaciones para la interconexión de SFV		Nivel de voltaje y distorsión armónica	Elevación del nivel de voltaje hasta el 9%. Aumento de la distorsión armónica
India	Simulaciones		Armónicos	Disminución de THD compensando la potencia reactiva
Alemania	Simulaciones		Nivel de voltaje y distorsión armónica	Algoritmo MPPT consigue la potencia máxima del sistema y reduce el THD
Ministerio de Relaciones Exteriores (Guatemala)	Calidad de energía	68,64 kW	Nivel de voltaje, flickers y distorsión armónica	La calidad de energía es reducida debido al incremento de cargas no lineales
Hospital San José (Taisha)	Calidad de energía	33 kW	Nivel de voltaje	Cumple con la normativa ARCONEL 005/18
Universidad Politécnica Salesiana (Edif. Guillermo Mensi)	Calidad de energía	0,87 kW	Nivel de voltaje, flicker, distorsión armónica y desequilibrios	Los desequilibrios se encuentran fuera del límite establecidos en las normativas de calidad
Universidad Politécnica Salesiana (Cuenca)	Calidad de energía	12,6 kW	Nivel de voltaje, flicker, distorsión armónica y desequilibrios	Cumple con la normativa ARCONEL 005/18
Cuenca (Ecuador)	Desarrollo de software		Nivel de voltaje, flicker, distorsión armónica y desequilibrios	Desarrollo de software que monitorea y evalúa los parámetros con la normativa IEEE 519

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Identificar los efectos producidos en la calidad de energía por la incorporación de sistemas fotovoltaicos de la ciudad de Cuenca teniendo en cuenta las normas y regulaciones vigentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer parámetros de calidad de energía al incorporar generación distribuida, particularmente energía fotovoltaica.
- Analizar las mediciones de calidad de energía de cada sistema fotovoltaico conectado a la red de distribución, evaluando suficientes sistemas para obtener resultados generales.
- Definir el cumplimiento de los parámetros de calidad de energía, aplicando normativas nacionales e internacionales.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Situación nacional de los sistemas fotovoltaicos

Ecuador mantiene una gran ventaja en radiación solar debido a su ubicación geográfica. La política de reducir el consumo de combustibles fósiles en generación eléctrica, ha fomentado la construcción de varios sistemas fotovoltaicos en algunas ciudades del país. Hasta el año 2018, en el país se han instalado 88 sistemas fotovoltaicos con una potencia nominal de 2,9 MW [22].

En la Figura 2.1 se presenta la capacidad instalada de cada empresa distribuidora.

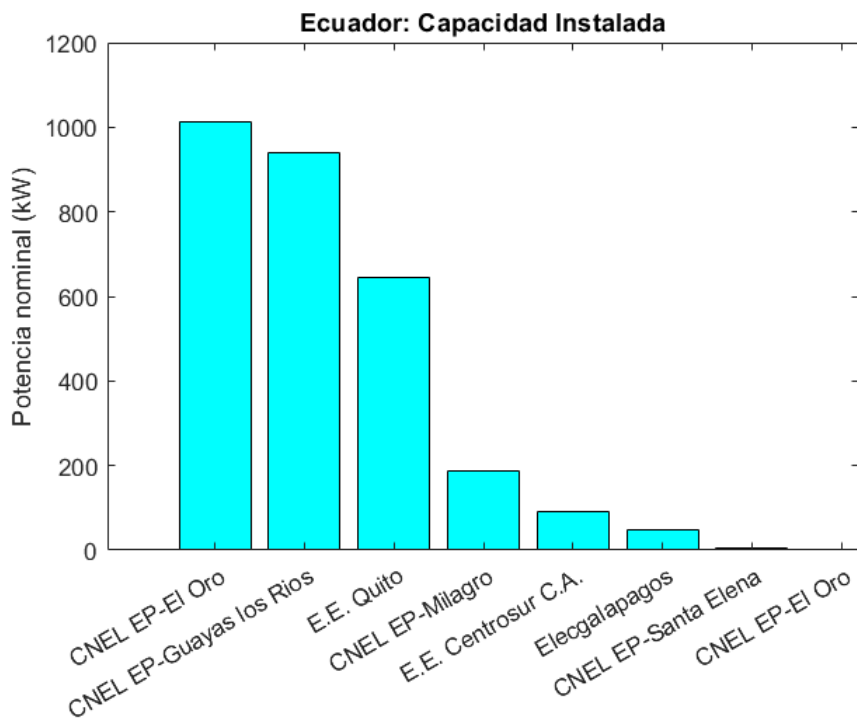


Figura 2.1: Capacidad instalada en Ecuador de sistemas fotovoltaicos

2.2 Normativa nacional

En Ecuador se han establecido varias normas que tienen la finalidad de brindar a los usuarios un suministro eléctrico de calidad. Uno de los objetivos principales de la creación de estas normas es establecer parámetros y limitarlos para que el suministro eléctrico sea confiable y de calidad. La normativa ecuatoriana analiza los siguientes índices:

- Nivel de voltaje
- Flicker
- Distorsión armónica de voltaje
- Desequilibrios de voltaje

Estos parámetros son medidos en un punto de acoplamiento común, pudiéndose aplicar a cualquier sistema eléctrico incluyendo a sistemas fotovoltaicos interconectados con la red de distribución [23].

2.2.1 ARCERNNR 001/2021: Marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica

Esta normativa aprobada en 2021, en vigencia tiene como objetivo establecer las condiciones de operación de la generación distribuida basados en fuentes renovables. Esta normativa busca regular a los consumidores que instalen sistemas para su autoabastecimiento, sistemas conectados a la red y para las empresas distribuidoras [23].

2.2.1.1 Caracterización de la generación distribuida para autoabastecimiento

Un sistema de generación distribuida para autoabastecimiento (SGDA), es aquel que se encuentra en la misma área del consumidor y su demanda es habilitada bajo una cuenta contrato y debe cumplir con algunas condiciones:

- Posee una potencia nominal menor a 1 MW
- Está conectado a las instalaciones internas del consumidor o a la red de distribución
- Aprovecha recursos energéticos renovables
- Utiliza cualquier tecnología de generación de electricidad con o sin almacenamiento.

2.2.1.2 Potencia nominal del sistema de generación distribuida para autoabastecimiento

El cálculo de la potencia nominal del sistema está basado en un análisis de la carga y demanda de energía, con el fin de cubrir la necesidad del consumidor durante un año, su dimensionamiento es responsabilidad del usuario que implemente el sistema. La energía producida durante un año debe ser menor o igual a la demanda del consumidor durante el mismo tiempo.

2.2.1.3 Factibilidad de conexión de sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento

La normativa establece dos categorías para la conexión de los sistemas. En la Tabla 2.1, se describe las potencias nominales establecidas en la categoría 1 para conectar el sistema en sincronismo con la red de distribución, para la categoría dos corresponden valores superiores a los establecidos en la categoría 1.

Tabla 2.1: Potencia nominal sGDA categoría 1

Voltaje de conexión	Potencia Nominal
Bajo	\leq a 10 kW monofásica
	\leq a 20 kW bifásica
	\leq a 30 kW trifásica

En la factibilidad de conexión, se explican las modificaciones que deberá implementar el usuario en la red de distribución para la conexión del sistema de autoabastecimiento. Así como las condiciones de funcionamiento que debe tener el sistema en operación normal y de falla de la red.

2.2.2 ARCERNNR 002/20: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica

Esta normativa se encuentra vigente y fue aprobada en 2020, busca definir los límites e índices para la calidad de comercialización y distribución de la energía eléctrica. Así como definir los procesos de registro, medición y evaluación que las empresas distribuidoras, consumidores regulados y no regulados conectados a la red deben cumplir [24].

En la Tabla 2.2, se resumen los rangos de tensiones admisibles con respecto a la tensión en cualquier punto y el valor nominal:

Tabla 2.2: Límites para el índice de nivel de tensión

Nivel de voltaje	Rango admisible
Alto voltaje	$\pm 5.0 \%$
Medio voltaje	$\pm 6.0 \%$
Bajo voltaje	$\pm 8.0 \%$

2.2.2.1 Distorsión armónica de tensión

Este índice evalúa la distorsión armónica individual y total de tensión. En la Tabla 2.3, se resumen los límites máximos de distorsión armónica individual y total de tensión:

Tabla 2.3: Límites máximos de armónicos de tensión

Nivel de Voltaje	DITh	DTT
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	1.5

2.2.2.2 Desequilibrio de tensión

El desequilibrio de voltaje en un punto de medición del sistema será de 2 % para los niveles de voltaje.

2.3 Normativa Americana

Existen una gran variedad de perturbaciones eléctricas que pueden afectar el servicio eléctrico. La calidad de energía se basa en el cumplimiento de los límites establecidos por las diferentes normas para cada parámetro involucrado en el análisis. Las normativas americanas establecen los principales índices para un estudio de calidad de energía [4]:

- Variación de voltaje
- Sobrevoltaje
- Huecos de voltaje
- Flicker
- Variación de la frecuencia
- Interrupciones
- Distorsión armónica de voltaje

2.3.1 ANSI C84.1: Electric power systems voltage ratings

Aprobada en 2020, esta norma establece límites de operación de voltaje para sistemas eléctricos de 60 Hz y que actúan de 100 V hasta 1200 kV (niveles de voltaje estables). En esta regulación se divide los voltajes en rangos. Rango A, para voltajes óptimos y el Rango B, para voltajes aceptables pero no óptimos [25].

2.3.1.1 Sistemas de 120V a 600V

- El voltaje mínimo para el rango A es 95% del voltaje nominal
- El voltaje máximo para el rango A es 105% del voltaje nominal
- El voltaje mínimo para el rango B es 91.7% del voltaje nominal
- El voltaje máximo para el rango B es 105.8% del voltaje nominal

En la Tabla 2.4 se presenta los límites de operación de voltaje para sistemas de 120V a 600V.

Tabla 2.4: Límites de operación para sistemas de 120V a 600V

Sistemas de 120V a 600V				
Voltaje nominal (V)	Rango A		Rango B	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
120	126	114	127	110
240	252	228	254	220
480	504	456	508	440

2.3.2 IEEE 519: Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems

Aprobada en 2014, esta norma establece límites de armónicos en las ondas de voltajes y corrientes en los cuales la operación del sistema eléctrico sea de calidad y confiable. Considerando que, un cierto nivel de distorsión armónica es aceptable para la

empresa distribuidora y el cliente, los cuales deben trabajar en conjunto para mantener estas distorsiones dentro de los límites establecidos por la norma. La medición de armónicos se la realiza en el punto de unión entre la línea de distribución y la recepción del usuario, porque al aplicarse en aparatos individuales las distorsiones podrían ser mayores a los límites recomendados [4].

En la Tabla 2.5 se presenta los límites de distorsión de voltaje establecidos por esta norma.

Tabla 2.5: Límites de distorsión de voltaje

Voltaje nominal	Armónico individual (%)	Distorsión armónica total THD(%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

En la Tabla 2.6 se presenta los límites de distorsión de corriente establecidos por esta norma.

Tabla 2.6: Límites de distorsión de corriente

Corriente de distorsión máxima						
Orden de los armónicos impares						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<20	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

I_{sc} Corriente máxima de cortocircuito

I_L Corriente máxima de demanda (Componente de frecuencia fundamental)

2.3.3 IEEE 1159: Recommended practice for monitoring electric power quality

Aprobado en 2019, el estándar engloba una supervisión de los sistemas de alimentación de corriente alterna. Describe los efectos de fenómenos electromagnéticos que ocurren en circuitos de potencia, así como condiciones nominales que se pueden originar en el suministro analizando los equipos que controlan la calidad de energía [21]. Los fenómenos que esta norma recomienda estudiar en el monitoreo de la calidad de energía de un sistema eléctrico son los siguientes:

- Amplitud
- Frecuencia
- Sobretensión
- Huecos de tensión
- Interrupciones

2.3.4 IEEE 1250: Guide for identifying and improving voltage quality in power systems

Aprobada en 2018, esta norma se revisa la calidad de energía en los sistemas eléctricos. Se evalúan niveles de calidad de energía, factores que afectan el desempeño del sistema, medidas de mitigación que mejoran el desempeño del sistema [26].

2.3.4.1 Límite recomendado de voltaje

Al existir mayor variación de voltaje dentro de las construcciones que en las líneas de distribución, el nivel de variación de voltaje recomendado es de $\pm 5\%$, con la probabilidad del 95% de que se encuentre dentro de este límite de operación.

En la Tabla 2.7 se presenta los límites establecidos en la norma americana IEEE 1250.

Tabla 2.7: Límites según la norma IEEE 1250

Perturbación	Límite
Variación de voltaje	$\pm 5\%$ condiciones normales $\pm 10\%$ condiciones inusuales
Desequilibrio de voltaje	3 %
Variación de frecuencia	± 0.5 Hz
Flicker	≥ 1
Distorsión armónica de voltaje	5% distorsión armónica total 3% componente armónica

2.3.4.2 Desequilibrio de tensión

La norma evalúa los desequilibrios de voltaje con efectos de largo plazo, es decir con una duración superior a los 10 minutos. El nivel de desequilibrio entre la secuencia negativa y positiva es de 3%.

2.3.4.3 Límites recomendados de armónicos

Los límites de armónicos individuales son importantes a altas frecuencias. Los componentes armónicos de alta frecuencia deben limitarse a niveles más bajos debido a la inserción de bancos de condensadores. Los múltiples cruces por cero de la onda debido a los armónicos crean un incorrecto funcionamiento de los aparatos eléctricos. Los límites armónicos según esta norma se describen en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Límites armónicos norma IEEE 1250

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)	Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)	Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

2.4 Normativa Europea

Existen una gran variedad de perturbaciones eléctricas que pueden afectar el servicio eléctrico. Las normativas europeas establecen los siguientes parámetros como los principales para un estudio de calidad de energía [27]:

- Variación de frecuencia
- Flicker
- Huecos de tensión
- Interrupciones
- Distorsión armónica de tensión

2.4.1 EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks

Aprobada en 2020, esta normativa tiene el propósito de asegurar el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas en bajo voltaje en un punto de acoplamiento común. La norma EN 50160 [27], se puede aplicar a cualquier sistema eléctrico incluyendo a sistemas fotovoltaicos interconectados con la red de distribución. Define diferentes límites de operación tales como: frecuencia, variaciones de tensión, flicker, huecos de tensión, interrupciones, y armónicos de voltaje.

2.4.1.1 Frecuencia

Las variaciones de frecuencia para sistemas eléctricos en baja tensión pueden variar en $\pm 1\%$ de la frecuencia fundamental.

2.4.1.2 Variación de tensión

Las variaciones de tensión generalmente no superan el 5% de la tensión nominal del sistema eléctrico, sin embargo, la norma EN 50160 limita estas variaciones hasta el 10% de la tensión nominal sin poner en riesgo la integridad de los equipos conectados.

2.4.1.3 Flicker y huecos de tensión

Esta norma define que el límite del parpadeo de larga duración (P_{lt}) debe ser igual o menor a 1.

Los huecos de tensión se dan cuando la tensión nominal se encuentra entre el 90% y el 10%.

2.4.1.4 Interrupciones

La interrupción se da cuando la tensión está por debajo del 10% de la tensión nominal llegando incluso en algunos casos a ser 0.

En la Tabla 2.9 se resume el tipo de perturbación y los límites establecidos según la norma EN 50160.

Tabla 2.9: Límites según la norma EN 50160

Perturbación	Límite
Frecuencia	$\pm 1\%$
Variación de Tensión	$\pm 10\%$
Flicker	≥ 1
Hueco de tensión	$90\% \geq V_n \geq 10\%$
Interrupción	$V_n \leq 10\%$

2.4.1.5 Distorsión Armónica de Voltaje

Esta norma define límites armónicos hasta el número 25, los que preceden al 25 no tienen gran incidencia en el sistema eléctrico y es por ello que no se los toman en cuenta. En la Tabla 2.10 se detallan los límites establecidos para cada armónico. La distorsión armónica total hasta el armónico 40 no debe superar el 8%.

Tabla 2.10: Límites armónicos norma EN 50160

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden del armónico (h)	Nivel de voltaje	Orden del armónico (h)	Nivel de voltaje	Orden del armónico (h)	Nivel de voltaje
5	6.0 %	3	5.0 %	2	2.0 %
7	5.0 %	9	1.5 %	4	1.0 %
11	3.5 %	15	0.5 %	6 - 24	0.5 %
13	3.0%	21	0.5 %		
17	2.0 %				
19	1.5 %				
23	1.5 %				
25	1.5 %				

2.4.2 IEC 61000-2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems

Aprobada en 2003, la regulación incluye una guía completa sobre los niveles de compatibilidad de cada parámetro que conforma la calidad de energía tales como: fluctuaciones de voltaje, armónicos, interarmónicos, interrupciones del servicio eléctrico, sobretensiones, transitorios y variaciones de la frecuencia [2].

2.4.2.1 Desequilibrio de tensión

La norma evalúa los desequilibrios de voltaje con efectos de largo plazo, es decir con una duración superior a los 10 minutos. El nivel de desequilibrio entre la secuencia negativa y positiva es de 2% y a grandes cargas el valor podría llegar al 3%.

2.4.2.2 Variación de frecuencia

En sistemas de suministro de energía eléctrica la frecuencia debe mantenerse cerca de su valor nominal, intervalo determinado entre ± 1 Hz.

En la Tabla 2.11 se describen los límites armónicos según la norma IEC 61000-2-2.

Tabla 2.11: Límites armónicos norma IEC 61000-2-2

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)	Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)	Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 37$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 39$	0.2	$10 \leq h \leq 40$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

2.4.3 IEC 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances

Aprobada en 2002, esta norma presenta los niveles de perturbaciones en sistemas eléctricos de baja de tensión con frecuencia de 50 y 60 Hz. La norma se divide en tres clases. La primera corresponde a suministros protegidos y sensibles ante perturbaciones en sus fuentes de alimentación, la segunda clase es aplicada a los puntos en los que se conecta con la red pública y la última corresponde a la conexión interna de industrias en donde las cargas fluctúan rápidamente [9].

En la Tabla 2.12 se presentan los niveles permitidos ante perturbaciones establecidos en la norma IEC 61000-2-4.

Tabla 2.12: Límites de tolerancia de perturbaciones norma IEC 61000-2-4

Niveles de tolerancia			
Perturbaciones	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Fluctuaciones de tensión	$\pm 8 \%$	$\pm 10 \%$	$\pm 10 \%$ a 15%
Desequilibrio de tensión	2%	2%	3%
Variación de frecuencia	$\pm 1 \text{ Hz}$	$\pm 1 \text{ Hz}$	$\pm 1 \text{ Hz}$

La normativa define los límites armónicos hasta el número 49 y la distorsión armónica total. En la Tabla 2.13 se detalla los niveles permitidos para cada armónico según la norma IEC 61000-2-4.

Tabla 2.13: Límites de armónicos norma IEC 61000-2-4

Armónicos impares			
Armónicos	Clase 1	Clase 2	Clase 3
5	3%	6%	8%
7	3%	5%	7%
11	3%	3.5%	5%
13	3%	3%	4.5%
17	2%	2%	4%
$17 < h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$4.5 \times (17/h) - 0.5$
Armónicos impares múltiplos de 3			
Armónicos	Clase 1	Clase 2	Clase 3
3	3%	5%	6%
9	1.5%	1.5%	2%
15	0.3%	0.4%	2%
21	0.2%	0.3%	1.75%
$21 < h \leq 45$	0.2%	0.25%	1%
Armónicos pares			
Armónicos	Clase 1	Clase 2	Clase 3
2	3%	5%	6%
4	1.5%	1.5%	2.5%
6	0.3%	0.4%	2%
8	0.2%	0.3%	1.75%
10	0.2%	0.25%	1%
Distorsión armónica total			
Armónicos	Clase 1	Clase 2	Clase 3
THD	5%	8%	10%

2.5 Comparación entre normativas

En la Tabla 2.14 se comparan los límites establecidos para las diferentes perturbaciones que afectan la calidad de energía del sistema eléctrico por cada norma estudiada anteriormente. En las Tablas 2.15, 2.16 y 2.17 se comparan los límites armónicos establecidos por cada norma, los valores expresados se encuentran en porcentaje.

Tabla 2.14: Comparación de perturbaciones según cada normativa

Perturbación	Normativa					
	IEEE 519	IEEE 1250	EN 50160	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	ARCENNR 002/20
THD	8%		8%			8%
Flicker		≤ 1	≤ 1			≤ 1
Frecuencia		± 0.5 Hz	± 1 Hz	± 1 Hz	± 1 Hz	
Variación de voltaje		$\pm 10\%$	$\pm 10\%$		$\pm 10\%$	$\pm 8\%$
Desequilibrio de voltaje		3%	2%	2%	2%	2%
Desequilibrio de corriente	20%					20%

Tabla 2.15: Comparación de armónicos múltiplos 3 según cada normativa

Armónicos impares múltiplos de 3				
Orden	Límites			
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160
3	5%	5%	5%	5%
9	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%
15	0,4%	0,4%	0,4%	0,5%
21	0,3%	0,3%	0,3%	0,5%

Tabla 2.16: Comparación de armónicos impares no múltiplos de 3 según cada normativa

Armónicos Impares no múltiplos de 3				
Orden	Limites			
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160
5	6%	6%	6%	6%
7	5%	5%	5%	5%
11	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%
13	3%	3%	3%	3%
17	2%	2%	2%	2%
19	1,76%	1,76%	1,76%	1,5%
23	1,41%	1,41%	1,41%	1,5%
25	1,27%	1,27%	1,27%	1,5%
$17 \leq h \leq 49$	$2,27x17/h - 0,27$	$2,27x17/h - 0,27$	$2,27x17/h - 0,27$	

Tabla 2.17: Comparación de armónicos pares según cada normativa

Armónicos pares				
Orden	Limites			
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	EN 50160	IEC 61000 2-4
2	2%	2%	2%	5%
4	1%	1%	1%	1,5%
6	0,5%	0,5%	0,5%	0,4%
8	0,5%	0,5%	0,5%	0,3%
10	0,5%	0,5%	0,5%	0,25%
$10 \leq h \leq 50$	$0,25x10/h + 0,25$	$0,25x10/h + 0,25$		$0,25x10/h + 0,25$

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Introducción

La finalidad de este proyecto es determinar si la calidad de energía de los sistemas fotovoltaicos cumple con las normas y regulaciones vigentes. El trabajo de titulación es elaborado bajo la metodología con enfoque cuantitativo y sistemático. La parte cuantitativa mediante la utilización de datos reales de instalaciones fotovoltaicas y la parte sistemática en su procesamiento y comparación mediante parámetros establecidos en las normas vigentes.

En la Figura 3.1 se presenta un flujograma en el que se indica los pasos a seguir para el desarrollo del trabajo.

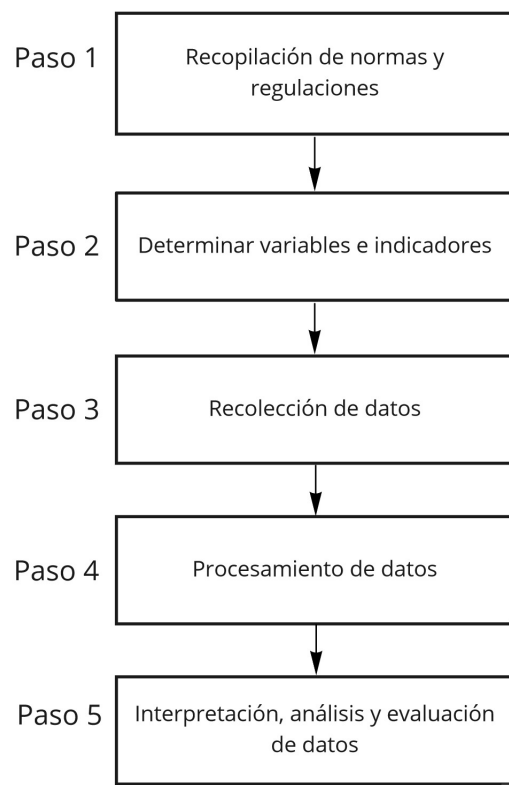


Figura 3.1: Diagrama de flujo

Fuente: Autores

3.2 Recopilación de normas y regulaciones

Para el desarrollo del trabajo, primero, se realiza una investigación de las normas y regulaciones vigentes y actualizadas del sector eléctrico de Ecuador, así como de normativa internacional.

Se realiza el análisis de normativa según la utilidad en cada región en la que es utilizada, clasificándolas en 3 grupos: normativa nacional, americana y europea.

3.3 Determinar variables e indicadores

Se recopilan los parámetros y valores que tienen más influencia en la evaluación y determinación para que el sistema eléctrico sea confiable y de calidad. Siendo los principales los siguientes: nivel de voltaje, nivel de corriente, desequilibrios de voltaje y corriente, frecuencia, flicker y armónicos

3.4 Recolección de datos

Se identificarán sistemas solares fotovoltaicos, y se realizarán mediciones de calidad de energía. En caso de disponer los datos de mediciones de calidad en la red en donde operan los sistemas fotovoltaicos, se emplearán las mismas para el análisis. Se revisará si se cumplen los índices de calidad de energía de la normativa ecuatoriana y otras normas internacionales. En caso de incumplimiento se identificará las causas.

3.4.1 Equipo utilizado

El analizador de calidad eléctrica y energía FLUKE 435 permite la medición, así como el registro de diferentes parámetros que influyen en la calidad de energía eléctrica en la red. Este dispositivo permite realizar el análisis de calidad de energía eléctrica de manera visual y con valores numéricos guardados en su memoria.

Las especificaciones de los analizadores de calidad de energía eléctrica tienen características similares. En caso de disponer datos registrados por terceros, los equipos utilizados deberán dar las mismas mediciones.

3.5 Procesamiento de datos

El programa Excel permite la exportación de los datos registrados por el analizador de calidad de energía, permitiendo el ordenamiento de datos. La herramienta Matlab hace posible la exportación de los datos ordenados desde el programa Excel, generando las gráficas para el análisis de los registros.

3.6 Interpretación, análisis y evaluación de datos

Una vez realizado el procesamiento de los datos se verificó el cumplimiento con las normativas vigentes especificadas en la Tabla 3.1. Se evalúa la calidad de energía de la red con la implementación de los sistemas fotovoltaicos. Finalmente se identifica si es necesario incluir nuevos índices de medición en la normativa local.

Tabla 3.1: Normativas vigentes - 2022

Normativas	
Ecuatoriana	ARCERNNR 002/20
Americana	IEEE 519 IEEE 1250
Europea	EN 50160 IEC 61000 2-2 IEC 61000 2-4

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En Ecuador, se consideran criterios y requisitos relacionados con la conexión de generadores fotovoltaicos con el fin de evitar la degradación de la calidad y confiabilidad del servicio eléctrico a los usuarios. Estos criterios se refieren principalmente a mantenerse dentro de los límites de operación admisibles según la Regulación No. ARCERNNR - 002/20.

En ese mismo sentido las principales normativas que establecen límites para las diferentes perturbaciones eléctricas que degradan la calidad de energía son IEEE 519, IEEE 1159 y IEEE 1250.

Mientras que, en Europa, las principales normativas que detallan los parámetros y límites son EN50160, IEC 61000-2-2 y IEC 61000-2-4.

Debido a la variedad de normas existentes hoy en día, se pretende realizar un análisis de calidad de energía considerando los siguientes indicadores.

- Nivel de voltaje y corriente
- Desequilibrio de voltaje y corriente
- Flicker
- Armónicos
- Frecuencia

4.1 Caso I

En el Anexo A, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana. Los datos fueron medidos por los autores con el equipo FLUKE 435.

La topología es trifásica a cuatro hilos con conexión en estrella. Este sistema está conformado 22 módulos solares SFP - 275 y 22 módulos solares SFM - 300. También posee 2 inversores de la marca Sunny Boy.

El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica. Está diseñado para alimentar una electrolinera ubicada en el parqueadero de la universidad, además los edificios Guillermo Mensi y Mario Rizzini.

Este sistema suministra 12,65 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 11,38 kW. El factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 18,2 %.

Las tensiones de cada fase poseen un 99,85% de efectividad y un desequilibrio del 99,80% de cumplimiento al ser evaluados dentro de los límites establecidos en la normativa ecuatoriana [24] e internacional [9], [26] y [27].

Para la corriente eléctrica del sistema se observa una mayor variación entre corriente mínima y máxima de la fase A respecto a las fases B y C. Provocando un 93,49% de la muestra desequilibrios de corriente superiores al 20% establecido en las normas [4] y [24]. Esto puede estar determinado por el desbalance de las cargas, cortocircuitos producidos en laboratorios o la nula generación del sistema fotovoltaico. Los flicker del sistema evaluado poseen un cumplimiento superior al 99% de las muestras, respecto a lo establecido en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica individual, obtuvo el 100% de valores de la muestra dentro de los límites establecidos en las normas [2], [26] y [27] y de la norma [9]. En la distorsión armónica total se obtuvo como valor máximo 3,45% de THD en la fase A, es decir el 100% la muestra cumple con los valores evaluados de 5% establecido en la norma [26] y 8% determinado por las normas [4], [24] y [27].

De acuerdo a la normativa europea [2], [9] y [27], se obtiene el 100% de cumplimiento de la muestra evaluada para la variación de frecuencia de $\pm 1\%$. La normativa

americana [26], establece una variación del $\pm 0,5\%$ en la frecuencia, obteniendo una obediencia del 99,8% de los valores muestreados.

4.2 Caso II

En el Anexo B, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico perteneciente a la Universidad del Azuay. Los datos fueron medidos por los autores con el equipo FLUKE 435. La topología es trifásica a cuatro hilos con conexión en estrella.

El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica y diseñado para alimentar a la biblioteca Hernán Malo perteneciente a la universidad.

Este sistema suministra 69 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 30,59 kW. Finalmente, el factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 15,96 %.

Las tensiones de las fases poseen un 99,80% de efectividad de tensiones mínimas admisibles. Para los límites máximos de tensiones se tiene un 100% de efectividad en las tres fases. El sistema posee un 99,70% de cumplimiento de desequilibrios cuando son evaluados dentro de lo establecido en las normativas ecuatoriana [24] e internacionales [9], [26] y [27].

Para la corriente eléctrica del sistema se observa una mayor variación entre corriente mínima y máxima en cada fase. Provocando un 99,01% de la muestra desequilibrios de corriente superiores al 20% establecido en las normas [4] y [24]. Los flicker del sistema evaluado poseen un cumplimiento superior al 99,60% de las muestras, respecto a lo determinado en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica individual, obtuvo el 100% de valores de la muestra dentro de los límites establecidos en las normas [2], [26] y [27] y de la norma [9] para armónicos pares e impares no múltiplos de 3. Para las armónicas impares múltiplos de 3, los armónicos 15, 21 y 27 poseen valores superiores a los parámetros determinados en las normas. En la distorsión armónica total se obtuvo como valor máximo 7,58% de THD en la fase A, es decir el 100% la muestra cumple con los valores determinados por las normas [4], [24] y [27].

La normativa europea [2], [9] y [27], establece una variación de $\pm 1\%$ y la normativa americana [26], establece una variación del $\pm 0,5\%$ para la frecuencia. Obteniendo el 100% de valores de la muestra por debajo de estos límites establecidos.

4.3 Caso III

En el Anexo C, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico perteneciente a la Universidad de Cuenca. Los datos registrados fueron provistos por el Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca. El equipo utilizado para la medición fue el analizador de calidad AEMC 8336.

La topología es trifásica a cuatro hilos con conexión en estrella. El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica. Está diseñado únicamente para el uso del laboratorio de microrred perteneciente a la universidad.

Este sistema suministra 15 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 0,96 kW. Finalmente, el factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 5,23 %.

El sistema fotovoltaico de la Universidad del Cuenca cumple con la normativa de calidad de energía eléctrica. Las tensiones de las fases A, B y C poseen una efectividad superior al 99,30% de tensiones mínimas admisibles y 100% en valores de tensiones máximas admisibles cuando el sistema es evaluado mediante la normativa ecuatoriana [24]. Y una efectividad superior al 99,70% cuando se evalúa según la normativa internacional [9], [26] y [27].

Al evaluar el sistema dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana [24] e internacionales [9], [26] y [27], se determina que el sistema no posee desequilibrios de tensión.

La corriente eléctrica del sistema se encuentra muy desequilibrada entre cada fase. Provocando un 97,42% de la muestra de desequilibrios de corriente por debajo del 20% establecido en las normas [4] y [24]. Los flicker del sistema evaluado poseen un cumplimiento superior al 99,50% de las muestras, respecto a lo determinado en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica individual, obtuvo el 100% de valores

de la muestra dentro de los límites establecidos en las normas [2], [26] y [27] y de la norma [9] para armónicos impares múltiplos y no múltiplos de 3. La componente armónica 6 posee valores superiores a los parámetros determinados en las normas. En la distorsión armónica total se obtuvo como valor máximo 1,60% de THD en la fase C, es decir el 100% la muestra cumple con los límites determinados por las normas [4], [24] y [27].

La normativa europea [2], [9] y [27], establece una variación de $\pm 1\%$ y la normativa americana [26], establece una variación del $\pm 0,5\%$ para la frecuencia. Determinando el 100% de valores de la muestra por debajo de estos límites establecidos.

4.4 Caso IV

En el Anexo D, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico residencial 1. Los datos fueron provistos por la empresa Centrosur. El equipo de monitoreo es el PQBox 100.

La topología es bifásica a tres hilos. El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica. Está diseñado para alimentar una vivienda ubicada en el sector Baguanchi del cantón Cuenca.

Este sistema suministra 2 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 0,38 kW. Finalmente, el factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 19,11%.

El sistema fotovoltaico residencial caso 1 posee una calidad de energía eléctrica regular. Las tensiones poseen un 94,35% y 96,53% de efectividad en las muestras de la fase A y B respectivamente evaluadas con una variación de $\pm 8\%$ establecido en [24]. Y una efectividad superior al 95% al ser evaluadas las tensiones respecto a una variación de $\pm 10\%$, valor establecido en las normas [9], [26] y [27]. Los desequilibrios de tensión son evaluados respecto a los límites de 2% establecido por [2], [9], [23] y [27], mientras que el 3% determinado por [26]. Dando por resultado un incumplimiento en las muestras evaluadas del 17,06% y 9,52% para cada limite.

Para la corriente eléctrica del sistema se observa grandes variaciones entre corriente mínima y máxima de las fases A y B. Provocando un 70,83% de la muestra de desequilibrios de corriente superiores al límite de 20% establecido en las normas

[4] y [24]. Los flicker del sistema evaluado poseen un incumplimiento del 9,52% y 11,51% de las muestras en las fases A y B, respecto a lo establecido en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica total se obtuvo como valor máximo 4,18% de THD en la fase A, es decir el 100% la muestra cumple con los valores evaluados de 5% establecido en la norma [26] y 8% determinado por las normas [4], [24] y [27].

4.5 Caso V

En el Anexo E, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico residencial 2. Los datos fueron provistos por la empresa Centrosur. El equipo de monitoreo es el PQBox 100.

La topología es bifásica a tres hilos. El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica. Está diseñado para alimentar una vivienda ubicada en el sector condominios del valle, cantón Cuenca.

Este sistema suministra 1,34 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 0,012 kW. Finalmente, el factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 10,14 %.

El sistema fotovoltaico residencial caso 2 posee una excelente calidad de energía eléctrica. Las tensiones de cada fase poseen un 99,85% de efectividad y para los desequilibrios el cumplimiento del 100% de la muestra, cuando son evaluados dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana [24] e internacionales [9], [26] y [27].

Para la corriente eléctrica del sistema se observa grandes variaciones de corriente entre las fases A y B. Provocando un 90,97% de la muestra de desequilibrios de corriente superiores al límite de 20% establecido en las normas [4] y [24]. Los flicker del sistema evaluado poseen un cumplimiento del 99,70% de las muestras en las fases A y B, respecto a lo establecido en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica total obtuvo como valor máximo 2,43% de THD en la fase A y B, es decir el 100% la muestra cumple con los valores evaluados de 5% establecido en la norma [26] y 8% determinado por las normas [4], [24] y [27].

4.6 Resumen

En las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se presenta el resumen de resultados obtenidos de la evaluación de parámetros de calidad de energía basado en la normativa ecuatoriana, americana y europea respectivamente. Se resumen los porcentajes del cumplimiento de los parámetros eléctricos obtenidos durante las mediciones en cada sistema analizado.

Según la normativa ARCERNNR 002/20, si el parámetro analizado supera el 95% de cumplimiento de los datos registrados durante la medición en cada fase, se considera que este está dentro del límite de calidad establecido por cada normativa. Cabe resaltar que esta regulación está basada con la normativa americana.

A continuación, se describe la nomenclatura utilizada en las tablas de resumen:

N/L La normativa no define este parámetro

N/D El parámetro no fue medido

Tabla 4.1: Resumen de resultados - Normativa ecuatoriana

Resumen de resultados - Normativa Ecuatoriana													
Perturbación	Universidad Politecnica Salesiana			Universidad del Azuay			Universidad de Cuenca			Caso residencial 1		Caso residencial 2	
	12,65 kW			69,00 kW			15 kW			2,00 kW		1,34 kW	
Potencia	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
Fase	99,85%	99,85%	100%	99,80%	99,90%	99,90%	99,50%	99,30%	99,60%	94,35%	96,53%	99,60%	99,60%
Nivel de tensión	99,80%			99,70%			100%			82,94%		100%	
Desequilibrio de tensión	6,51%			0,99%			97,42%			29,17%		9,03%	
Desequilibrio de corriente	99,41%	99,56%	99,41%	99,60%	99,60%	99,80%	99,50%	99,50%	99,80%	90,48%	88,49%	99,70%	99,70%
Flicker	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	
Distorsión armónica individual	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distorsión armónica total	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	
Frecuencia	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	

Tabla 4.2: Resumen de resultados - Normativa americana

Resumen de resultados - Normativa americana													
Perturbación	Universidad Politecnica Salesiana			Universidad del Azuay			Universidad de Cuenca			Caso residencial 1		Caso residencial 2	
	12,65 kW			69,00 kW			15 kW			2,00 kW		1,34 kW	
Fase	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
Nivel de tensión	99,85%	99,85%	100%	99,80%	99,90%	99,90%	99,70%	99,70%	99,80%	95,04%	97,42%	99,60%	99,60%
Desequilibrio de tensión	99,80%			99,70%			100%			90,48%		100%	
Desequilibrio de corriente	6,51%			0,99%			97,42%			29,17%		9,03%	
Flicker	99,41%	99,56%	99,41%	99,60%	99,60%	99,80%	99,50%	99,50%	99,80%	90,48%	88,49%	99,70%	99,70%
Distorsión armónica individual	Todos cumplen con las normativas			Armónico 15, 21 y 27 fuera de los límites establecidos			Armónico 6 fuera de los límites establecidos			N/D		N/D	
Distorsión armónica total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Frecuencia	99,80%			100%			100%			N/D		N/D	

Tabla 4.3: Resumen de resultados - Normativa europea

Resumen de resultados - Normativa europea													
Perturbación	Universidad Salesiana			Universidad del Azuay			Universidad de Cuenca			Caso residencial 1		Caso residencial 2	
	12,65 kW			69,00 kW			15 kW			2,00 kW		1,34 kW	
Potencia	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
Fase	99,85%	99,85%	100%	99,80%	99,90%	99,90%	99,70%	99,70%	99,80%	95,04%	97,42%	99,60%	99,60%
Nivel de tensión	99,80%			99,70%			100%			82,94%		100%	
Desequilibrio de tensión	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	
Desequilibrio de corriente	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	
Flicker	99,41%	99,56%	99,41%	99,60%	99,60%	99,80%	99,50%	99,50%	99,80%	90,48%	88,49%	99,70%	99,70%
Distorsión armónica individual	Todos cumplen con las normativas			Armónico 15, 21 y 27 fuera de los límites establecidos			Armónico 6 fuera de los límites establecidos			N/D		N/D	
Distorsión armónica total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Frecuencia	100%			100%			100%			N/D		N/D	

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

En los resultados del trabajo se pudo apreciar que el nivel de voltaje, corriente, desequilibrios, flicker, armónicos y frecuencia son indicadores que permiten evaluar la calidad de energía de un sistema eléctrico. Esto coincide con los trabajos realizados en [17] y [19] en los que los sistemas son evaluados únicamente con la normativa ecuatoriana.

En [1], la evaluación determinó variaciones de tensión dentro de los límites establecidos en [2] y [3]. La variación de corriente está fuera de lo establecido en la normativa, debido a una variación en el tercer armónico. Los resultados del presente trabajo también poseen un incumplimiento en el parámetro debido a que se determinaron incrementos en los armónicos 15, 21 y 27 respecto a los límites establecidos en [4] y [24].

En [5], la evaluación de los armónicos y el análisis de calidad de energía obtuvo un incumplimiento de valores en las componentes armónicas individuales pares a excepción del armónico 34, para los sistemas evaluados en este trabajo mediante las normas [2], [4], [9], [26] y [27]. El caso III, es el sistema que presentó este tipo de variaciones, el armónico par 6 incumple con los valores establecidos en las regulaciones. Para el caso III y [5] este efecto es producido por algunas cargas no lineales que se encuentran conectadas al sistema.

En [11], se obtuvo variaciones en los niveles de tensión entre 4% y 9% cuando el sistema fotovoltaico se encontraba conectado a la red de energía eléctrica. En los sistemas fotovoltaicos evaluados se evidencia variaciones en la tensión de hasta 5,01% para el caso I, 4,60% para el caso II, 4,17% para el caso III, 11,55% para el caso IV y 1,33% para el caso V. El caso IV, posee elevaciones de tensión significativas. Con el fin de reducir estas variaciones de tensión del sistema y en [11], se recomienda

limitar las cargas evitando así superar lo generado por los sistemas fotovoltaicos instalados.

Los resultados obtenidos en [19] y los de este trabajo, presentan un cumplimiento general de la normativa ecuatoriana, americana y europea superior al 95% necesario en los parámetros de nivel de tensión, nivel de corriente, frecuencia, distorsión armónica individual y total. Presentándose incumplimientos en los parámetros de desequilibrios de tensión y flicker para el caso IV, así como un incumplimiento del indicador de desequilibrios de corriente en el 80% de los sistemas evaluados en este trabajo, es decir, únicamente el caso III está dentro de los límites establecidos en cada normativa para este parámetro.

La evaluación de calidad de energía eléctrica realizada en [17] y en el presente trabajo, determinaron desequilibrios de tensión por debajo de los límites establecidos en las normativas. A excepción del caso IV, donde se evidencia que menos del 95% de la muestra incumple este parámetro. Sin embargo, como en estudios anteriores se identifica el incumplimiento en valores de desequilibrio de corriente para los sistemas evaluados y en [17]. Esto debido a los desbalances presentes en los puntos de baja tensión en nuestro país. Los indicadores restantes se encuentran dentro de los límites establecidos, corresponden cumplimientos superiores al 95% de las muestras evaluadas.

Los resultados presentan pequeñas variaciones entre las normativas estudiadas. Sin embargo, existen parámetros que no son analizados en la regulación ecuatoriana como la distorsión armónica individual y la frecuencia. El estudio de los armónicos individuales pueden ser de gran ayuda al momento de detectar sobrecalentamientos en los equipos eléctricos. Con respecto a la frecuencia, si bien este parámetro siempre estuvo dentro de los límites establecidos, su análisis podría evitar fallas en máquinas eléctricas especialmente en industrias.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La calidad de energía de un sistema eléctrico se refiere al comportamiento durante el tiempo de las señales de voltaje y corriente. Se busca establecer si el sistema eléctrico es confiable y seguro. Son varias las causas que producen que la calidad de energía sea deficiente, normalmente se debe a perturbaciones en la línea eléctrica, variaciones de voltaje, interrupciones del servicio y distorsiones armónicas.

Según las diferentes normativas estudiadas y analizadas se logra establecer que, el nivel de voltaje y corriente, desequilibrios de voltaje y corriente, flicker, distorsión armónica y frecuencia son los parámetros que más relevancia tienen en el análisis de calidad de energía en sistemas fotovoltaicos.

En este trabajo se realizó el análisis de cinco sistemas fotovoltaicos diferentes ubicados en la ciudad de Cuenca, las mediciones obtenidas de la Universidad Politécnica Salesiana y la Universidad del Azuay fueron realizadas por los autores. Las mediciones de la Universidad de Cuenca las realizaron el laboratorio de microrredes de la institución y las medidas de los sistemas residenciales a cargo de la empresa eléctrica Centrosur.

Al obtener las mediciones de diferentes fuentes se observa que existen diferentes equipos que realizan el registro de los datos. Sin embargo, se puede advertir que los parámetros de medición realizados por los autores y el laboratorio de microrredes de la Universidad de Cuenca son más completos que los registrados por la empresa eléctrica CENTROSUR.

Al realizar el análisis en cada sistema fotovoltaico estudiado se puede observar

el incumplimiento en los desequilibrios de corriente con respecto a las normativas ecuatoriana y americana. Este incumplimiento se debe a que en horas de baja o nula generación eléctrica el sistema se comporta como una carga inyectando corriente a la red de distribución.

Con referencia a los resultados alcanzados en el estudio del caso IV, se observa que existen incumplimientos en la mayoría de los parámetros estudiados. Los mismos que, sugieren una baja eficacia en los equipos eléctricos conectados en la vivienda que reducen la calidad de energía.

Debido a la similitud que existe entre los límites de las normativas ecuatoriana, americana y europea, no se presentan grandes diferencias entre los resultados al ser analizados por cada normativa. Sin embargo, no existe un consenso en los parámetros que deben ser estudiados para determinar la calidad de energía eléctrica de un sistema fotovoltaico.

El estudio de la calidad de energía determina el cumplimiento de los límites establecidos para los casos I, II, III y V, a excepción de los desequilibrios de corriente. Sin embargo, el caso IV presenta incumplimientos en mediciones de voltaje, desequilibrios de tensión, corriente y flicker, es decir el sistema incumple con el 80% de parámetros en los que fue evaluado. Problemas que pueden ser resueltos mediante la evaluación de las cargas conectadas en el sistema.

6.2 Recomendaciones

Actualizar la normativa de calidad de energía ecuatoriana definiendo y delimitando la distorsión armónica individual, debido a que con este análisis se puede detectar sobrecargas en la red eléctrica que pueden acortar la vida útil de equipos eléctricos y de los conductores.

Realizar estudios de la distorsión armónica individual de los sistemas eléctricos para elaborar métodos de reducción de estos armónicos, esto debido al incremento de equipos electrónicos y cargas no lineales conectados a la red.

Establecer una normativa de calidad de energía eléctrica específica para sistemas fotovoltaicos, debido al incremento de generación de energía fotovoltaica en el país.

Redactar una regulación para definir la conexión o desconexión del sistema fotovoltaico de la red teniendo en cuenta factores ambientales y así minimizar el impacto de los desequilibrios de corriente que son debido a los momentos que no existe generación de energía por parte del sistema fotovoltaico comportándose éste como carga.

Realizar un correcto balance de cargas en cada fase del sistema, para así poder reducir los desequilibrios de voltaje y corriente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Adbullah. *Power Quality Analysis at Murdoch University*. thesis, Murdoch University School of Engineering and Information Technology, July 2018.
- [2] International Electrotechnical Commission (IEC). Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. 2002.
- [3] National Electric Manufacturers Association (NEMA). Performance Measurements and Quality Control Guidelines for Non-Imaging Intraoperative Gamma Probes. 2004.
- [4] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pages 1–29, June 2014.
- [5] A.R. Oliva and J.C. Balda. A PV dispersed generator: a power quality analysis within the IEEE 519. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2):525–530, April 2003.
- [6] M. Halpin. Overview of revisions to IEEE standard 519-1992. In *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003. CIGRE/PES 2003*. IEEE, 2003.
- [7] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, pages 1–138, 2018.
- [8] R. Tonkoski, D. Turcotte, and T. EL-Fouly. Impact of High PV Penetration on Voltage Profiles in Residential Neighborhoods. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3:518–527, July 2012.

- [9] International Electrotechnical Commission (IEC). Environment - Compatibility Levels in Industrial Plants for low-frequency Conducted Disturbances. 2002.
- [10] Y. Kolomiets, Y. Menshikov, and A. Tarasenko. Influence of Insulation Level on Electric Power Quality and Transformation Efficiency of Grid-Connected Photovoltaic Power Plants. 54:18–23, 2018.
- [11] A. Sharma, M. Kolhe, A. Kontou, D. Lagos, and P. Kotsampopoulos. Solar photovoltaic-based microgrid hosting capacity evaluation in electrical energy distribution network with voltage quality analysis. *SN Applied Sciences*, 3, apr 2021.
- [12] J. Marroquín. Estudio de calidad de energía y eficiencia energética en el edificio del Ministerio de Relaciones Exteriores, zona 10, Guatemala. 2020.
- [13] B. Singh and S. Goel. Adaptive Harmonic Detection Control of Grid Interfaced Solar Photovoltaic Energy System with Power Quality Improvement. *Journal of The Institution of Engineers (India)*, 96:37–45, jul 2014.
- [14] I. Mahendrarvarman, S. A. Elankurisil, M. Venkateshkumar, A. Ragavendiran, and N. Chin. Artificial intelligent controller-based power quality improvement for microgrid integration of photovoltaic system using new cascade multilevel inverter. *Soft Computing*, June 2020.
- [15] Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL). Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica. 2018.
- [16] M. Lata and A. Sánchez. *Análisis de calidad de energía eléctrica de un sistema hospitalario “básico de segundo nivel” suministrado por la red convencional y su mejora mediante energía solar fotovoltaica*. PhD thesis, Universidad de Cuenca, October 2020.
- [17] D. Domínguez and B. Salvatierra. *Análisis de Calidad de Energía Eléctrica en Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red*. PhD thesis, Universidad Politécnica Salesiana, July 2016.
- [18] Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL). Requerimientos técnicos para la conexión y operación de generadores renovables no convencionales a las redes de transmisión y distribución. 2015.
- [19] J. Arias and C. 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*. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, aug 2019.

- [20] R. Rodríguez. Análisis de la calidad de energía en el sistema eléctrico, utilizando equipo de medición de parámetros de sistemas fotovoltaicos. 2012.
- [21] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality - Redline. *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009) - Redline*, pages 1–180, 2019.
- [22] Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL). Generación fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica. 2018.
- [23] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). Marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica. 2021.
- [24] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica. 2020.
- [25] American National Standards Institute (ANSI). Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hz). 2020.
- [26] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems. *IEEE Std 1250-2018 (Revision of IEEE Std 1250-2011)*, 2018.
- [27] European Standard (EN). Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, year=2010*.

ANEXOS

ANEXO A

Caso I

Características de sistema: Universidad Politécnica Salesiana

- **Ubicación de medición:** Salida del transformador #19597P
- **Nivel de tensión:** 127/220 V
- **Topología de medición:** Trifásico
- **Equipo de monitoreo:** FLUKE 435
- **Período de medición:** Desde 18/01/2022 hasta 25/01/2022
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos fueron medidos por los autores con el equipo FLUKE 435 perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana.

Nivel de tensión

En la Tabla A.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla A.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla A.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,26 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				110,41 V	132,46 V
99,85 % Cumple	0,15 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 14:54	Fecha y hora 23-01-2022 07:54

Tabla A.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,26 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				110,41 V	132,46 V
99,85 % Cumple	0,15 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 14:54	Fecha y hora 23-01-2022 07:54

Se observa que, para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,15%. Para las tensiones máximas, toda la muestra está dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla A.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla A.4, se expone la evaluación de la muestra con las normativa americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla A.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,86 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				105,71 V	133,36 V
99,85 % Cumple	0,15 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 14:54	Fecha y hora 23-01-2022 07:54

Tabla A.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,86 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				105,71 V	133,36 V
99,85 % Cumple	0,15 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 14:54	Fecha y hora 23-01-2022 07:54

Se observa que, para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,15%. Para las tensiones máximas, toda la muestra está dentro de lo determinado por las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla A.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla A.6, se expone la evaluación de la muestra con las normativa americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla A.5: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,69 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				120,56 V	132,93 V
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 11:24	Fecha y hora 23-01-2022 08:14

Tabla A.6: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,69 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				120,56 V	132,93 V
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 11:24	Fecha y hora 23-01-2022 08:14

Se observa que para las tensiones mínimas y máximas, toda la muestra esta dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

En las Figuras A.1, A.2 y A.3, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.



Figura A.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores



Figura A.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores

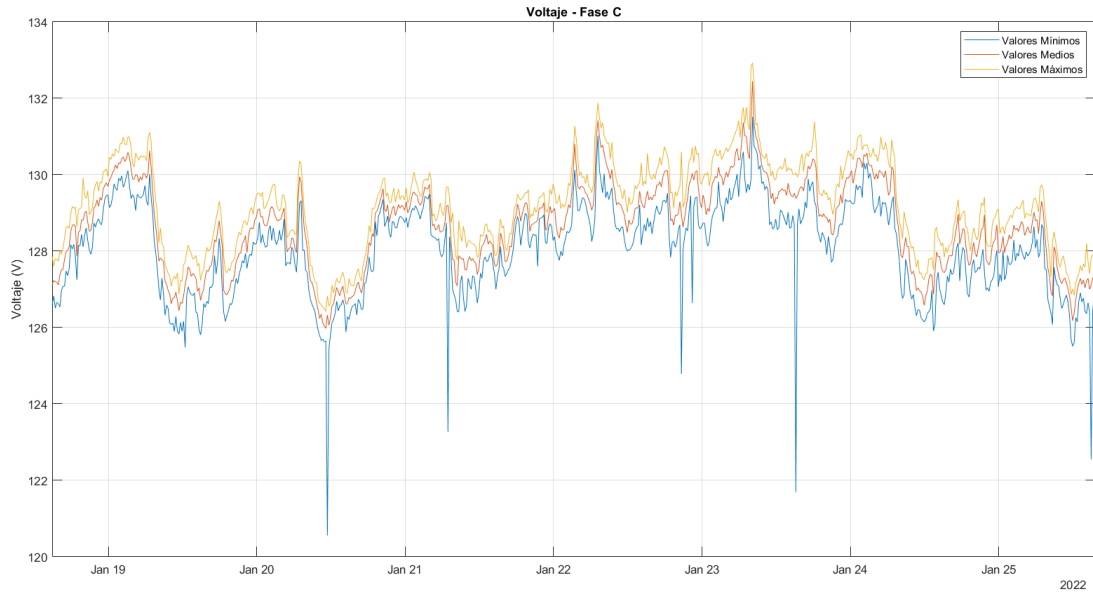


Figura A.3: Niveles de tensión - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase son similares, presentándose únicamente pequeñas diferencias en la fase C con respecto a las fases A y B.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla A.7, se presenta el resumen de mediciones y se evalúa con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla A.8, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en la normativa americana IEEE 1250.

Tabla A.7: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,27 \%$	
Muestras mayores al límite (2)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,02 %	9,12 %
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 07:54	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.8: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,27 \%$	
Muestras mayores al límite (2)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,02 %	9,12 %
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 07:54	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,20% tanto en las normativas nacionales como internacionales.

En la Figura A.4, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

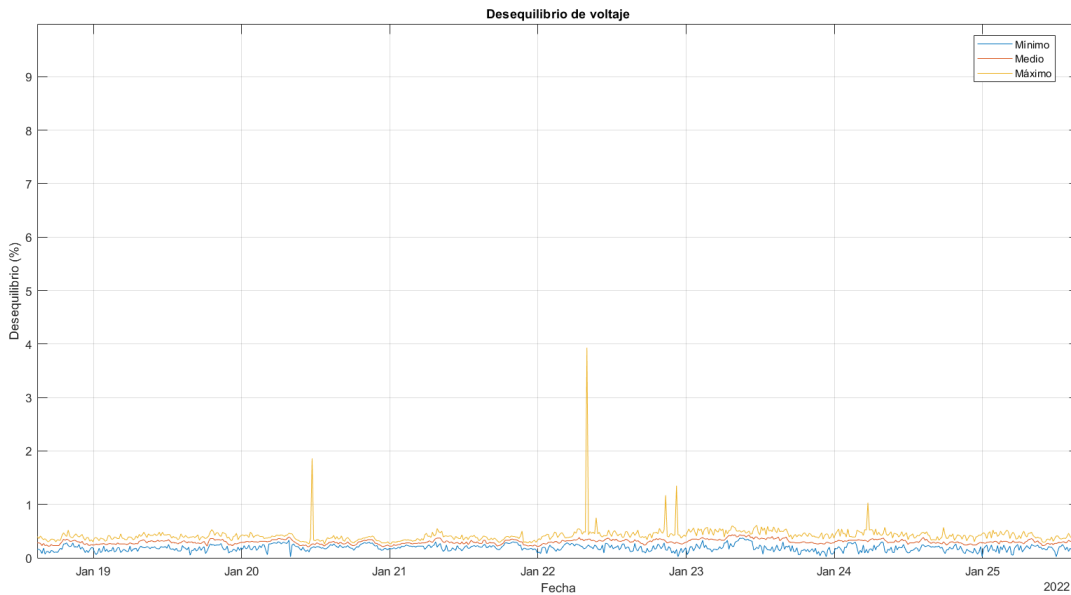


Figura A.4: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la similitud que existe entre los valores de tensión de cada fase, se concluye que, el desequilibrio de tensión se encuentra en un gran porcentaje dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas A.9, A.10 y A.11, se presenta el resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas durante la medición.

Tabla A.9: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 39,38 A	
Mínimo	Máximo
3 A	183 A
Fecha y hora 23-01-2022 07:54	Fecha y hora 19-01-2022 18:54

Tabla A.10: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 30,09 A	
Mínimo	Máximo
6 A	145 A
Fecha y hora 23-01-2022 08:24	Fecha y hora 20-01-2022 08:54

Tabla A.11: Niveles de corriente - Fase C

NIVELES DE CORRIENTE - FASE C	
Ipromedio = 33,49 A	
Mínimo	Máximo
3 A	154 A
Fecha y hora 23-01-2022 08:24	Fecha y hora 24-01-2022 09:24

En las Figuras A.5, A.6 y A.7, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

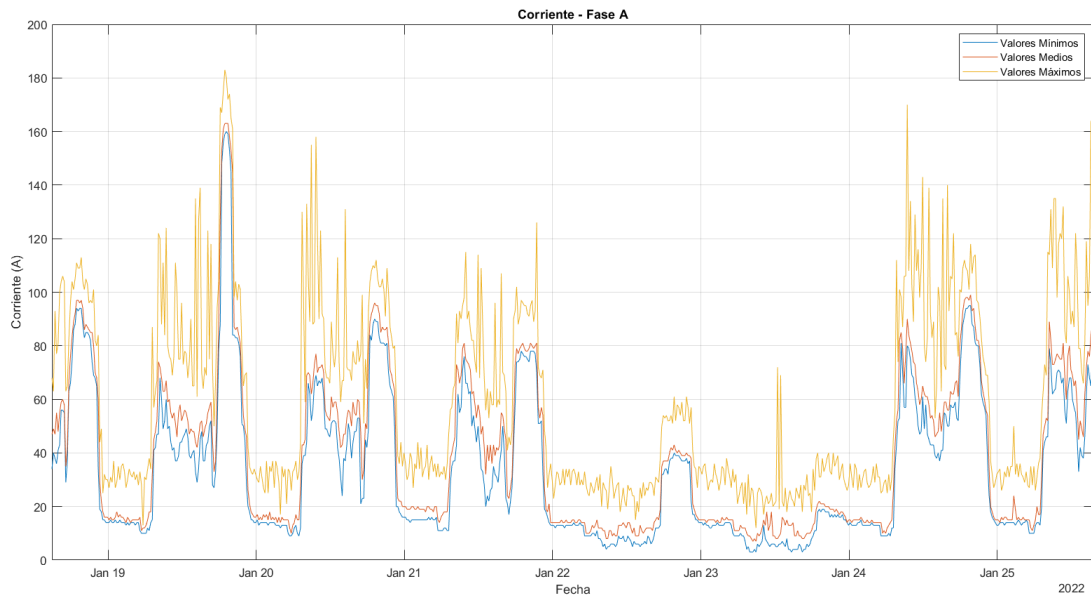


Figura A.5: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

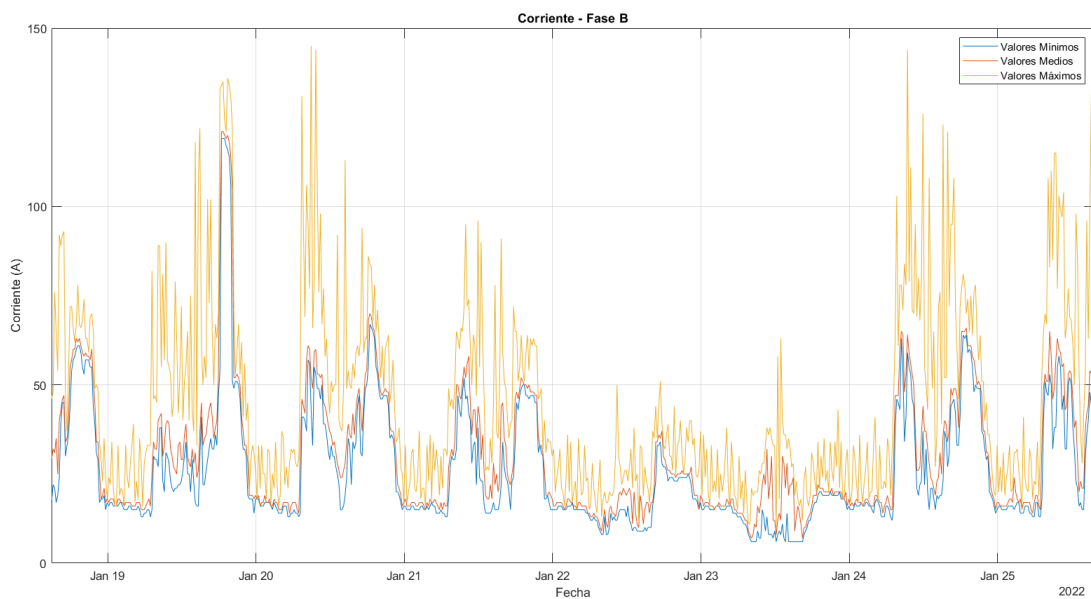


Figura A.6: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

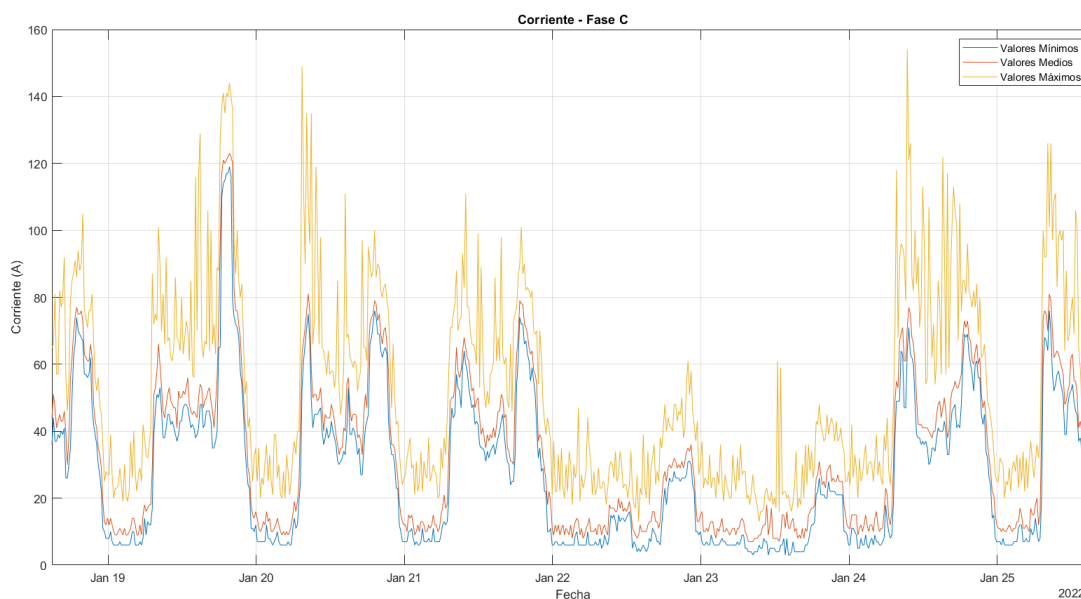


Figura A.7: Niveles de corriente - Fase C

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se puede observar varias diferencias entre las fases, además se puede evidenciar elevaciones de corriente a partir del medio día y parte de la noche. Por otra parte, en los días 22, 23 y las madrugadas los valores de corriente disminuyen significativamente.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla A.12, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla A.12: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 47,23 %	
Muestras mayores al límite (943)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,02 %	327,67 %
6,51 %	93,49 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	20-01-2022 18:14	22-01-2022 10:54

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos es de 93,49% tanto en las normativas nacionales e internacionales.

En la Figura A.8, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

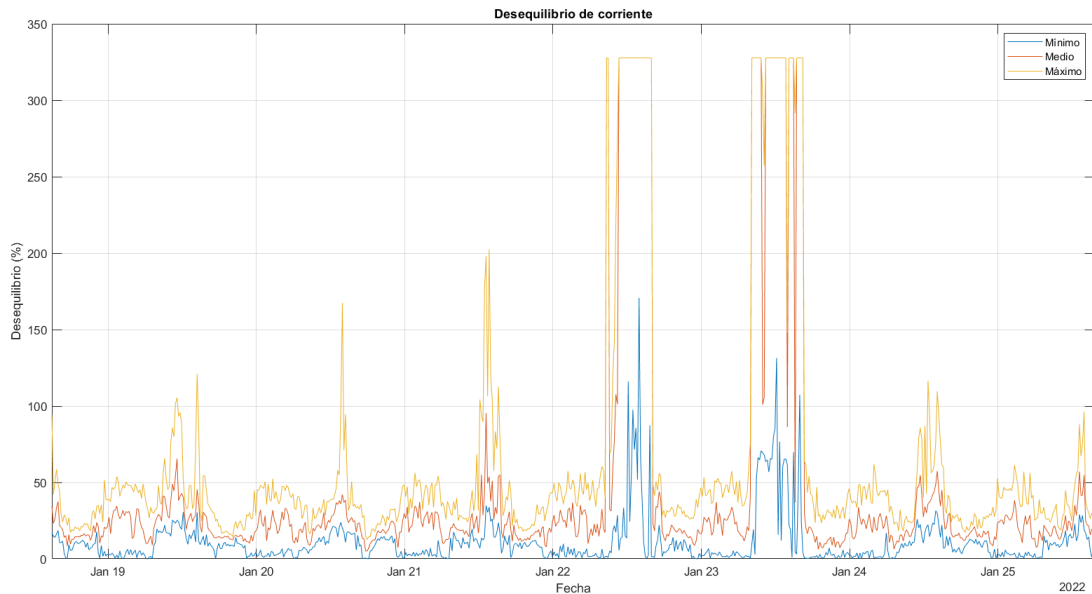


Figura A.8: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

Debido a la gran diferencia entre los valores de corriente registrados durante la medición, se muestra que los desequilibrios de corriente en su mayoría están fuera de los límites establecidos por cada normativa.

Los desbalances presentados en la Universidad Politécnica Salesiana se debe a las cargas utilizadas, es decir:

- Arranque de motores monofásicos y trifásicos produciendo incrementos de corriente
- Cortocircuitos producidos en los laboratorios de la universidad
- Desbalance de cargas en las fases
- El sistema fotovoltaico inyecta corriente al transformador debido a la falta de generación de energía

Flicker

En las Tablas A.13, A.14 y A.15, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Tabla A.13: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,23$ p.u	
≤ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,41 %	0,59 %	0,05 p.u	4,15 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 23-01-2022 10:54	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.14: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,24$ p.u	
≤ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,56 %	0,44 %	0,05 p.u	3,53 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 24-01-2022 19:14	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.15: Nivel de flicker - Fase C

FLICKER - FASE C			
Límite flicker		$P_{st} = 0,25$ p.u	
≤ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,41 %	0,59 %	0,05 p.u	1,54 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 05:54	Fecha y hora 23-01-2022 15:14

Se observa que en las fases A y C, las muestras que están fuera de los límites establecidos son únicamente 0,59%. Para la fase B, este valor corresponde a 0,44% tanto en la normativa nacional como internacional.

En las Figuras A.9, A.10 y A.11, se presenta el comportamiento de los flicker en cada una de las fases por medio de los valores registrados durante la medición.

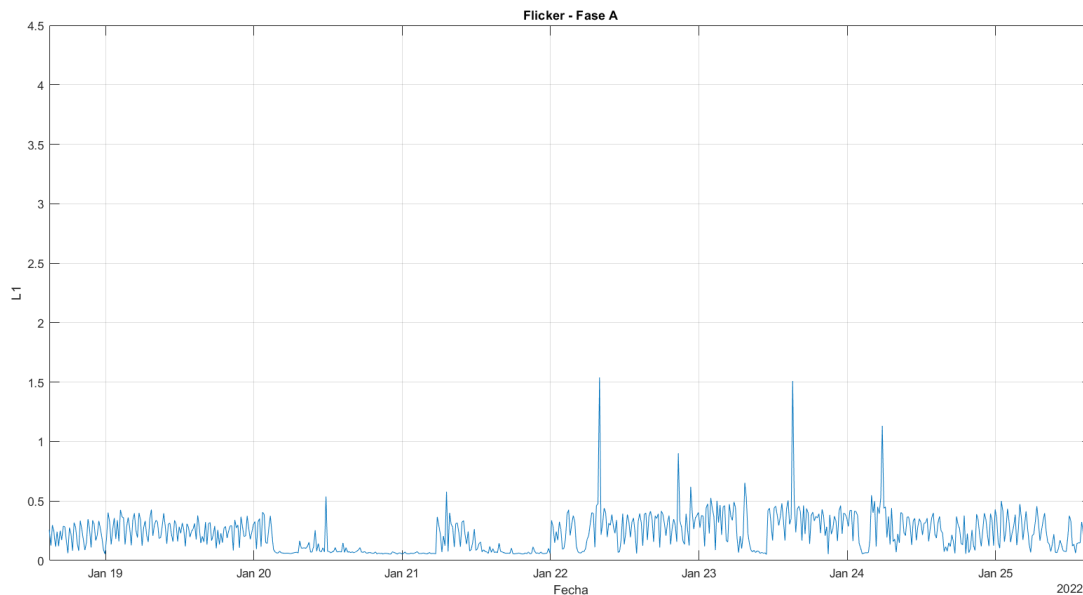


Figura A.9: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

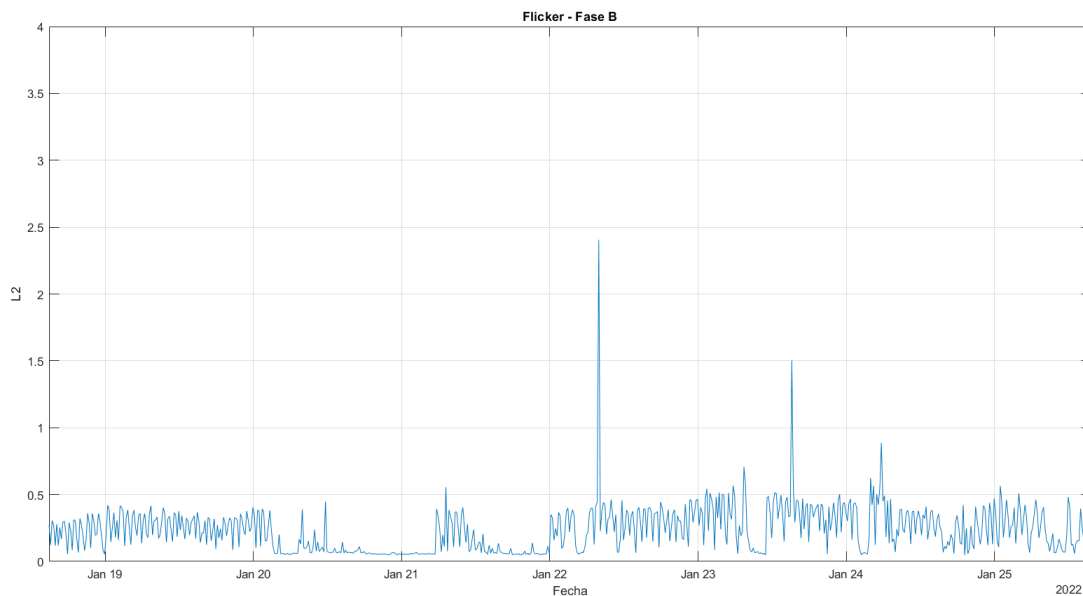


Figura A.10: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

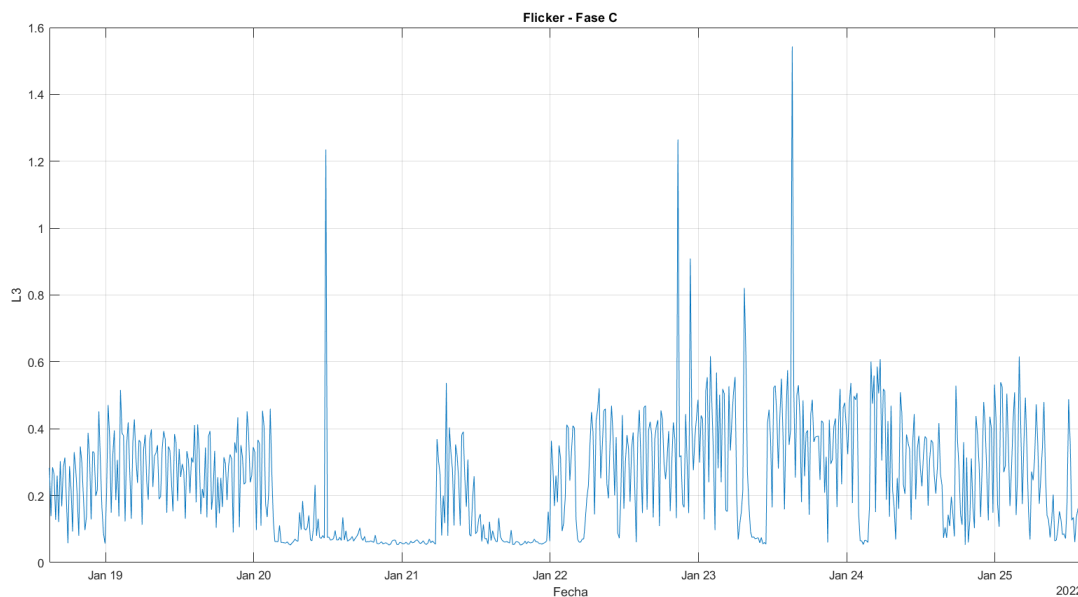


Figura A.11: Flicker - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que en la fase A se encuentra el flicker más alto registrado. Sin embargo, en la fase C existen mayores variaciones de este indicador.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, estas se presentan en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión armónica individual

En las Tablas A.16, A.17 y A.18, se presenta el resumen mediciones de las componentes armónicas individuales y se las compara con los límites establecidos en las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4.

Tabla A.16: Componentes armónicos pares de voltaje

Armónicos individuales de voltaje pares							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	EN 50160	IEC 61000 2-4	Máximo	Máximo	Máximo
2	2%		2%	5%	0,15	0,14	0,15
4	1%		1%	1,5%	0,07	0,07	0,07
6	0,5%		0,5%	0,4%	0,04	0,03	0,03
8	0,5%		0,5%	0,3%	0,02	0,02	0,02
10	0,5%		0,5%	0,25%	0,02	0,02	0,02
12	0,46%		0,5%	0,25%	0,01	0,02	0,02
14	0,43%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01
16	0,41%		0,5%	0,25%	0,02	0,01	0,01
18	0,39%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01
20	0,38%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01
22	0,36%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01
24	0,35%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01

Tabla A.17: Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3

Armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
5	6%			6%	2,41%	1,94	2,06
7	5%			5%	0,64	0,51	0,5
11	3,5%			3,5%	0,41	0,51	0,37
13	3%			3%	0,35	0,22	0,22
17	2%			2%	0,2	0,13	0,11
19	1,76%			1,5%	0,18	0,12	0,15
23	1,41%			1,5%	0,1	0,13	0,09
25	1,27%			1,5%	0,12	0,08	0,11

Tabla A.18: Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3

Armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3							
Orden	Límites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
3	5%	5%	5%	5%	0,93%	0,77%	0,85%
9	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	0,22%	0,2%	0,27%
15	0,4	0,4	0,4	0,5%	0,12%	0,13%	0,13%
21	0,3%	0,3%	0,3%	0,5%	0,09%	0,12%	0,11%

Se observa que todas las componentes armónicas individuales están dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura A.12, se presenta el comportamiento de los armónicos pares, en la Figura A.13, se presenta el comportamiento de los armónicos impares múltiplos de 3 y en la Figura A.14, se presenta el comportamiento de los armónicos impares no múltiplos de 3. Estos valores se muestran para cada fase y fueron registrados durante la medición.

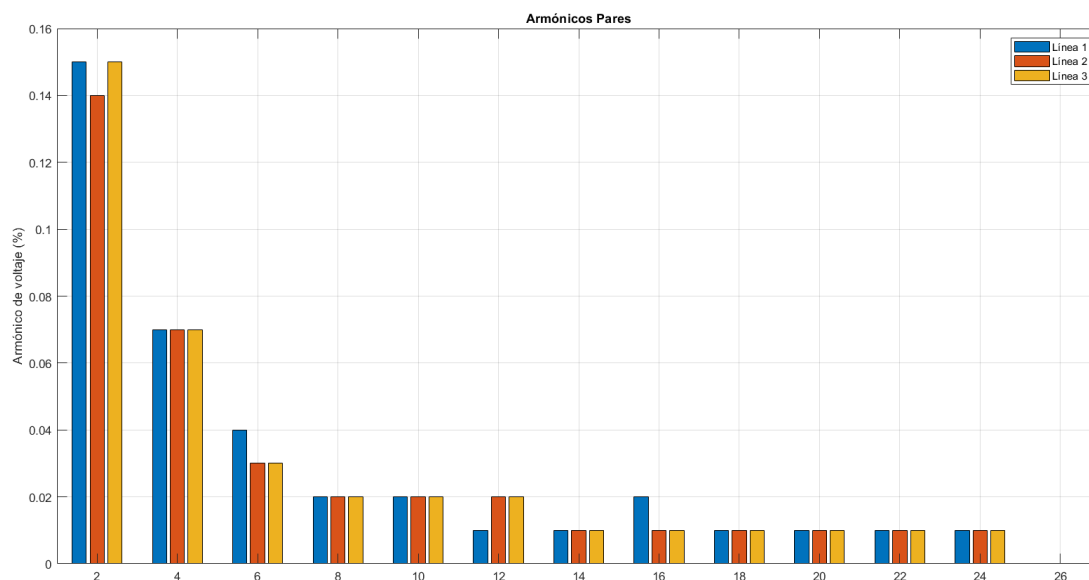


Figura A.12: Armónicos pares

Fuente: Autores

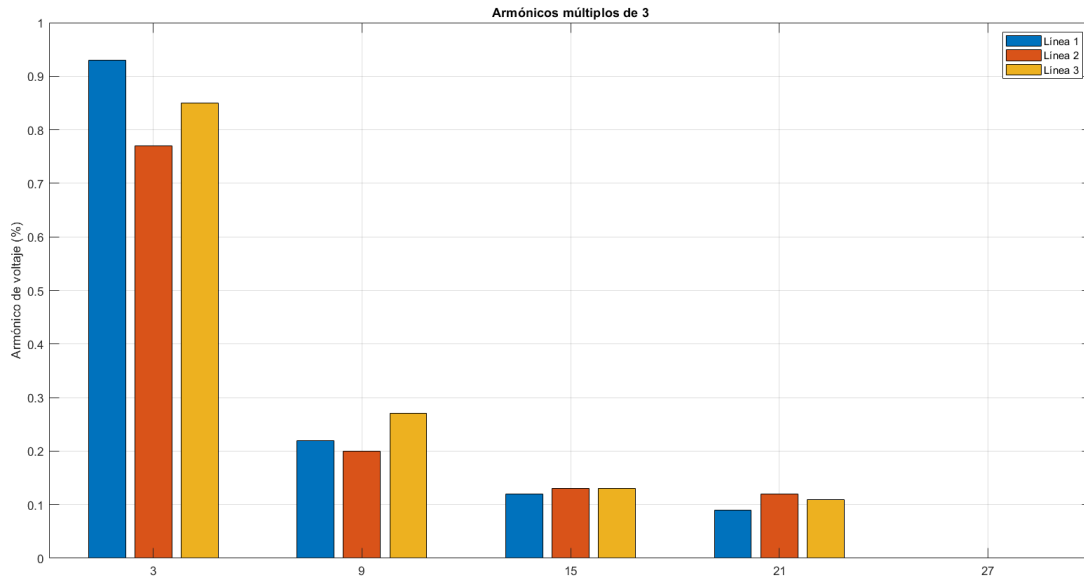


Figura A.13: Armónicos impares múltiplos de 3

Fuente: Autores

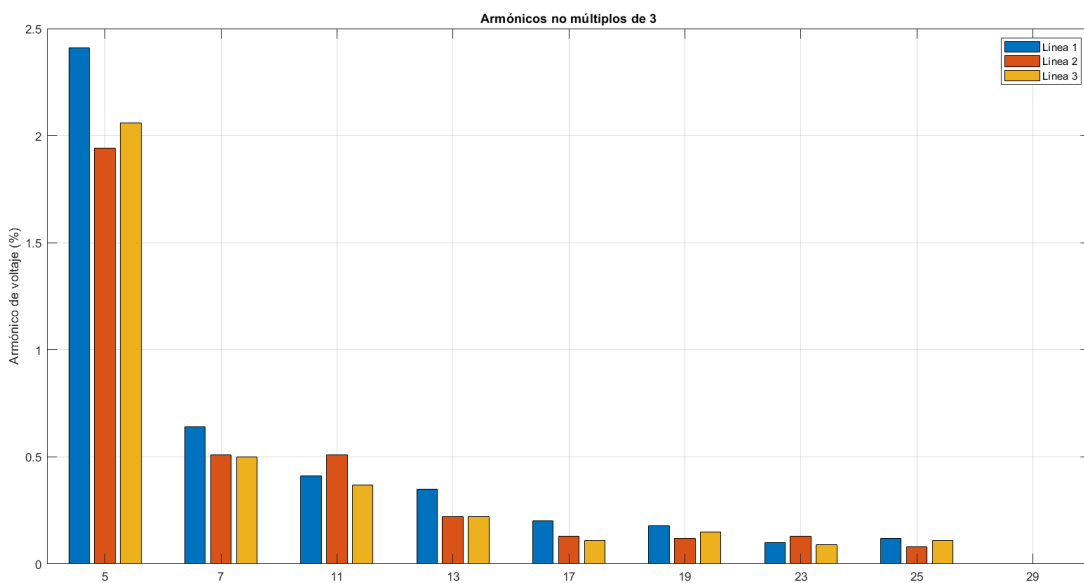


Figura A.14: Armónicos impares

Fuente: Autores

Se observa que los valores de las componentes armónicas individuales se encuentran dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

Distorsión Armónica Total

En las Tablas A.19, A.20 y A.21, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 519 y europea EN50160.

Tabla A.19: Distorsión armónica total - Fase A

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,56%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,66 %	3,45 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 03:54	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.20: Distorsión armónica total - Fase B

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,34%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,61%	3,43%
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 23-01-2022 07:24	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.21: Distorsión armónica total - Fase C

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE C			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,29%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,45 %	2,49 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 02:14	Fecha y hora 25-01-2022 14:14

Se observa que todas las muestras evaluadas cumplen con los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura A.15, se presenta la distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

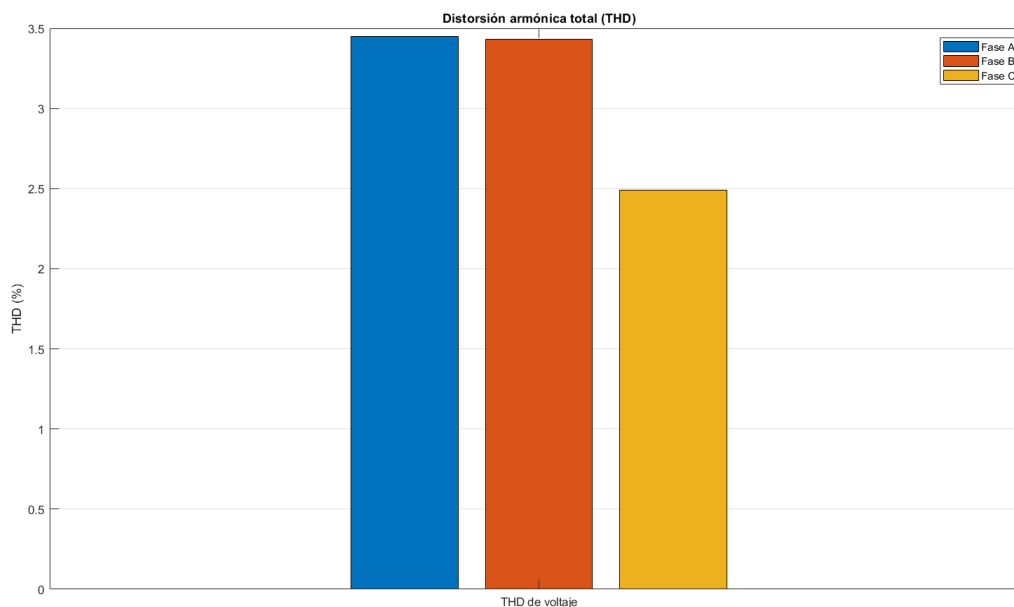


Figura A.15: Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales presentes en cada fase no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

En la Tabla A.22, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas europeas EN50160, IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-2. En la Tabla A.23, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa americana IEEE 1250.

Tabla A.22: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia (± 1 Hz)				Frecuencia = 60 Hz	
-1 Hz	59 Hz	+1 Hz	61 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,82 Hz	60,12 Hz
100 % Cumple	0,00 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 18-01-2022 14:54	Fecha y hora 18-01-2022 15:14

Tabla A.23: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia ($\pm 0,5$ Hz)				Frecuencia = 60 Hz	
-1 Hz	59,5 Hz	+1 Hz	60,5 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,82 Hz	60,12 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 18-01-2022 14:54	Fecha y hora 18-01-2022 15:14

Se observa que todas las muestras evaluadas cumplen con los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura A.16, se presenta el comportamiento de la frecuencia por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

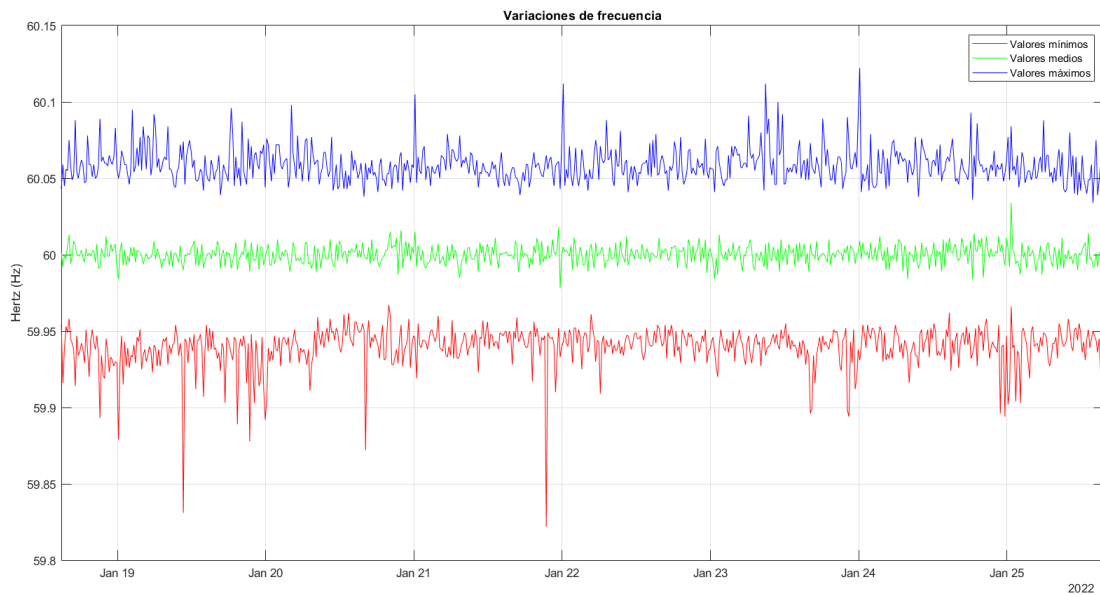


Figura A.16: Niveles de Frecuencia

Fuente: Autores

Se observa que los valores de frecuencia cumplen con los límites establecidos por las normativas internacionales.

ANEXO B

Caso II

Características de sistema: Universidad del Azuay

- **Ubicación de medición:** Tablero de generación de CA fotovoltaica
- **Nivel de tensión:** 127/220 V
- **Topología de medición:** Trifásico
- **Equipo de monitoreo:** FLUKE 435
- **Período de medición:** Desde 27/04/2022 hasta 04/05/2022
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos fueron medidos por los autores con el equipo FLUKE 435 perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana.

Nivel de tensión

En la Tabla B.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla B.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla B.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,80 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				96,76 V	132,36 V
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 06:18	Fecha y hora 02-05-2022 03:38

Tabla B.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,80 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				96,76 V	132,36 V
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 06:18	Fecha y hora 02-05-2022 03:38

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,20%. Para las tensiones máximas, todas las muestras cumplen con las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla B.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla B.4, se expone la evaluación de la muestra con las normativas IEEE 1250, EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla B.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,99 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				99,74 V	132,60 V
99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:48	Fecha y hora 01-05-2022 06:48

Tabla B.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,99 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				99,74 V	132,60 V
99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:48	Fecha y hora 01-05-2022 06:48

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,10%. Para las tensiones máximas, toda la muestra cumple con las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla B.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla B.6, se expone la evaluación de la muestra con las normativas IEEE 1250, EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla B.5: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 129,83 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				107,04 V	132,84 V
99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:48	Fecha y hora 01-05-2022 06:38

Tabla B.6: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 129,83 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				107,04 V	132,84 V
99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:48	Fecha y hora 01-05-2022 06:38

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,10%. Para las tensiones máximas, toda la muestra cumple con las normativas nacionales e internacionales.

En las Figuras B.1, B.2 y B.3, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

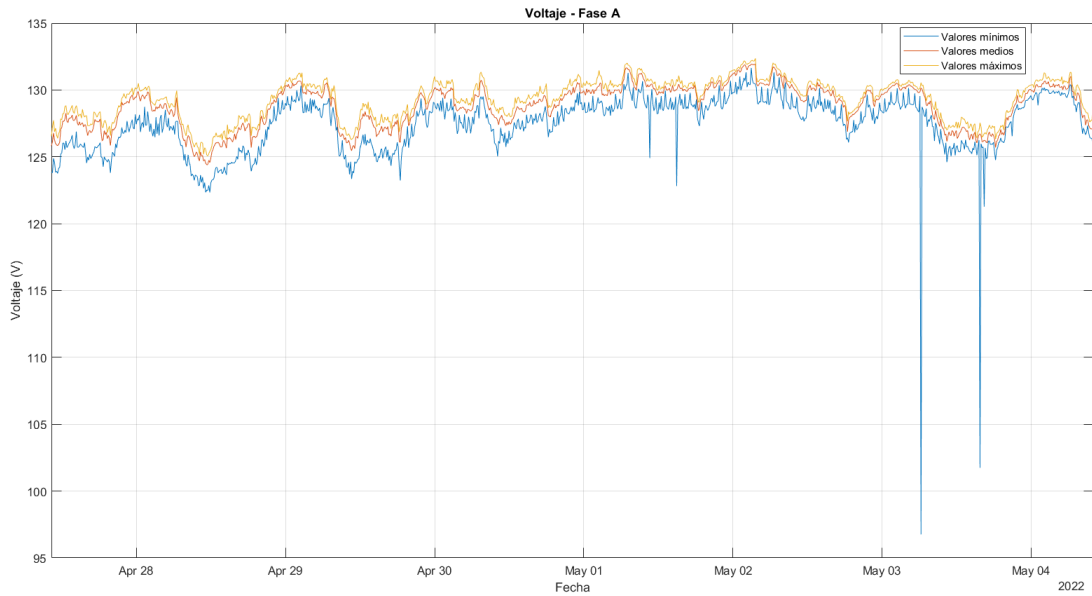


Figura B.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores

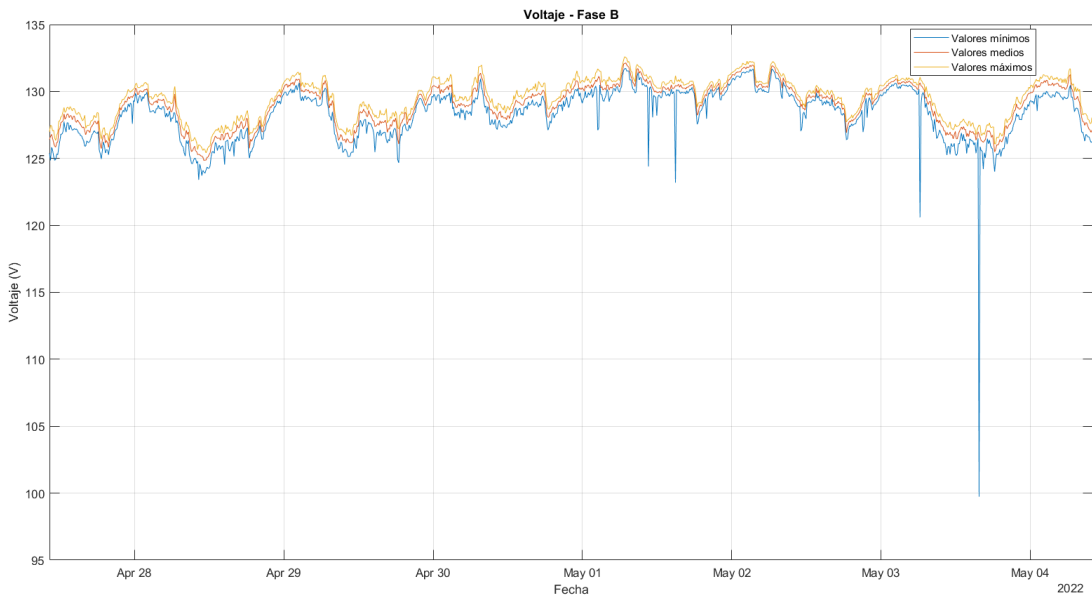


Figura B.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores



Figura B.3: Niveles de tensión - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase son similares, presentándose únicamente pequeñas diferencias entre cada una de las fases.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla B.7, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla B.8, se presenta el resumen de mediciones y se los evalúa con la normativa americana IEEE 1250.

Tabla B.7: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,42 \%$	
Muestras mayores al límite (3)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,00 %	14,46 %
99,70 %	0,30 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	28-04-2022 05:48	03-05-2022 06:18

Tabla B.8: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,42 \%$	
Muestras mayores al límite (3)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,00 %	14,46 %
99,70 % Cumple	0,30 % No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:48	Fecha y hora 03-05-2022 06:18

Se observa que las muestras que están fuera de los límites establecidos son únicamente 0,30% tanto en las normativas nacionales como internacionales.

En la Figura B.4, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

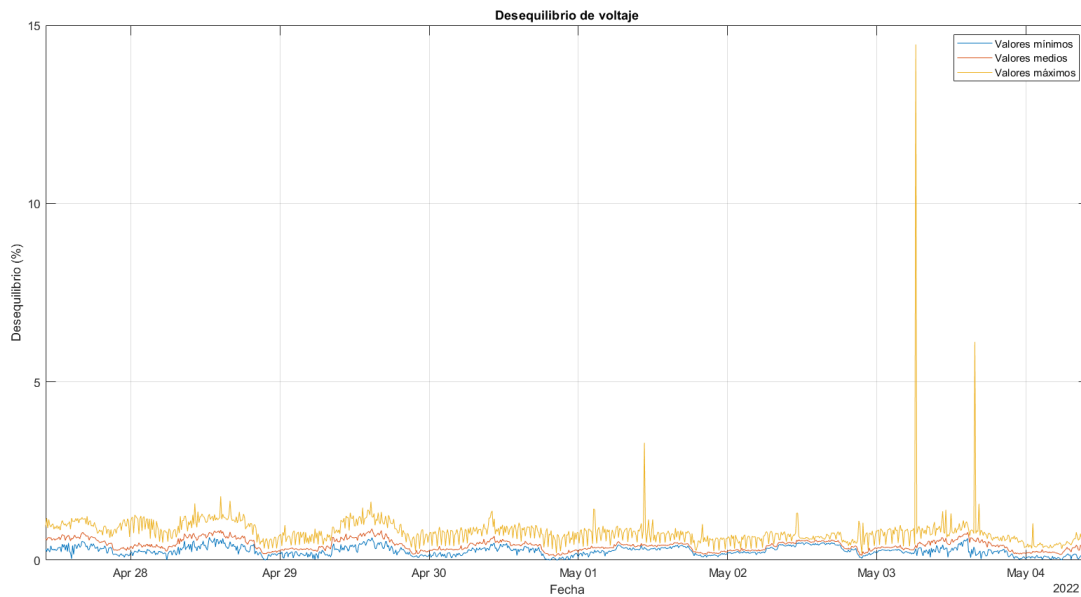


Figura B.4: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la similitud que existe entre los valores de tensión de cada fase, se observa que el desequilibrio de tensión se encuentra en su mayoría dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas B.9, B.10 y B.11, se presenta el resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas durante la medición.

Tabla B.9: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 102,49 A	
Mínimo	Máximo
13 A	351 A
Fecha y hora 01-05-2022 08:58	Fecha y hora 28-04-2022 15:58

Tabla B.10: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 84,58 A	
Mínimo	Máximo
12 A	326 A
Fecha y hora 01-05-2022 07:18	Fecha y hora 03-05-2022 16:28

Tabla B.11: Niveles de corriente - Fase C

NIVELES DE CORRIENTE - FASE C	
Ipromedio = 77,76 A	
Mínimo	Máximo
11 A	316 A
Fecha y hora 30-04-2022 13:48	Fecha y hora 27-04-2022 17:08

En las Figuras B.5, B.6 y B.7, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

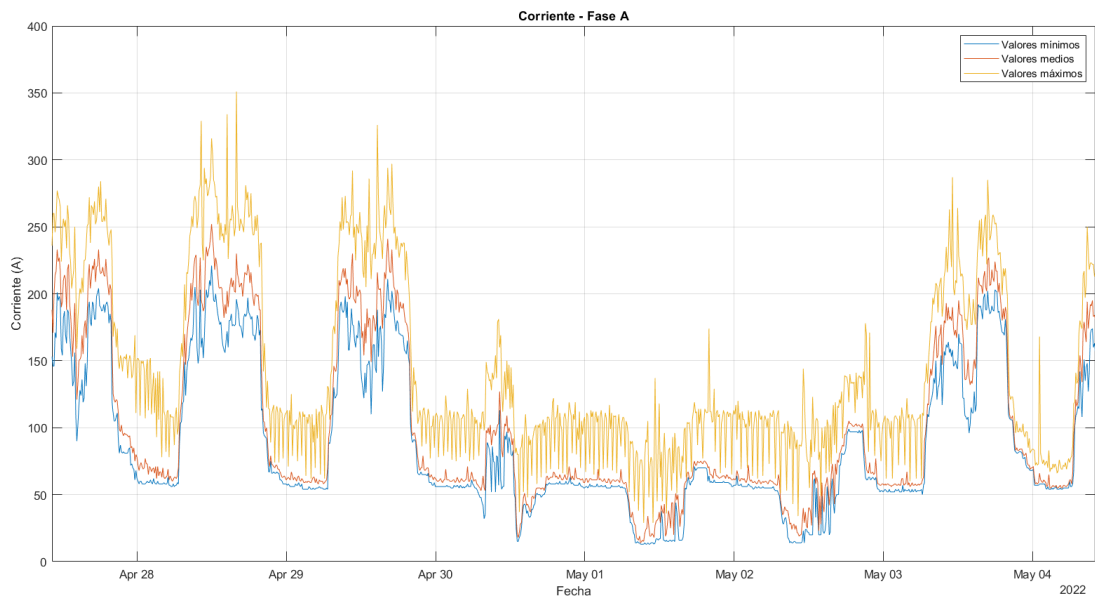


Figura B.5: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

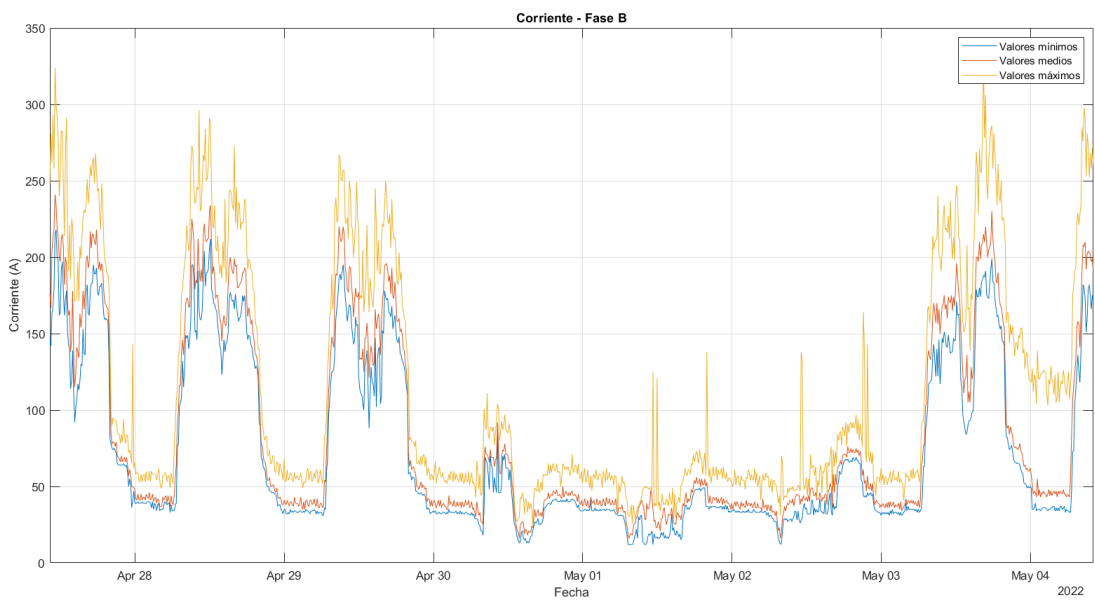


Figura B.6: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

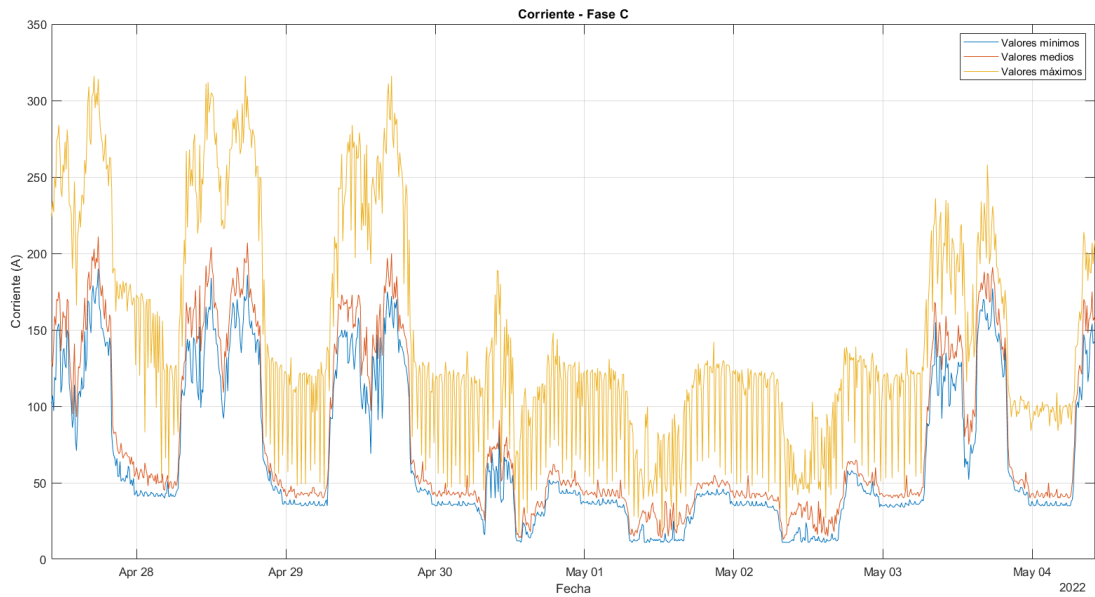


Figura B.7: Niveles de corriente - Fase C

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se observan diferencias entre las fases, además se evidencia elevaciones de corriente a partir del medio día y parte de la noche. También se presentan reducciones significativas de las corrientes desde la noche del 30 de abril hasta la noche del 2 de mayo.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla B.12, se presentan las mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla B.12: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 50,46 %	
Muestras mayores al límite (998)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,28 %	327,67 %
0,99 %	99,01 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	03-05-2022 16:58	30-04-2022 12:58

Se observa que las muestras que están fuera de los límites establecidos son el 99,01% tanto en las normativas nacionales como internacionales.

En la Figura B.8, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

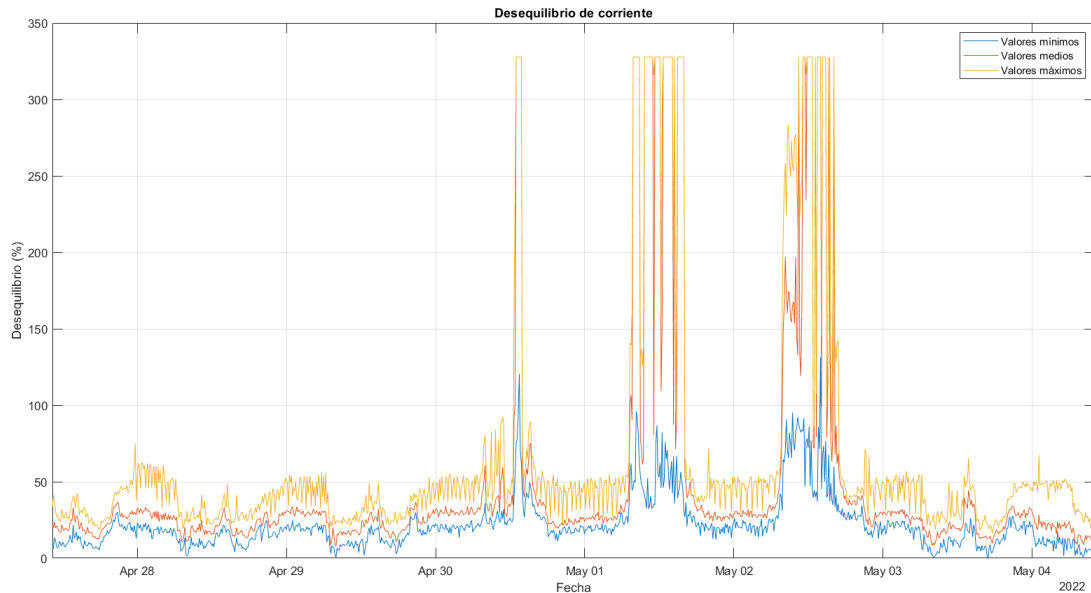


Figura B.8: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

Debido a la gran diferencia entre los valores de corriente registrados durante la medición, el desequilibrio de corriente se encuentra mayormente fuera de los límites establecidos por cada normativa.

Los desbalances presentados en la Universidad del Azuay se deben a las cargas utilizadas, es decir:

- Arranque de motores monofásicos y trifásicos produciendo incrementos de corriente
- Cortocircuitos producidos en los laboratorios de la universidad
- Desbalance de cargas en las fases
- El sistema fotovoltaico inyecta corriente al transformador debido a la falta de generación de energía

Flicker

En las Tablas B.13, B.14 y B.15, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Tabla B.13: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,33$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,60 %	0,40 %	0,05 p.u	3,49 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 21:48	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Tabla B.14: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,27$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,60 %	0,40 %	0,05 p.u	3,72 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 14:38	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Tabla B.15: Nivel de flicker - Fase C

FLICKER - FASE C			
Límite flicker		$P_{st} = 0,28$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,80 %	0,20 %	0,05 p.u	3,60 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 02-05-2022 02:58	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Se observa que en las fases A y B, las muestras fuera de los límites establecidos es de 0,40%. Para la fase C, este valor corresponde al 0,20% tanto en la normativa nacional como internacional.

En las Figuras B.9, B.10 y B.11, se presenta el comportamiento de los flicker en cada una de las fases por medio de los valores registrados durante la medición.

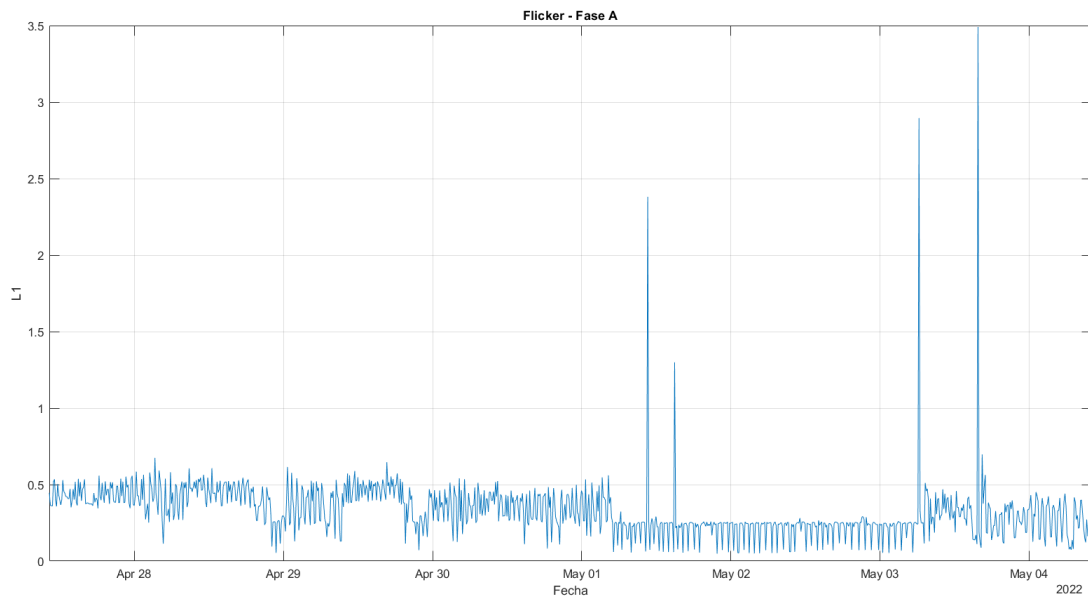


Figura B.9: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

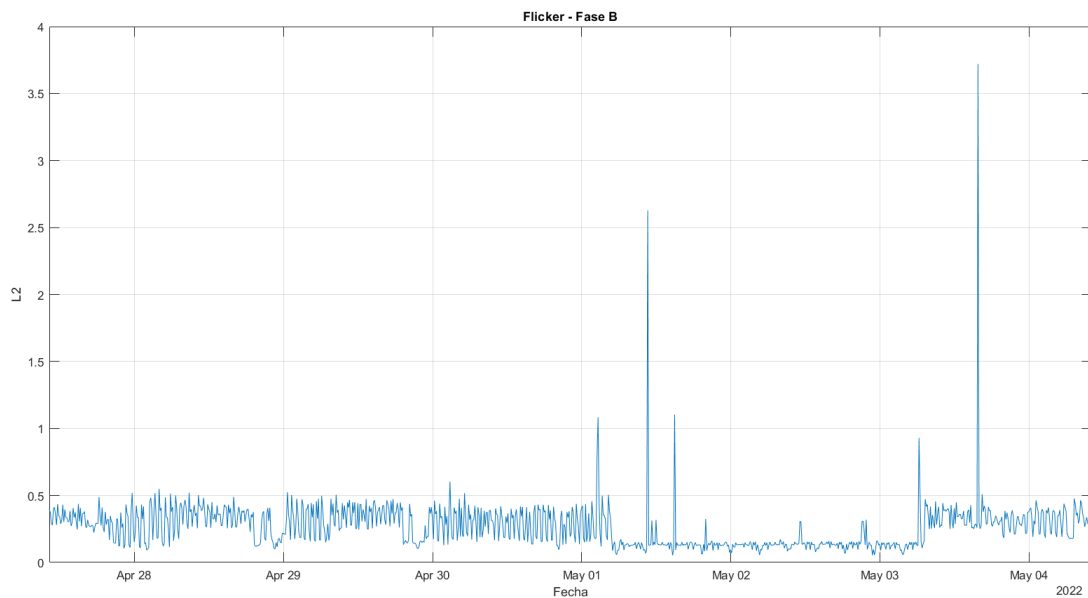


Figura B.10: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

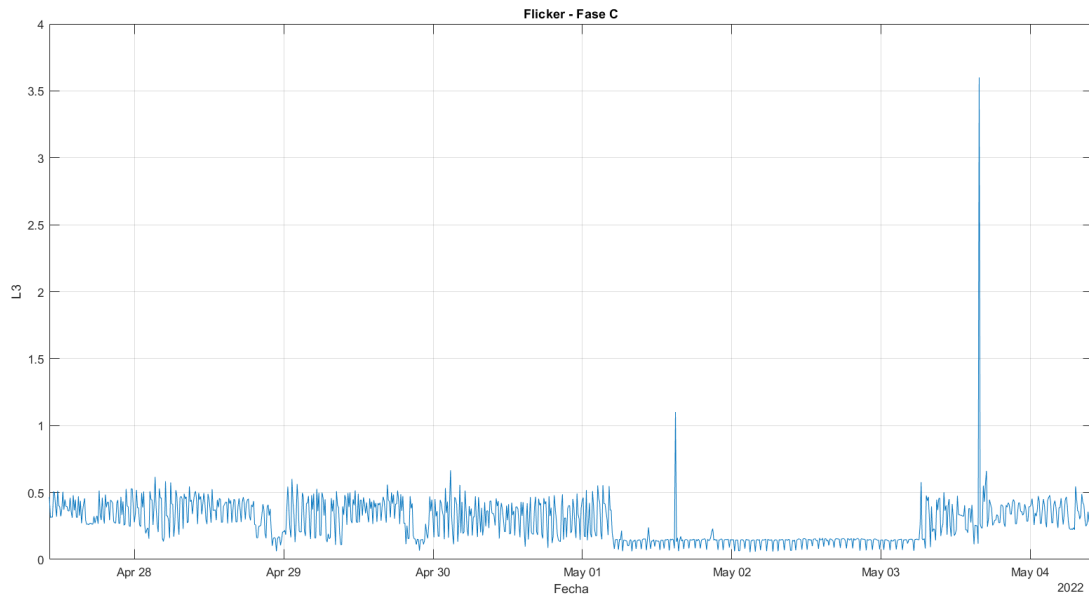


Figura B.11: Flicker - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que en la fase B se encuentra el flicker más alto registrado. En las tres fases existen grandes variaciones de este indicador.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, estas se encuentran tanto en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos son responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originando corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión Armónica Individual

En las Tablas B.16, B.17 y B.18, se presenta el resumen las componentes armónicas individuales y se las comparan con los límites establecidos en las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4.

Tabla B.16: Componentes armónicos pares de voltaje

Armónicos individuales de Voltaje Pares							
Orden	Límites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	EN 50160	IEC 61000 2-4	Máximo	Máximo	Máximo
2		2%	2%	5%	0,17%	0,18%	0,18%
4		1%	1%	1,5%	0,09%	0,08%	0,07%
6		0,5%	0,5%	0,4%	0,07%	0,05%	0,05%
8		0,5%	0,5%	0,3%	0,05%	0,04%	0,04%
10		0,5%	0,5%	0,25%	0,04%	0,03%	0,03%
12		0,46%	0,5%	0,25%	0,06%	0,03%	0,03%
14		0,43%	0,5%	0,25%	0,06%	0,03%	0,03%
16		0,41%	0,5%	0,25%	0,09	0,03%	0,03%
18		0,39%	0,5%	0,25%	0,11%	0,03%	0,04%
20		0,38%	0,5%	0,25%	0,12%	0,04%	0,04%
22		0,36%	0,5%	0,25%	0,13%	0,04%	0,04%
24		0,35%	0,5%	0,25%	0,15%	0,05%	0,04%
26		0,35%			0,15%	0,05%	0,05%
28		0,34%			0,13%	0,03%	0,05%
30		0,33%			0,1%	0,02%	0,05%
32		0,33%			0,1%	0,01%	0,03%
34		0,32%			0,09%	0,02%	0,03%
36		0,32%			0,07	0,02	0,03%
38		0,32%			0,07	0,01	0,02%
40		0,31%			0,07	0,01	0,02%
42		0,31%			0,05	0,01	0,02%
44		0,31%			0,05	0,01	0,02%
46		0,3%			0,04	0,02	0,02%
48		0,3%			0,03	0,01	0,01%
50		0,3%			0,03	0,01	0,01%

Tabla B.17: Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3

Armónicos individuales de Voltaje Impares no múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
5	6%			6%	1,37%	1,5%	1,44%
7	5%			5%	0,75%	0,63%	0,67%
11	3,5%			3,5%	0,96%	0,57%	0,84%
13	3%			3%	0,4%	0,61%	0,7%
17	2%			2%	0,41%	0,48%	0,52%
19	1,76%			1,5%	0,47%	0,28%	0,36%
23	1,41%			1,5%	0,46%	0,3%	0,24%
25	1,27%			1,5%	0,44%	0,21%	0,26%
29	1,06%				0,3%	0,14%	0,15%
31	0,97%				0,25%	0,15%	0,17%
35	0,83%				0,18%	0,09%	0,12%
37	0,77%				0,14%	0,06%	0,08%
41	0,67%				0,1%	0,04%	0,07%
43	0,63%				0,12%	0,06%	0,06%
47	0,55%				0,07%	0,04%	0,04%
49	0,52%				0,05%	0,04%	0,05%

Tabla B.18: Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3

Armónicos individuales de Voltaje Impares múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
3	5%		5%	5%	3,08%	3,17%	3,01%
9	1,5%		1,5%	1,5%	1,32%	1,05%	1,15%
15	0,4		0,4	0,5%	0,7%	0,44%	0,55%
21	0,3%		0,3%	0,5%	0,48%	0,35%	0,4%
27	0,2%		0,25%		0,33%	0,2%	0,20%
33	0,2%		0,25%		0,2%	0,07%	0,12%
39	0,2%		0,25%		0,11%	0,05%	0,07%
45	0,2%		0,25%		0,08%	0,04%	0,06%

Se observa que únicamente los armónicos 15, 21 y 27 no se encuentran dentro de los límites establecidos por las normativas internacionales.

En la Figura B.12, se presenta el comportamiento de los armónicos pares, en la Figura B.13, se presenta el comportamiento de los armónicos impares múltiplos de 3 y en la Figura B.14, se presenta el comportamiento de los armónicos impares no múltiplos de 3. Estos valores se muestran para cada fase y fueron registrados durante la medición.

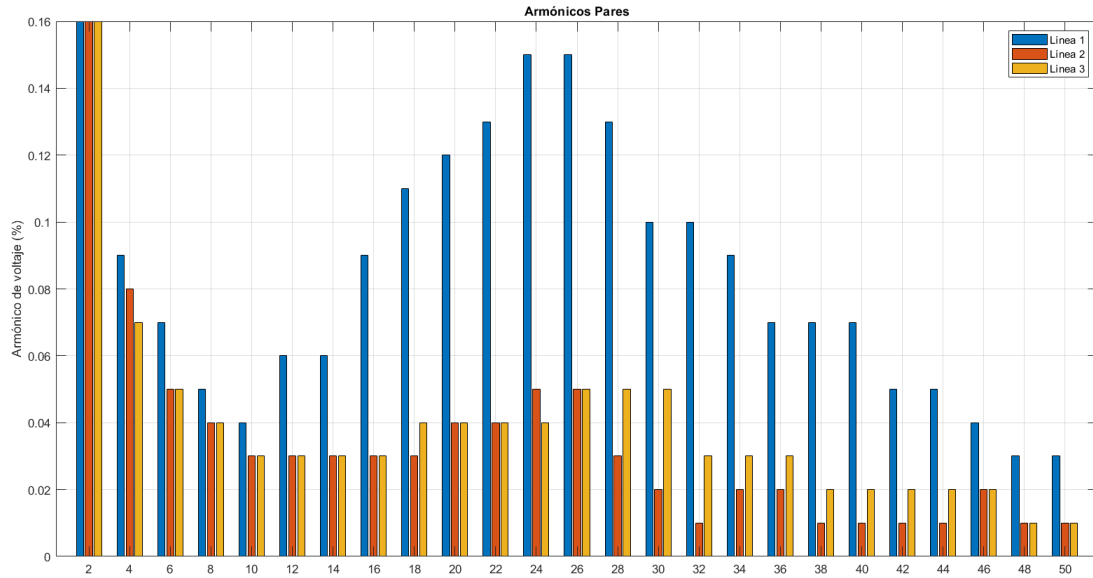


Figura B.12: Armónicos pares

Fuente: Autores

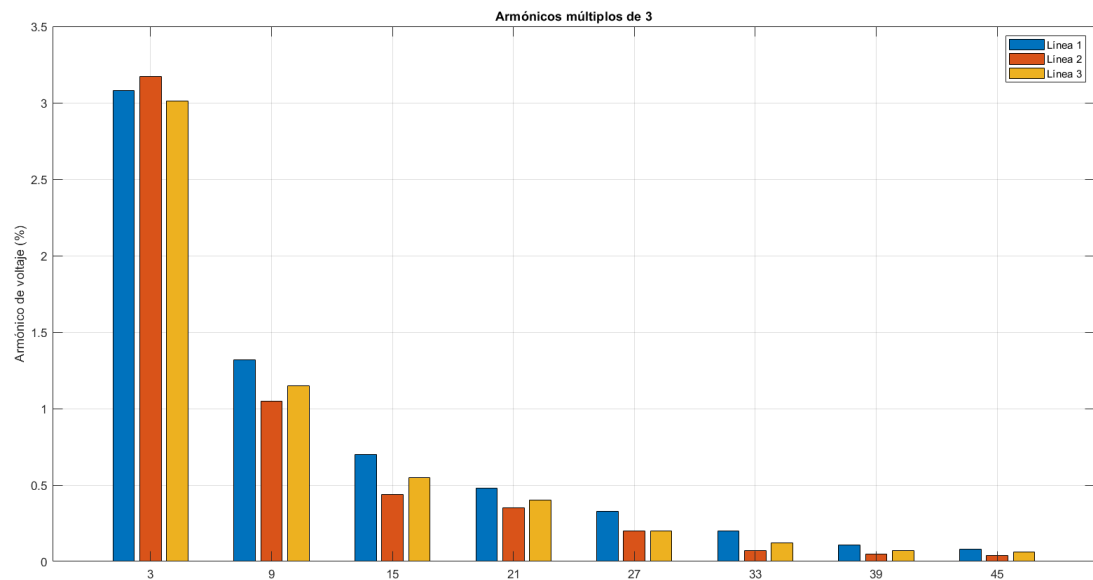


Figura B.13: Armónicos impares múltiplos de 3

Fuente: Autores

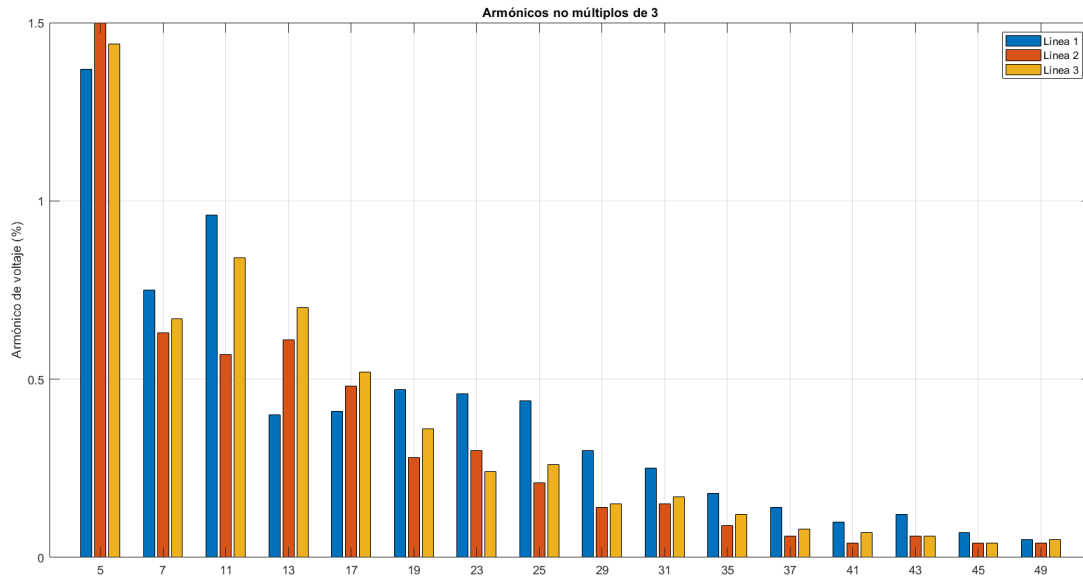


Figura B.14: Armónicos impares

Fuente: Autores

Se observa que las componentes armónicas de orden par e impar no múltiplos de 3 presentes en cada fase no exceden los límites establecidos. Sin embargo, las componentes armónicas 15, 21 y 27 exceden los valores establecidos por las normativas internacionales.

Distorsión Armónica Total

En las Tablas B.19, B.20 y B.21, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20, americana IEEE 519 y en la normativa europea EN50160.

Tabla B.19: Distorsión armónica total - Fase A

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THDv = 2,34%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,54 %	7,58 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 30-04-2022 13:08	Fecha y hora 03-05-2022 16:28

Tabla B.20: Distorsión armónica total - Fase B

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THDv = 2,06%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,16 %	4,39 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 30-04-2022 13:08	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Tabla B.21: Distorsión armónica total - Fase C

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE C			
Límite	Muestras mayores al límite	THDv = 2,34%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,15 %	4,68 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 30-04-2022 23:58	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura B.15, se presenta la distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

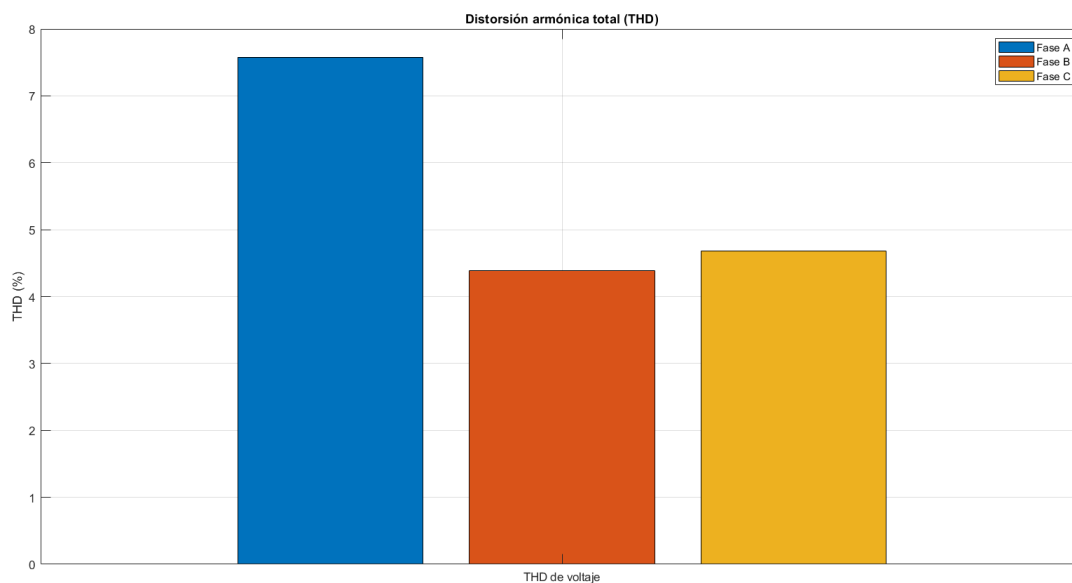


Figura B.15: Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales presentes en cada fase no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

En la Tabla B.22, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas europeas EN50160, IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-2. En la Tabla B.23, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa americana IEEE 1250.

Tabla B.22: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia (± 1 Hz)				Frecuencia = 60 Hz	
-1 Hz	59 Hz	+1 Hz	61 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,87 Hz	60,18 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 23:48	Fecha y hora 29-04-2022 23:58

Tabla B.23: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia ($\pm 0,5$ Hz)				Frecuencia = 60 Hz	
-1 Hz	59,50 Hz	+1 Hz	60,50 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,87 Hz	60,18 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 23:48	Fecha y hora 29-04-2022 23:58

Se observa que todas las muestras se encuentran dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura B.16, se presenta el comportamiento de la frecuencia por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

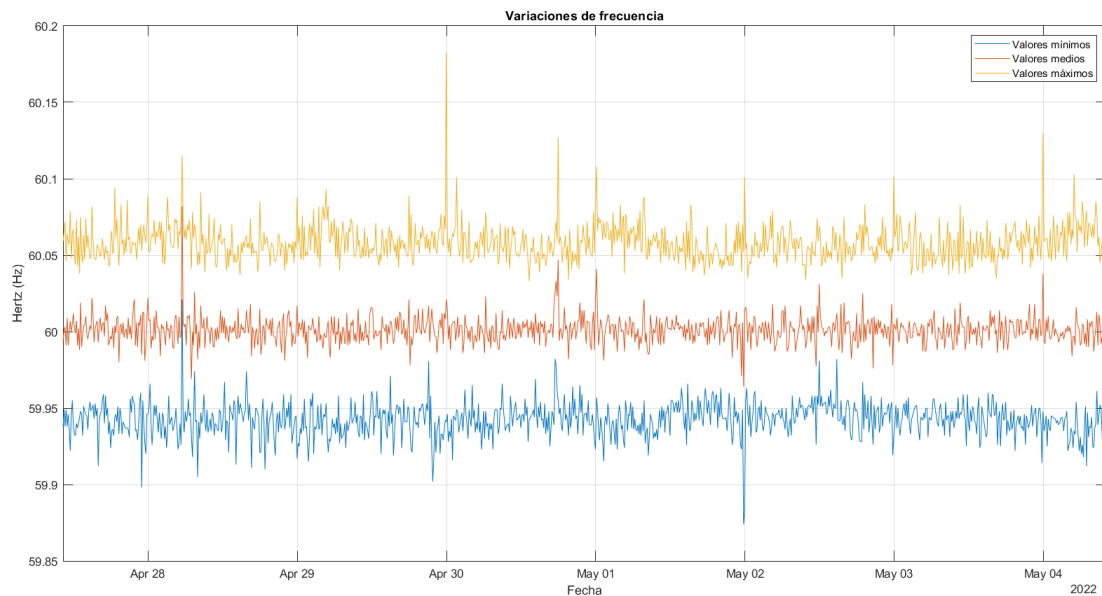


Figura B.16: Niveles de Frecuencia

Fuente: Autores

Se observa que los valores de frecuencia se encuentran dentro de los límites establecidos por las normativas internacionales en todo momento.

ANEXO C

Caso III

Características de sistema: Universidad de Cuenca

- **Ubicación de medición:** Tablero de generación de CA fotovoltaica
- **Nivel de tensión:** 127/220 V
- **Topología de medición:** Trifásico
- **Equipo de monitoreo:** AEMC 8336
- **Período de medición:** Desde 27/04/2022 hasta 4/05/2022
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos registrados fueron provistos por el Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca.

Nivel de tensión

En la Tabla C.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla C.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas IEEE 1250, EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla C.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 127,73 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				101,70 V	131,80 V
99,50 % Cumple	0,50 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:50	Fecha y hora 01-05-2022 08:40

Tabla C.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 127,73 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				101,70 V	131,80 V
99,70 % Cumple	0,30 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:50	Fecha y hora 01-05-2022 08:40

Se observa que para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana es de 0,50% y 0,30% al ser evaluadas con las regulaciones internacionales. Toda la muestra de tensiones máximas está dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla C.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla C.4, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla C.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,14 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				102,60 V	132,30 V
99,30 % Cumple	0,70 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:450	Fecha y hora 01-05-2022 03:50

Tabla C.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,14 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				102,60 V	132,30 V
99,70 % Cumple	0,30 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:450	Fecha y hora 01-05-2022 03:50

Se observa que para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana son es 0,70% y la internacional es de 0,30%. Para las tensiones máximas, toda la muestra esta dentro de lo determinado por la normativa nacional e internacional.

En la Tabla C.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla C.6, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla C.5: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 127,98 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				103,40 V	132,10 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:50	Fecha y hora 01-05-2022 08:40

Tabla C.6: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 127,98 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				103,40 V	132,10 V
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:50	Fecha y hora 01-05-2022 08:40

Se observa que para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana es 0,40% y las internacionales es 0,20%. Para las tensiones máximas, toda la muestra esta dentro de lo determinado por la normativa nacional e internacional.

En las Figuras C.1, C.2 y C.3, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

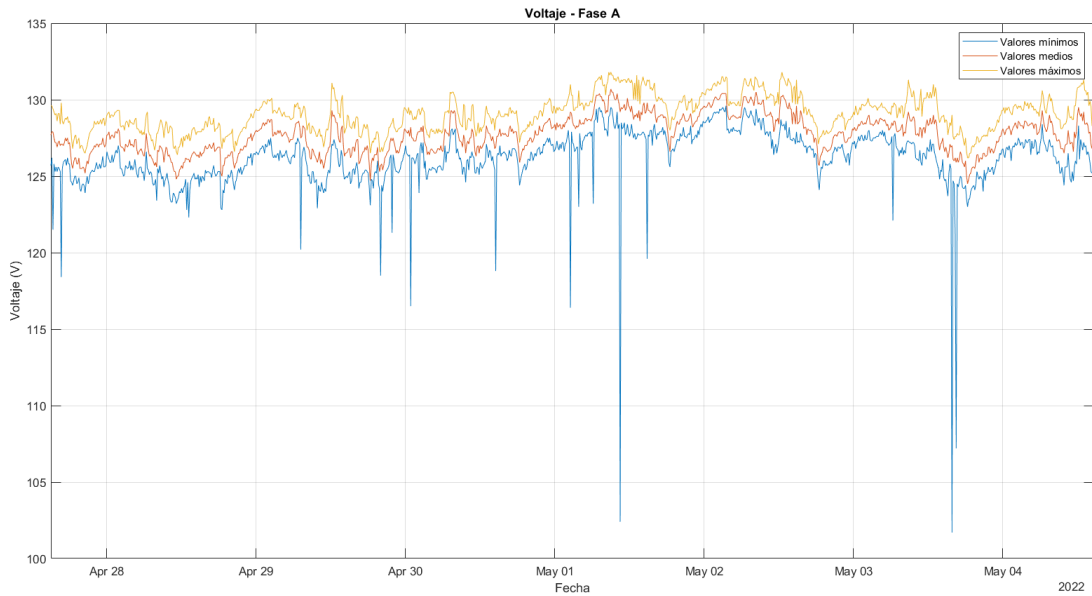


Figura C.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores



Figura C.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores

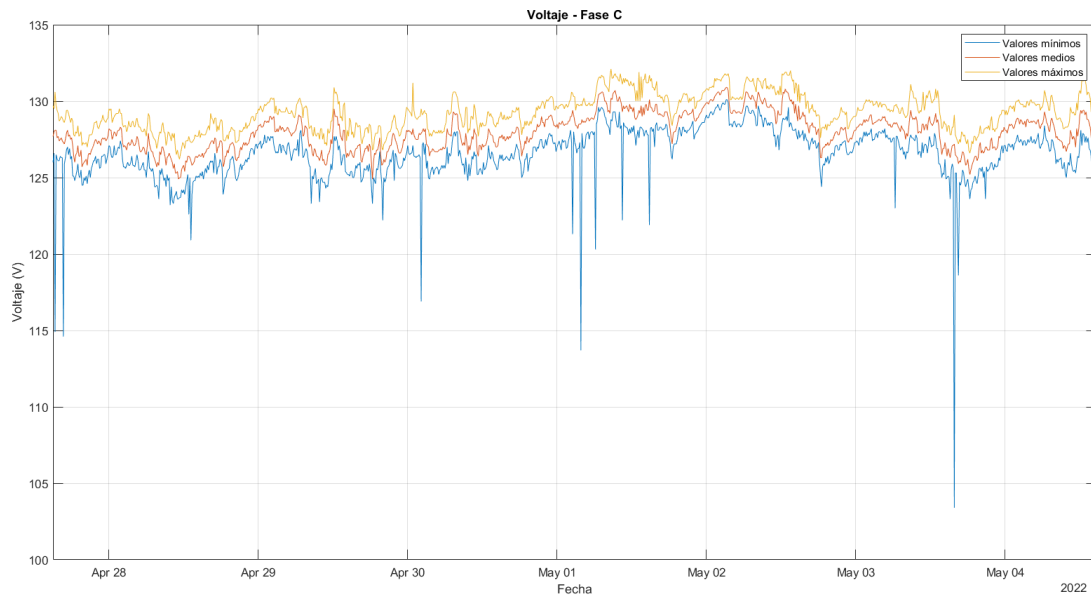


Figura C.3: Niveles de tensión - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase son similares, presentándose únicamente pequeñas diferencias en la fase B con respecto a las fases A y C.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla C.7, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla C.8, se resumen las mediciones y se las evalúa con lo determinado por el estándar IEEE 1250.

Tabla C.7: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,30 \%$	
Muestras mayores al límite (0)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,10 %	0,50 %
100,00 %	0,00 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	29-04-2022 12:30	28-04-2022 18:00

Tabla C.8: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,30 \%$	
Muestras mayores al límite (0)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,10 %	0,50 %
100,00 %	0,00 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	29-04-2022 12:30	28-04-2022 18:00

Se observa que el 100% de las muestras están dentro de los límites establecidos tanto en las normativas nacionales como internacionales.

En la Figura C.4, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores registrados durante la medición.

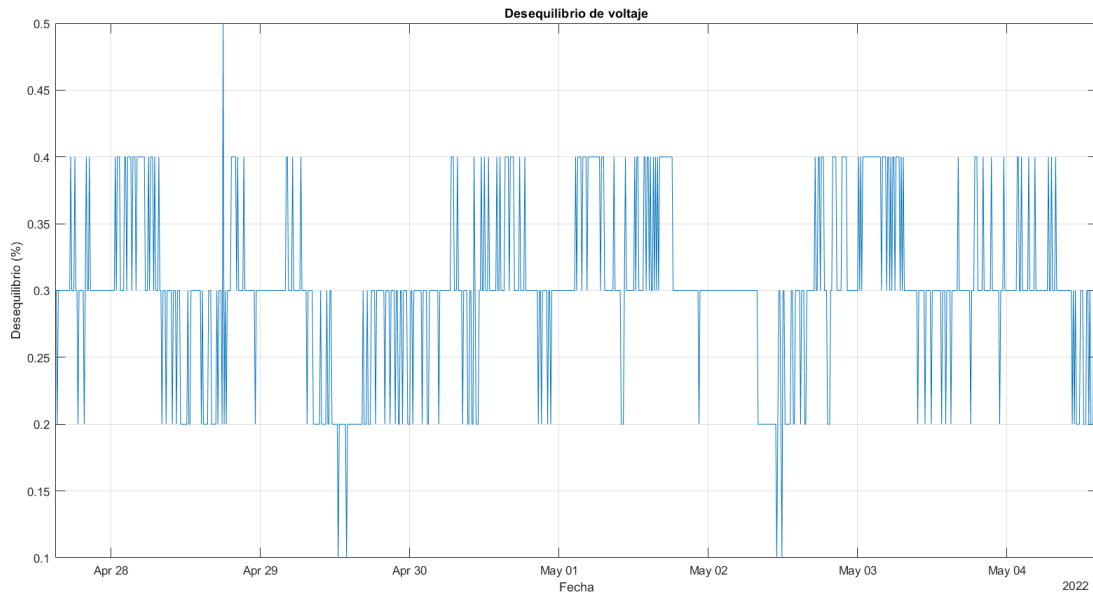


Figura C.4: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la similitud que existe entre los valores de tensión de cada fase, se observa que el desequilibrio de tensión se encuentra dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas C.9, C.10 y C.11, se presenta el resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas durante la medición.

Tabla C.9: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 6,74 A	
Mínimo	Máximo
0 A	45,39 A
Fecha y hora 27-04-2022 18:20	Fecha y hora 30-04-2022 10:40

Tabla C.10: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 6,50 A	
Mínimo	Máximo
0 A	43,16 A
Fecha y hora 27-04-2022 17:40	Fecha y hora 03-05-2022 11:40

Tabla C.11: Niveles de corriente - Fase C

NIVELES DE CORRIENTE - FASE C	
Ipromedio = 77,76 A	
Mínimo	Máximo
0 A	44,65 A
Fecha y hora 27-04-2022 20:20	Fecha y hora 27-05-2022 11:40

En las Figuras C.5, C.6 y C.7, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

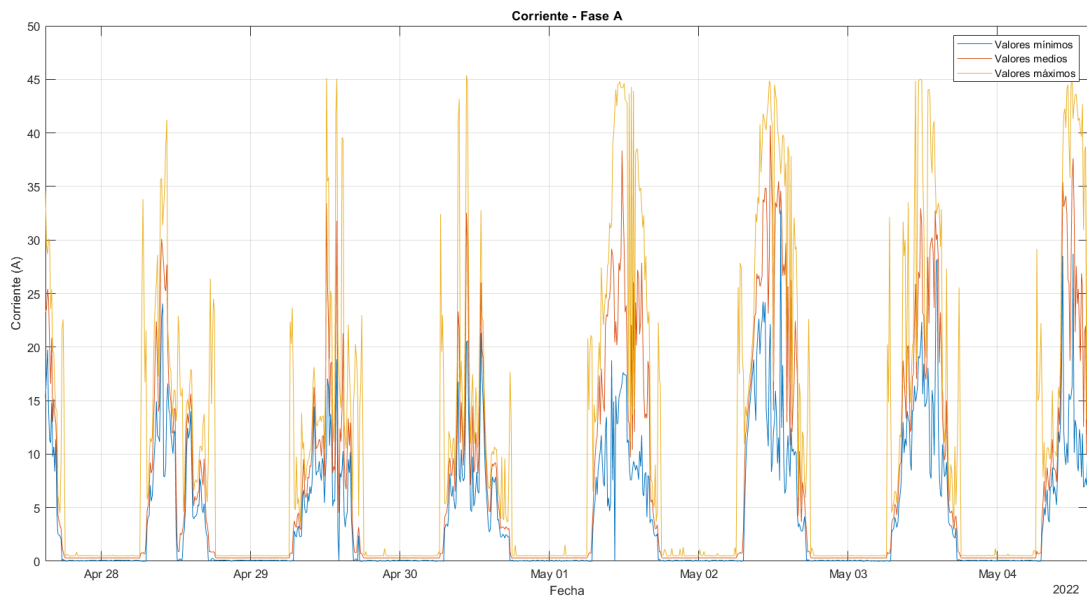


Figura C.5: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

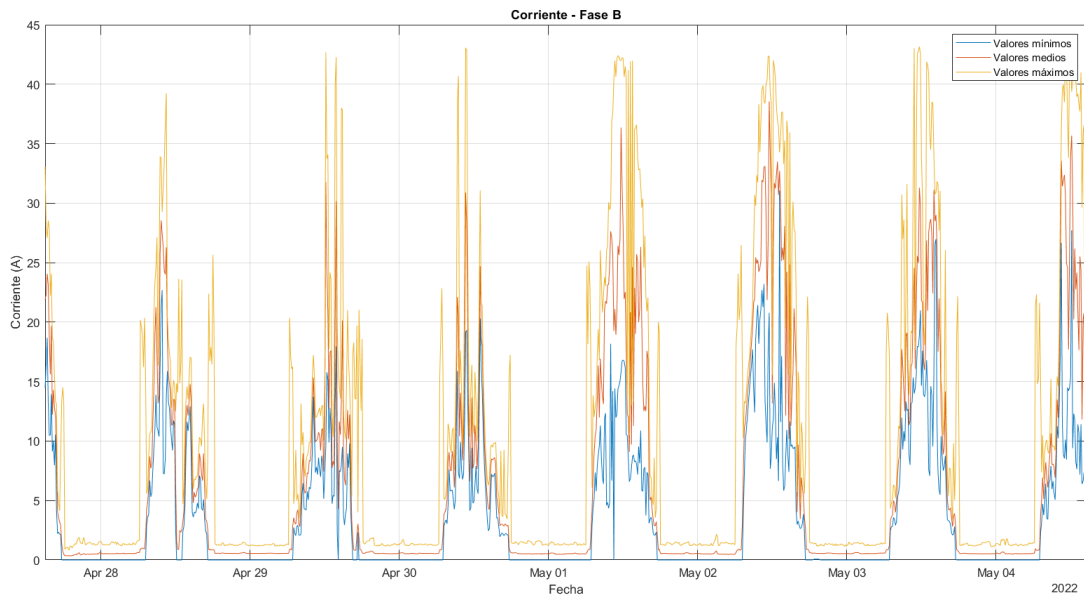


Figura C.6: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

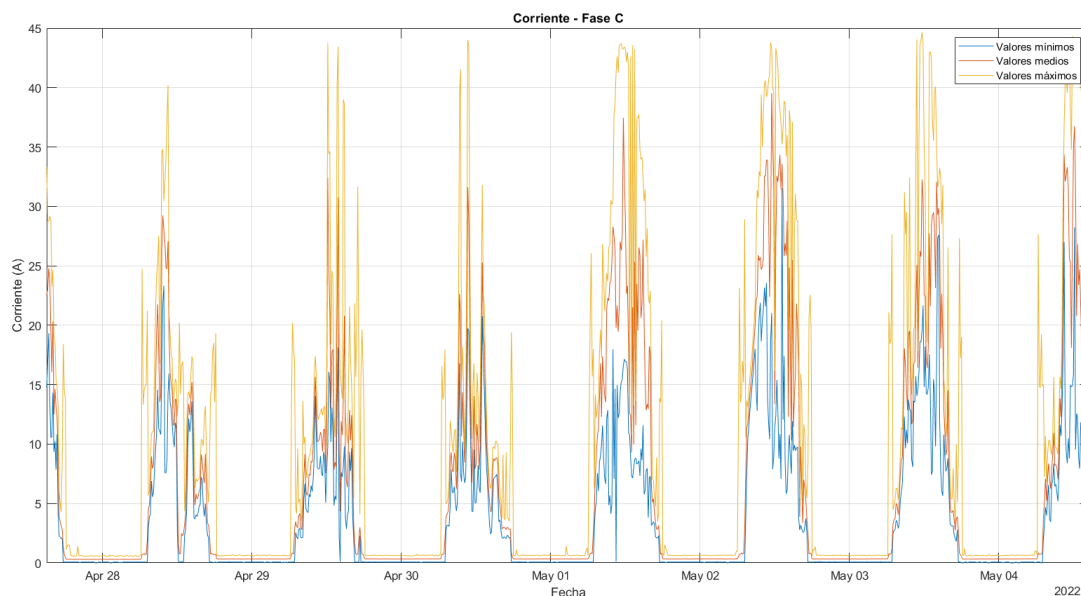


Figura C.7: Niveles de corriente - Fase C

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se observa similitudes entre las fases, además se puede presenciar elevaciones de la corriente a partir del medio día y parte de la noche.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla C.12, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla C.12: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 6,12 %	
Muestras mayores al límite (26)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		1,80 %	44,20 %
97,42 %	2,58 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	29-04-2022 09:00	27-04-2022 17:50

Se observa que el 97,42% de las muestras se encuentran dentro de los límites establecidos tanto en las normativas nacionales e internacionales.

En la Figura C.8, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores registrados durante la medición.

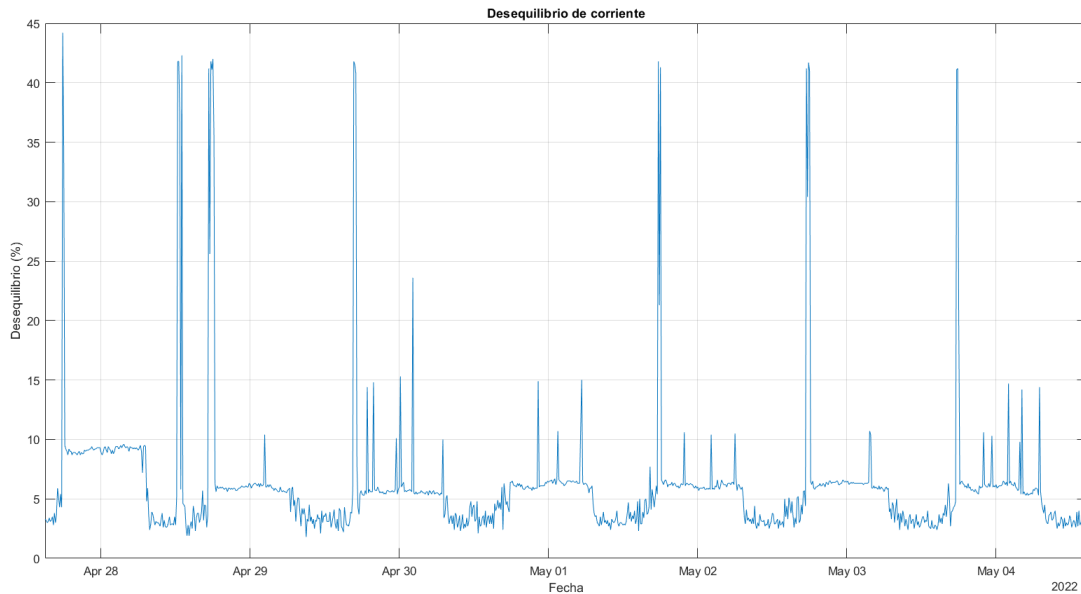


Figura C.8: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

El sistema fotovoltaico esta conectado únicamente al laboratorio de Microrred debido a esto un gran porcentaje de los desequilibrios de corriente están dentro de los límites establecidos por cada normativa.

Flicker

En las Tablas C.13, C.14 y C.15, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Tabla C.13: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,27$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,50 %	0,50 %	0,17 p.u	2,07 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 05:40	Fecha y hora 01-05-2022 02:40

Tabla C.14: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,27$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,50 %	0,50 %	0,17 p.u	2,09 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 19:50	Fecha y hora 01-05-2022 02:40

Tabla C.15: Nivel de flicker - Fase C

FLICKER - FASE C			
Límite flicker		$P_{st} = 0,27$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,80 %	0,20 %	0,17 p.u	1,90 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:30	Fecha y hora 03-05-2022 16:00

Se observa que en las fases A y B, las muestras fuera de los límites establecidos es de 0,50%. Para la fase C, son únicamente 0,20% tanto en la normativa nacional como internacional.

En las Figuras C.9, C.10 y C.11, se presenta el comportamiento de los flicker en cada una de las fases por medio de los valores registrados durante la medición.

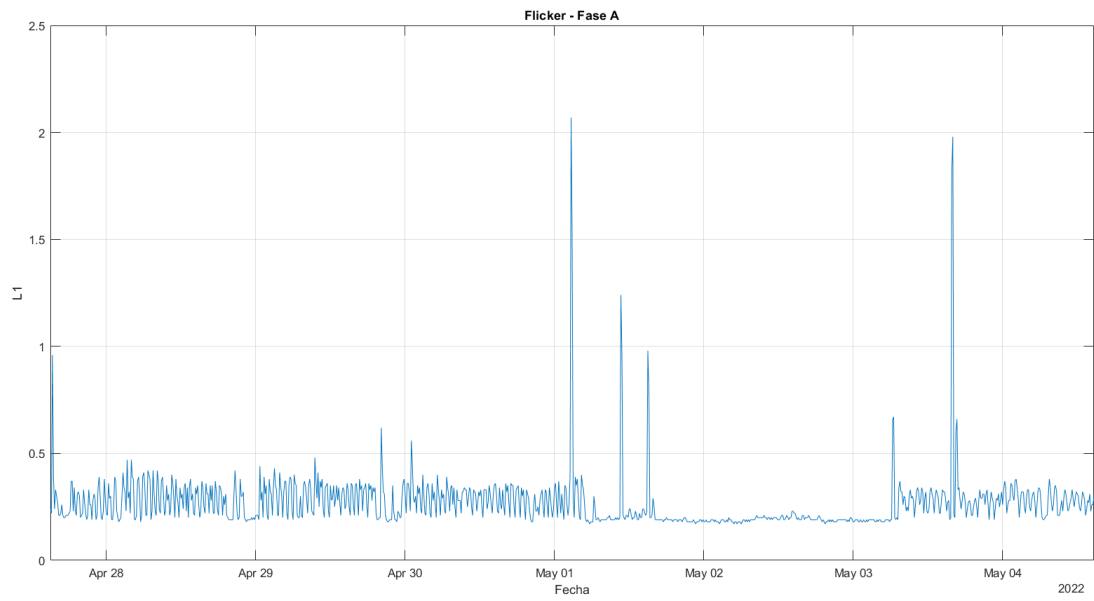


Figura C.9: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

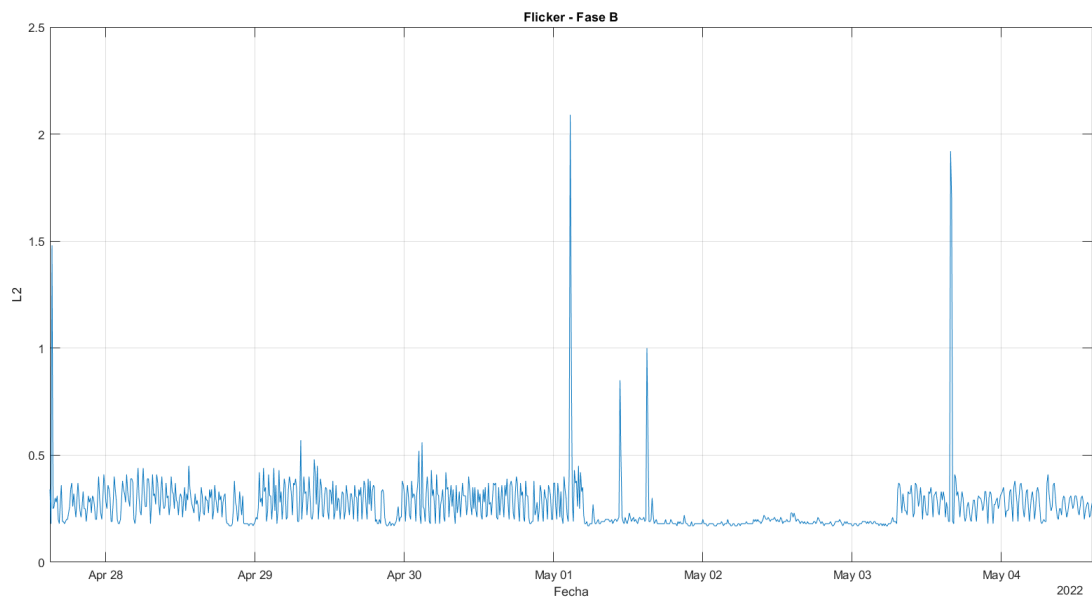


Figura C.10: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

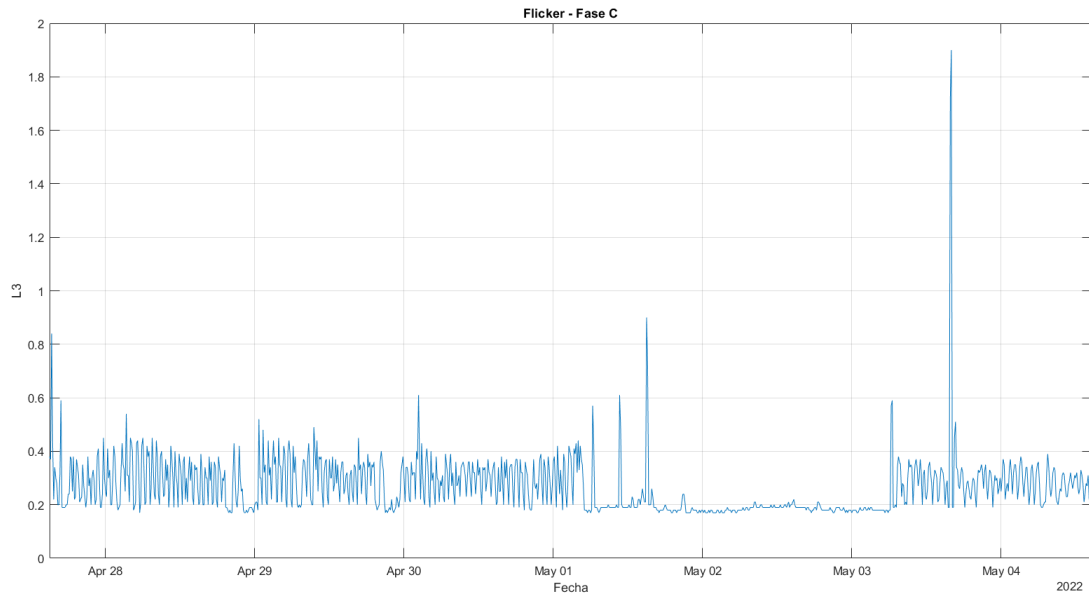


Figura C.11: Flicker - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que en la fase B se encuentra el flicker más alto registrado. Sin embargo, en las tres fases existen grandes variaciones de este indicador.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, estas se encuentran en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión armónica individual

En las Tablas C.16, C.17 y C.18, se presenta el resumen mediciones de las componentes armónicas individuales y se las comparan con los límites establecidos en la normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4.

Tabla C.16: Componentes armónicos pares de voltaje

Armónicos individuales de voltaje pares							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	EN 50160	IEC 61000 2-4	Máximo	Máximo	Máximo
2		2%	2%	5%	0%	0%	0%
4		1%	1%	1,5%	0%	0%	0%
6		0,5%	0,5%	0,4%	0,8%	0,5%	0,6%
8		0,5%	0,5%	0,3%	0%	0%	0%
10		0,5%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
12		0,46%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
14		0,43%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
16		0,41%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
18		0,39%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
20		0,38%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
22		0,36%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
24		0,35%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%

Tabla C.17: Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3

Armónicos individuales de Voltaje Impares múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
3		5%	5%	5%	0,30%	0,70%	0,80%
9		1,5%	1,5%	1,5%	0,10%	0,10%	0,10%
15		0,4	0,4	0,5%	0%	0%	0%
21		0,3%	0,3%	0,5%	0%	0%	0%
27		0,2%	0,25%		0%	0%	0%

Tabla C.18: Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3

Armónicos individuales de Voltaje Impares no múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
5	6%			6%	1,4%	1,2%	1,2%
7	5%			5%	0,7%	0,7%	0,7%
11	3,5%			3,5%	0,7%	0,7%	0,7%
13	3%			3%	0,2%	0,2%	0,2%
17	2%			2%	0%	0%	0%
19	1,76%			1,5%	0%	0%	0%
23	1,41%			1,5%	0%	0%	0%
25	1,27%			1,5%	0%	0%	0%

Se observa que todas las componentes armónicas individuales impares se encuentran dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura C.12, se presenta el comportamiento de los armónicos pares, en la Figura C.13, se presenta el comportamiento de los armónicos impares múltiplos de 3 y en la Figura C.14, se presenta el comportamiento de los armónicos impares no múltiplos de 3. Estos valores se muestran para cada fase y fueron registrados durante la medición.

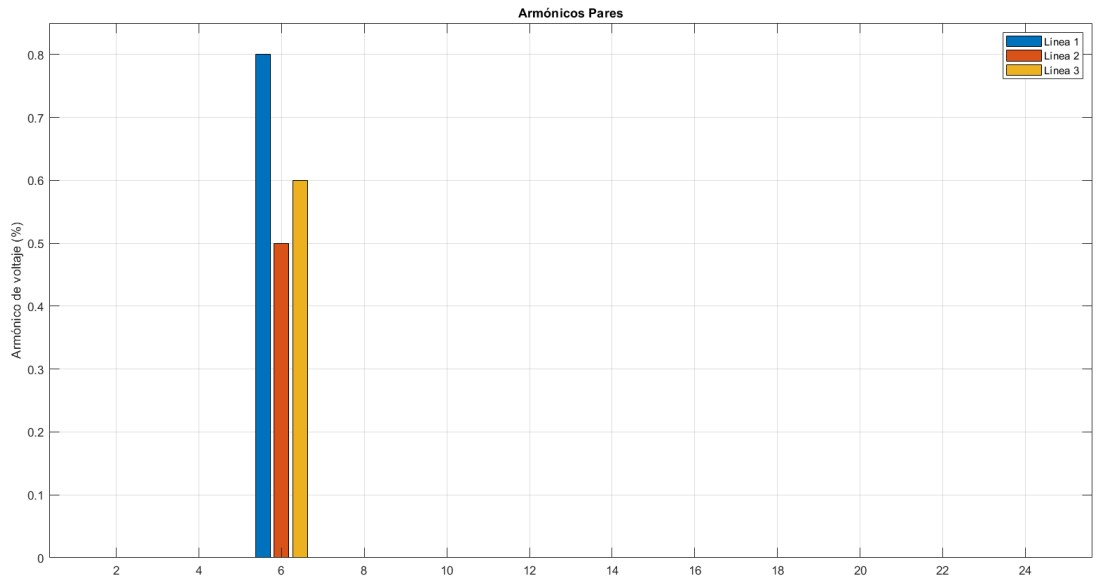


Figura C.12: Armónicos pares

Fuente: Autores

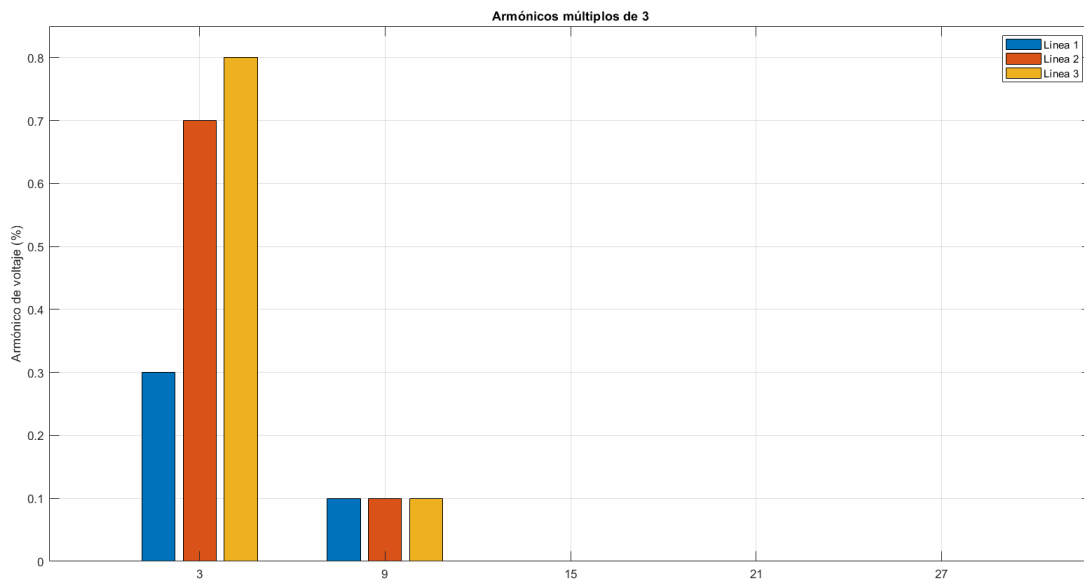


Figura C.13: Armónicos impares múltiplos de 3

Fuente: Autores

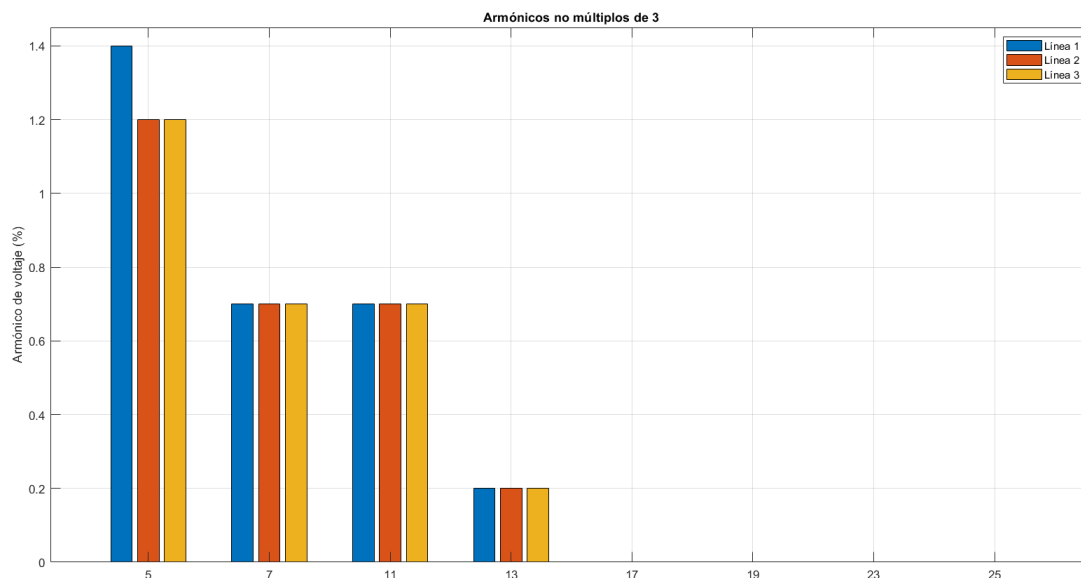


Figura C.14: Armónicos impares

Fuente: Autores

Se observa que la componente armónica 6 se encuentra fuera de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

Distorsión Armónica Total

En las Tablas C.19, C.20 y C.21, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20, americana IEEE 519 y europea EN50160.

Tabla C.19: Distorsión armónica total - Fase A

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 0,94 %	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,4 %	1,70 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:20	Fecha y hora 02-05-2022 08:40

Tabla C.20: Distorsión armónica total - Fase B

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 0,81%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,30 %	1,40 %
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:20	Fecha y hora 02-05-2022 10:10

Tabla C.21: Distorsión armónica total - Fase C

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE C			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 0,96 %	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,60 %	1,60 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:20	Fecha y hora 02-05-2022 10:20

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura C.15, se presenta la distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

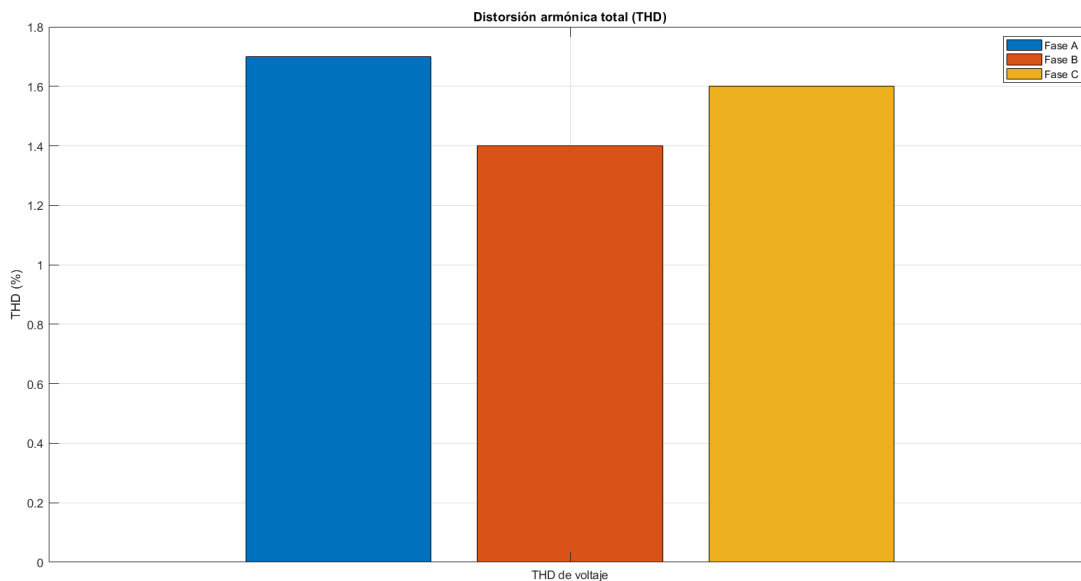


Figura C.15: Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales presentes en cada fase no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

En la Tabla C.22, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas europeas EN50160, IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-2. En la Tabla C.23, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa americana IEEE 1250.

Tabla C.22: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia (± 1 Hz)				Frecuencia = 59,99 Hz	
-1 Hz	59 Hz	+1 Hz	61 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,95 Hz	60,06 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 23:50	Fecha y hora 28-04-2022 05:20

Tabla C.23: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia ($\pm 0,5$ Hz)				Frecuencia = 59,99 Hz	
-1 Hz	59,50 Hz	+1 Hz	60,50 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,95 Hz	60,06 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 23:50	Fecha y hora 28-04-2022 05:20

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura C.16, se presenta el comportamiento de la frecuencia por medio de los valores registrados durante la medición.

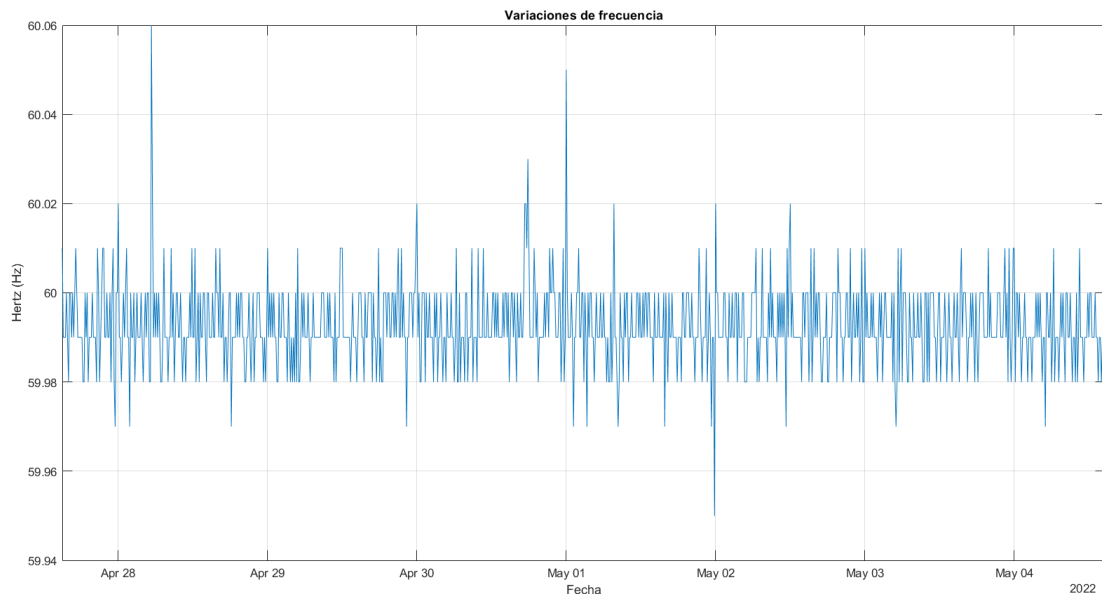


Figura C.16: Niveles de Frecuencia

Fuente: Autores

Se observa que los valores de frecuencia están dentro de los límites establecidos por las normativas internacionales en todo momento.

ANEXO D

Caso IV

Características de sistema: Residencial 1

- **Ubicación de medición:** Tablero de distribución
- **Nivel de tensión:** 120/240 V
- **Topología de medición:** Bifásico
- **Equipo de monitoreo:** PQBox 100
- **Período de medición:** Desde 04/01/2022 hasta 11/01/2022
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos registrados fueron provistos por el Departamento de Calidad de Energía de la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

Nivel de tensión

En la Tabla D.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla D.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla D.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 119,50 V	
- 8%	110,40	+ 8%	129,60	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				90,02 V	133,17 V
94,35 % Cumple	5,65 % No cumple	99,50 % Cumple	0,50 % No cumple	Fecha y hora 10-01-2022 16:30	Fecha y hora 7-01-2022 20:00

Tabla D.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128.69 V	
- 10%	108	+ 10%	132	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				90,02 V	133,17 V
95,04 % Cumple	4,96 % No cumple	99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	Fecha y hora 10-01-2022 16:30	Fecha y hora 7-01-2022 20:00

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana son de 5,65% y 4,96% al ser evaluada con regulaciones internacionales. Las tensiones máximas poseen un incumplimiento de 0,50% y 0,10% basado en la normativa nacional y extranjera respectivamente.

En la Tabla D.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla D.4, se expone la evaluación de la muestra con las normas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla D.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 121,19 V	
- 8%	110,40	+ 8%	129,60	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				88,82 V	133,86 V
96,53 % Cumple	3,47 % No cumple	99,31 % Cumple	0,69 % No cumple	Fecha y hora 7-01-2022 20:00	Fecha y hora 10-01-2022 16:30

Tabla D.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				V _{promedio} = 121,19 V	
- 10%	108	+ 10%	132	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				88,82 V	133,86 V
97,42 % Cumple	2,58 % No cumple	99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	Fecha y hora 7-01-2022 20:00	Fecha y hora 10-01-2022 16:30

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana son de 3,47% y 2,58% al ser evaluada con regulaciones internacionales. Las tensiones máximas poseen un incumplimiento de 0,69% y 0,10% basado en la normativa nacional y extranjera respectivamente.

En las Figuras D.1 y D.2, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.



Figura D.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores

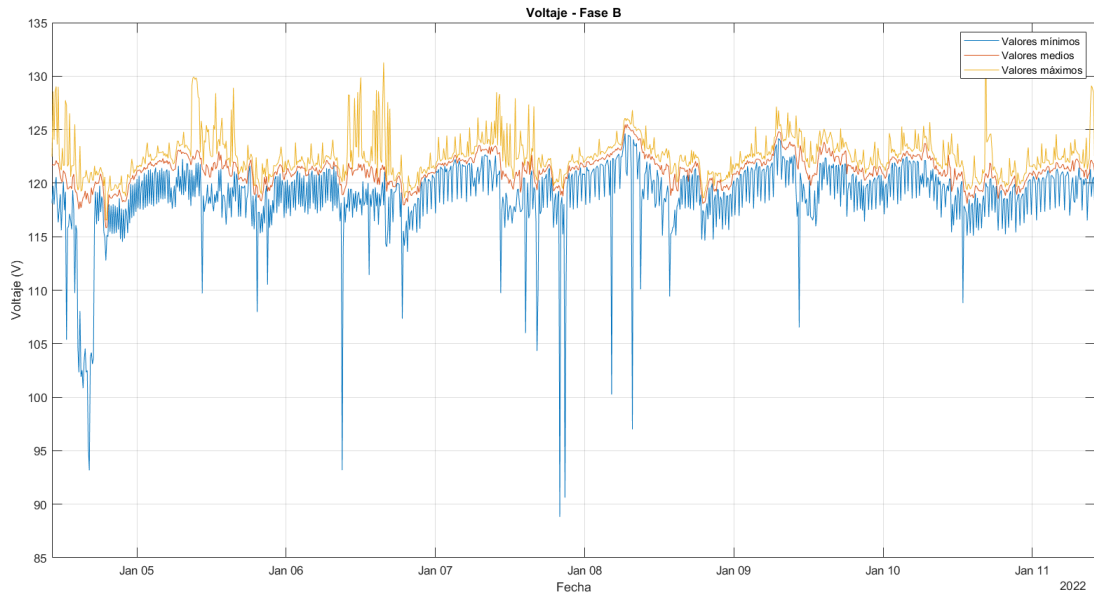


Figura D.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase no son similares, presentándose diferencias entre ellas.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla D.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla D.6, se expone la evaluación de la muestra con la normativa americana IEEE 1250.

Tabla D.5: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,91 \%$	
Muestras mayores al límite (172)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,0013 %	14,29 %
82,94 %	17,06 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	4-01-2022 13:00	10-01-2022 16:30

Tabla D.6: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,91 \%$	
Muestras mayores al límite (96)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,0013 %	14,29 %
90,48 % Cumple	9,52 % No cumple	Fecha y hora 4-01-2022 13:00	Fecha y hora 10-01-2022 16:30

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos es de 17,06% tanto en la normativa nacional como europea y 9,52% al ser evaluada con la regulación americana.

En la Figura D.3, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

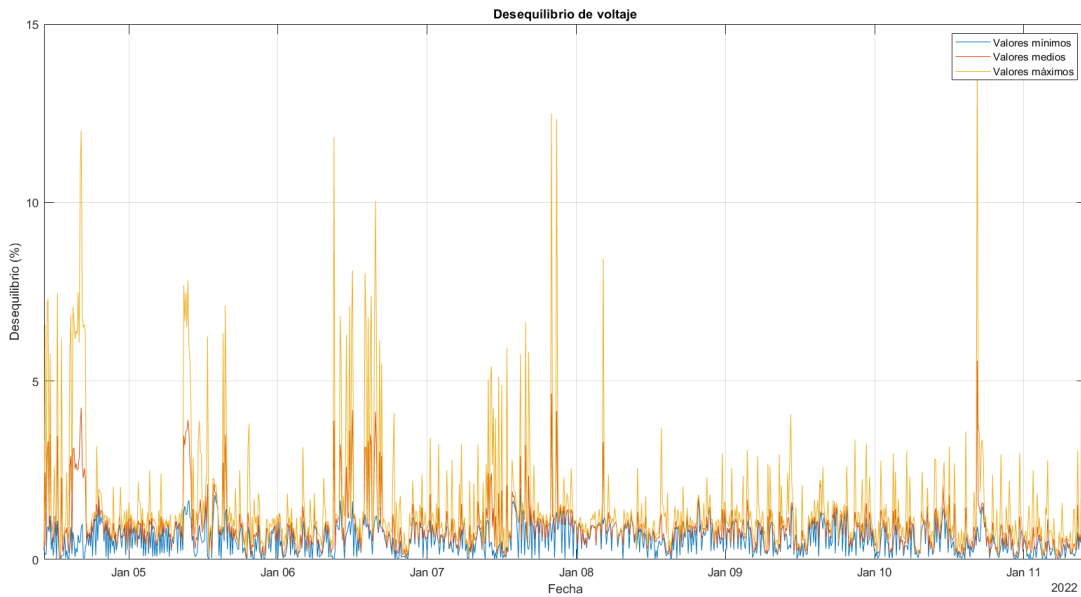


Figura D.3: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la diferencia que existe entre los valores de tensión de cada fase, se observa que el desequilibrio de tensión se encuentra mayormente dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas D.7 y D.8, se presenta un resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas durante la medición.

Tabla D.7: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 4,99 A	
Mínimo	Máximo
0,01 A	83,83 A
Fecha y hora 06-01-2022 01:10	Fecha y hora 10-01-2022 16:30

Tabla D.8: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 4,16 A	
Mínimo	Máximo
0,01 A	80,82 A
Fecha y hora 06-01-2022 08:00	Fecha y hora 07-01-2022 08:00

En las Figuras D.4 y D.5, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

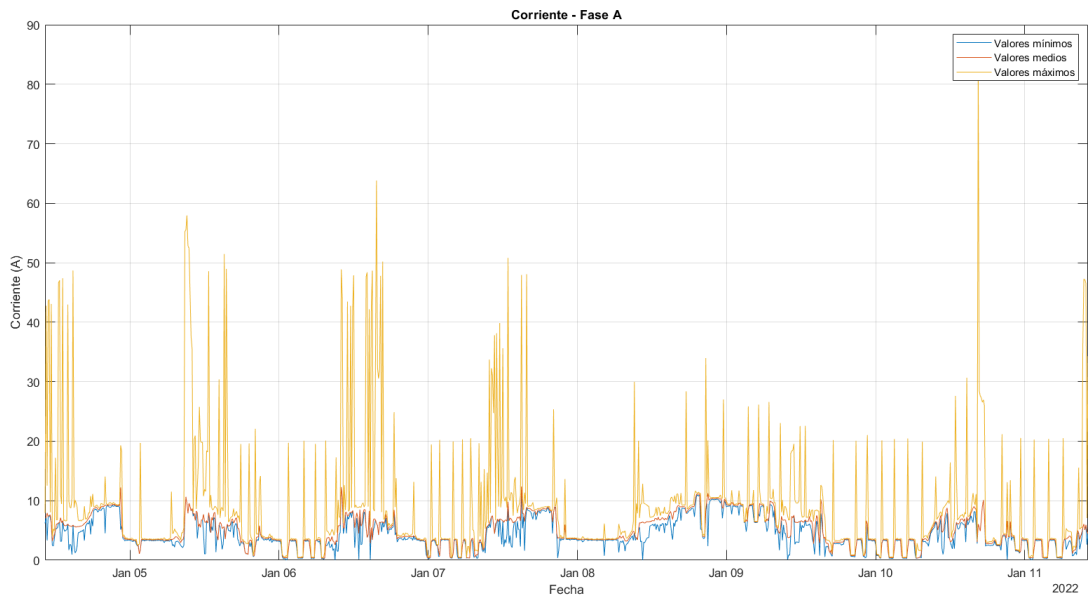


Figura D.4: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

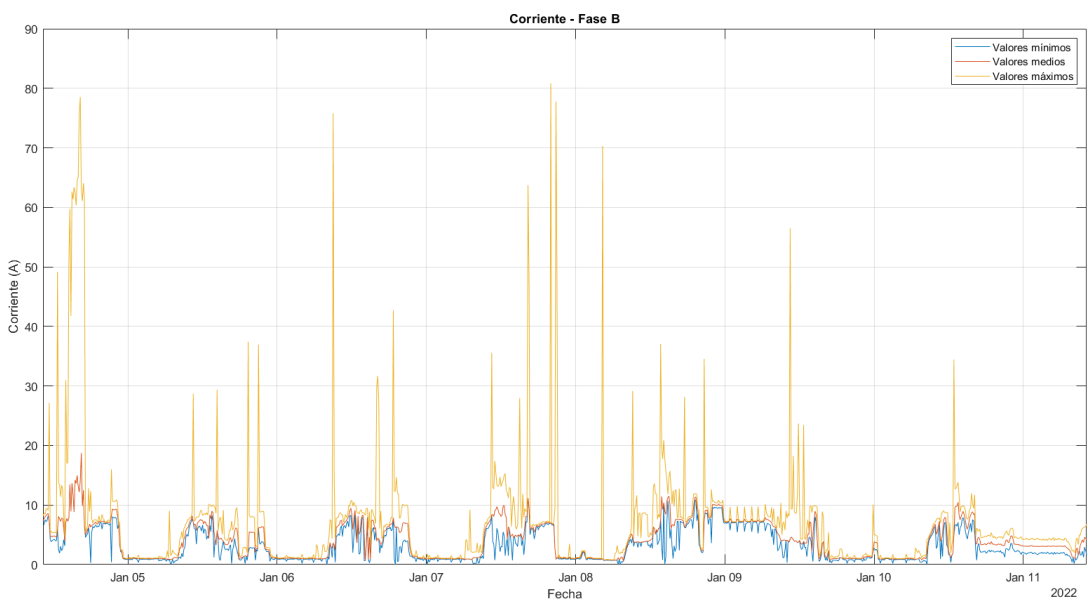


Figura D.5: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se puede observar varias diferencias entre las fases, además se puede presenciar elevaciones de la corriente a partir del medio día y parte de la noche. Por otra parte, los días 09, 10 y madrugadas los valores de corriente disminuyen significativamente.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla D.9, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla D.9: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 28,83 %	
Muestras mayores al límite (714)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,01 %	99,18 %
29,17 %	70,83 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	08-01-2022 08:30	06-01-2022 08:00

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos son del 70,83% tanto en la normativa nacional como internacional.

En la Figura D.6, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

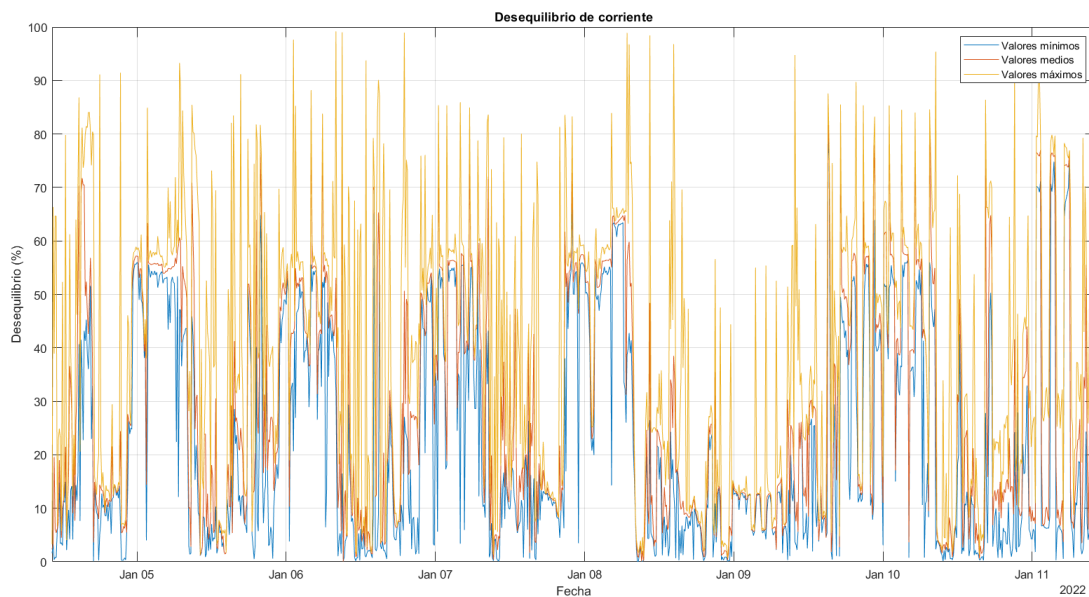


Figura D.6: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

Debido a la gran diferencia entre los valores de corriente registrados durante la medición, el desequilibrio de corriente se encuentra mayormente fuera de los límites establecidos por cada normativa.

Los desbalances presentados en el domicilio, pueden ser ocasionados debido a las cargas utilizadas, es decir

- Desbalance de fases debido a cargas conectadas a una sola fase
- Deficiente instalación en la vivienda
- El sistema fotovoltaico inyecta corriente al transformador debido a la falta de generación de energía

Flicker

En las Tablas D.10 y D.11, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Se observa que en la fase A, las muestras fuera de los límites establecidos son 9,52%. Para la fase B, corresponden al 11,51% tanto en la normativa nacional como internacional.

Tabla D.10: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,62$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
90,48 %	9,52 %	0,07 p.u	9,58 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 06-01-2022 05:40	Fecha y hora 07-01-2022 12:50

Tabla D.11: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,62$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
88,49 %	11,51 %	0,05 p.u	11,80 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 08-01-2022 00:20	Fecha y hora 04-01-2022 16:30

Se observa que en la fase A, las muestras fuera de los límites establecidos son 9,52%. Para la fase B, corresponden al 11,51% tanto en la normativa nacional como en las normativas internacionales.

En las Figuras D.7 y D.8, se presenta el comportamiento de los flicker en cada una de las fases por medio de los valores registrados durante la medición.

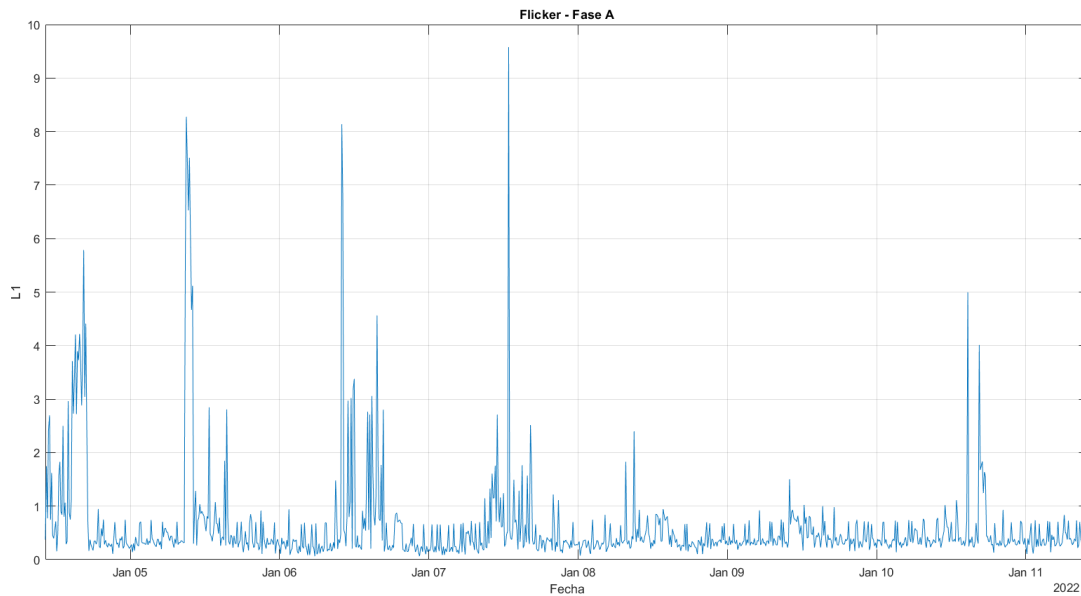


Figura D.7: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

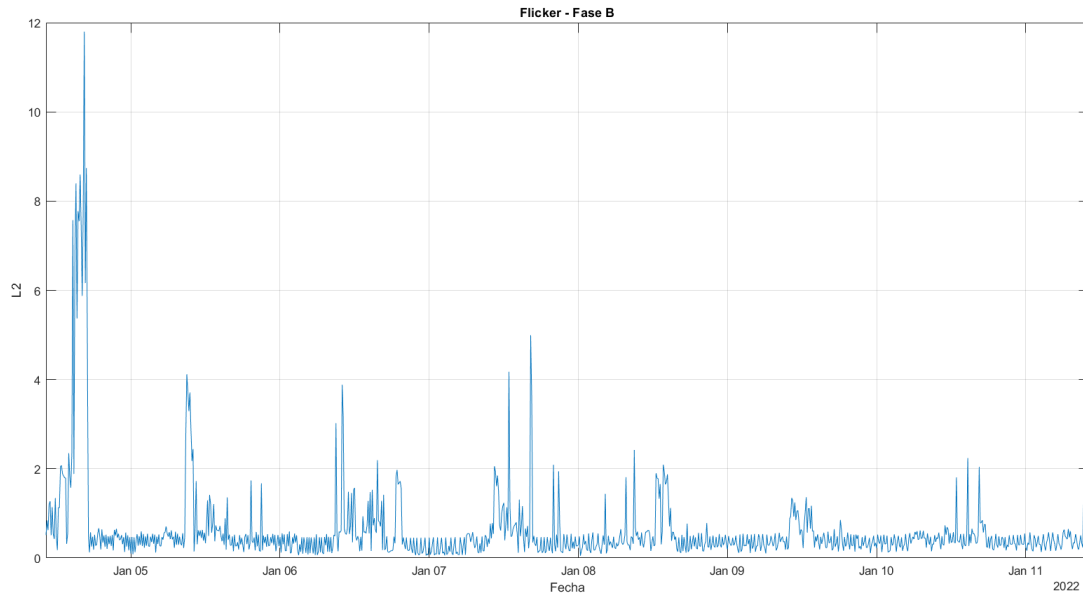


Figura D.8: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

Se observa que en la fase B se encuentra el flicker más alto registrado. En las dos fases existen grandes variaciones de este indicador.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, este tipo de cargas pueden encontrarse en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión Armónica Individual

Este parámetro no será evaluado debido a la no medición de datos de las componentes armónicas individuales en los datos compartidos por la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

Distorsión Armónica Total

En las Tablas D.12 y D.13, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 519 y europea EN50160.

Tabla D.12: Distorsión Armónica Total - Fase A

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,56%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,24 %	4,18 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 08-01-2022 11:20	Fecha y hora 08-01-2022 20:00

Tabla D.13: Distorsión Armónica Total - Fase B

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,34%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,13%	4,17%
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 09-01-2022 06:40	Fecha y hora 04-01-2022 16:30

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura D.9, se presenta los valores de distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

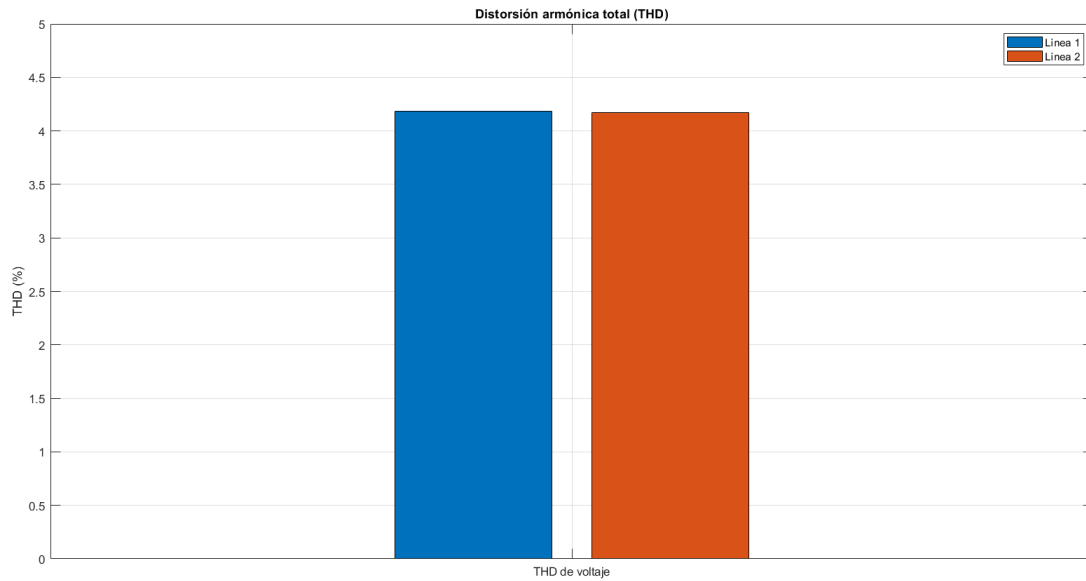


Figura D.9: Distorsión Armónica Total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

Este parámetro no será evaluado debido a la no medición de datos de la frecuencia en los datos compartidos por la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

ANEXO E

Caso V

Características de sistema: Residencial 2

- **Ubicación de medición:** Tablero de distribución
- **Nivel de tensión:** 120/240 V
- **Topología de medición:** Bifásico
- **Equipo de monitoreo:** PQBox 100
- **Período de medición:** Desde 14/05/2021 hasta 21/05/2021
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos registrados fueron provistos por el Departamento de Calidad de Energía de la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

Nivel de tensión

En la Tabla E.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla E.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla E.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 118,47 V	
- 8%	110,40	+ 8%	129,60	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				64,03 V	121,56 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 08:50	Fecha y hora 20-05-2021 06:40

Tabla E.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 118,47 V	
- 10%	108	+ 10%	132	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				64,03 V	121,56 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 08:50	Fecha y hora 20-05-2021 06:40

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,40%. Para las tensiones máximas, todas las muestras están dentro las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla E.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla E.4, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla E.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 118,41 V	
- 8%	110,40	+ 8%	129,60	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				64,01 V	121,60 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 08:50	Fecha y hora 20-05-2021 06:50

Tabla E.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 118,41 V	
- 10%	108	+ 10%	132	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				64,01 V	121,60 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 08:50	Fecha y hora 20-05-2021 06:40

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,40%. Para las tensiones máximas, todas las muestras están dentro las normativas nacionales e internacionales.

En las Figuras E.1 y E.2, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

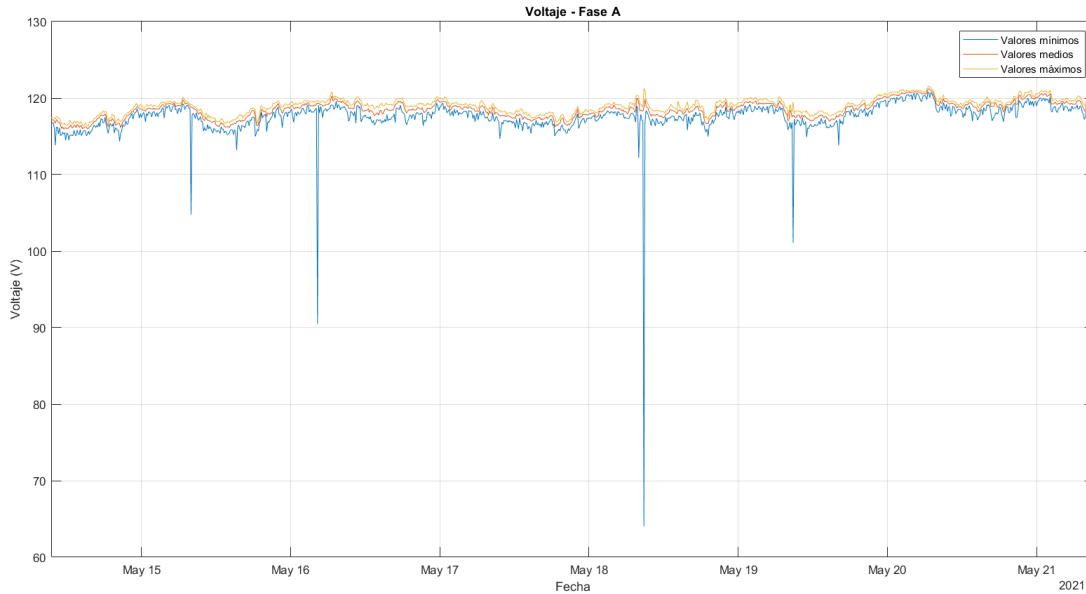


Figura E.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores

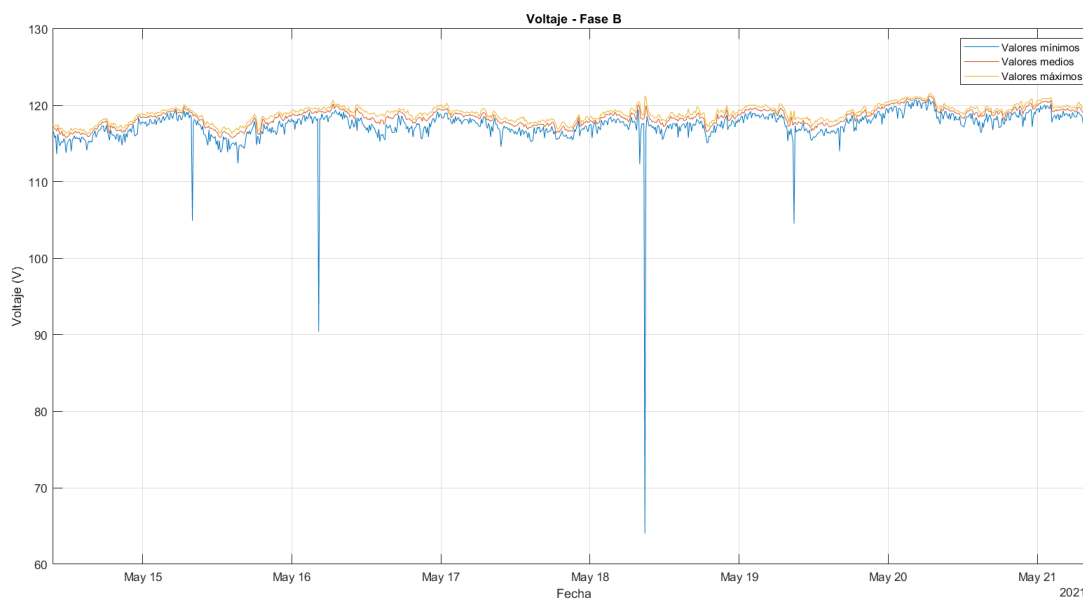


Figura E.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase son similares a lo largo de la medición registrada. El valor mínimo de tensión al ser sumamente bajo puede producir fallos en los aparatos eléctricos conectados.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla E.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla E.6, se expone la evaluación de la muestra con las normativa americana IEEE 1250.

Tabla E.5: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,07 \%$	
Muestras mayores al límite (0)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,00 %	1,69 %
100 %	0 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	15-05-2021 06:40	19-05-2021 08:50

Tabla E.6: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,07 \%$	
Muestras mayores al límite (0)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,00 %	1,69 %
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 15-05-2021 06:40	Fecha y hora 19-05-2021 08:50

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos tanto en la normativa nacional como internacional.

En la Figura E.3, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

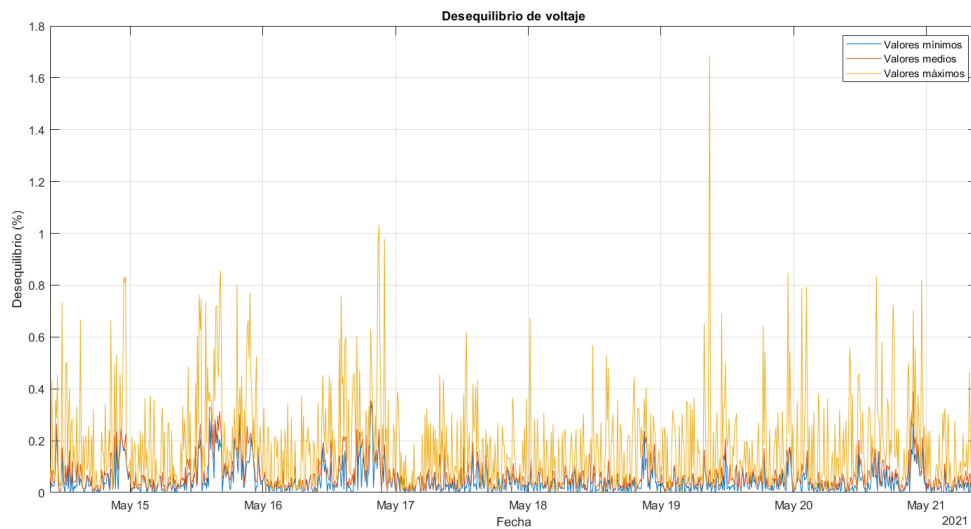


Figura E.3: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la similitud que existe entre los valores de tensión de cada fase, se puede observar que el desequilibrio de tensión se encuentra dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas E.7 y E.8, se presenta un resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas en la medición realizada.

Tabla E.7: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 1,01 A	
Mínimo	Máximo
0,003 A	7,161 A
Fecha y hora 16-05-2021 08:00	Fecha y hora 19-05-2021 12:20

Tabla E.8: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 30,09 A	
Mínimo	Máximo
0 A	41,87 A
Fecha y hora 16-05-2021 07:00	Fecha y hora 16-05-2021 18:50

En las Figuras E.4 y E.5, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

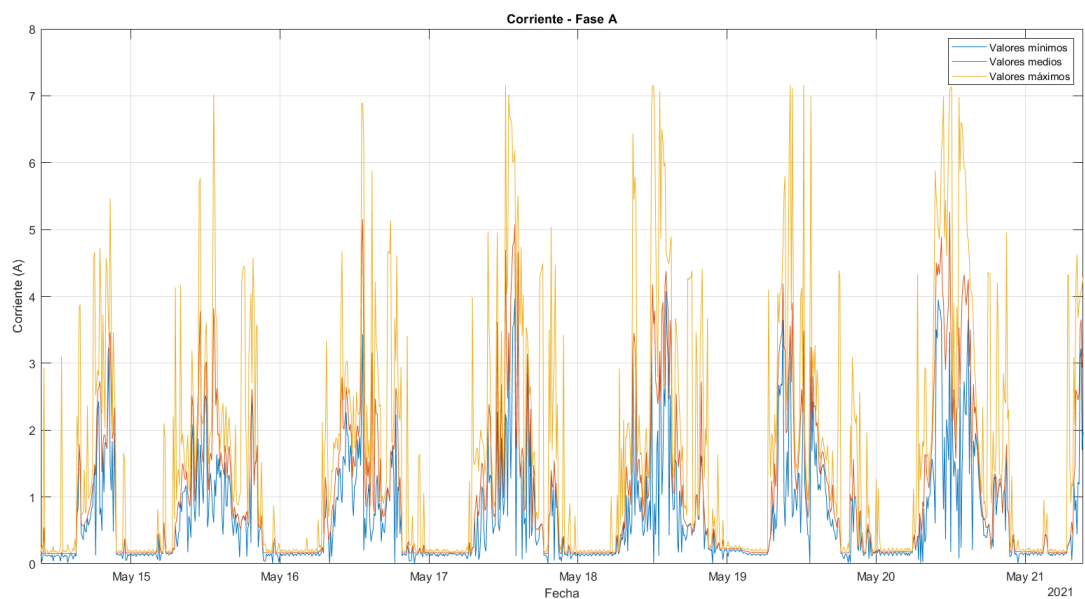


Figura E.4: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

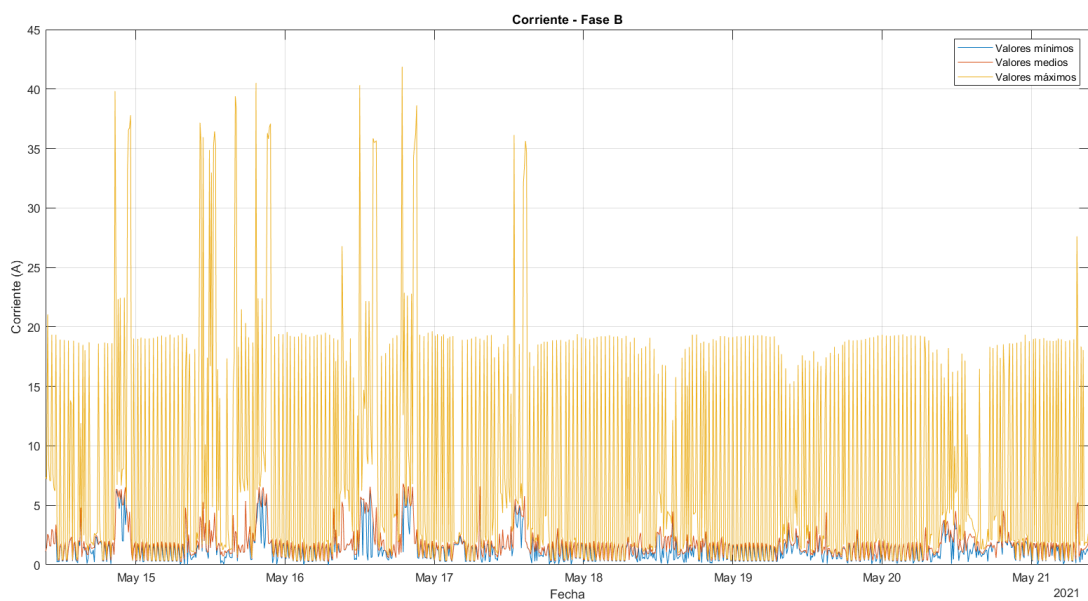


Figura E.5: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se puede observar grandes diferencias entre los valores máximos de las fases, además se puede presenciar elevaciones de la corriente a partir del medio día y parte de la noche.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla E.9, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla E.9: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 46,58 %	
Muestras mayores al límite (917)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,05 %	100 %
9,03 %	90,97 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	17-05-2021 13:50	16-05-2021 07:00

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos son 90,97% tanto en las normativa nacional como internacional.

En la Figura E.6, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

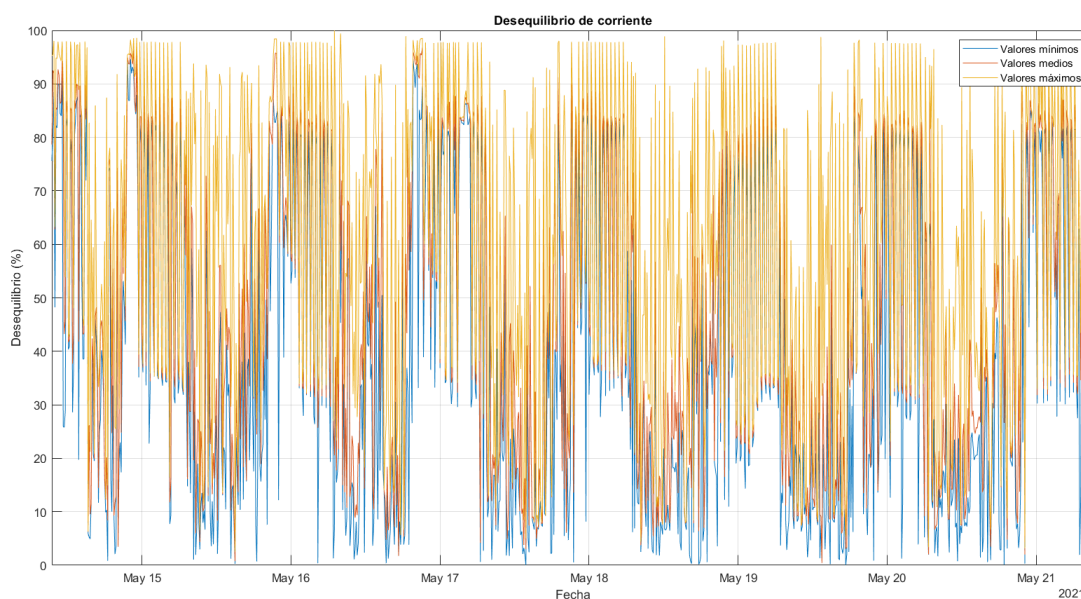


Figura E.6: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

Debido a la gran diferencia entre los valores de corriente registrados durante la medición, el desequilibrio de corriente se encuentra mayormente fuera de los límites establecidos por cada normativa.

Los desbalances presentados en el domicilio, pueden ser ocasionados debido a las cargas utilizadas, es decir:

- Desbalance de fases debido a cargas conectadas a una sola fase
- Deficiente instalación en la vivienda
- El sistema fotovoltaico inyecta corriente al transformador debido a la falta de generación de energía

Flicker

En las Tablas E.10 y E.11, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Tabla E.10: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,21$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,70 %	0,30 %	0,04 p.u	5,71 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 20-05-2021 04:30	Fecha y hora 18-05-2021 09:00

Tabla E.11: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,23$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,70 %	0,30 %	0,04 p.u	5,76 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 20-05-2021 04:30	Fecha y hora 18-05-2021 09:00

Se observa que en la fase A, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,30% tanto en la normativa nacional como internacional.

En las Figuras E.7 y E.8 se presenta las curvas de flicker en cada una de las fases.

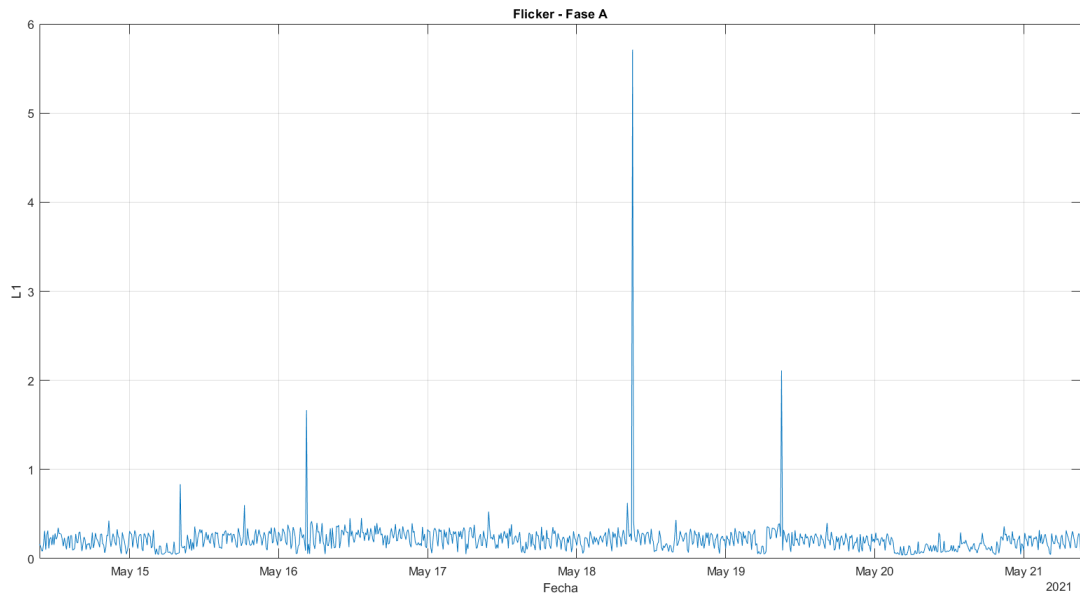


Figura E.7: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

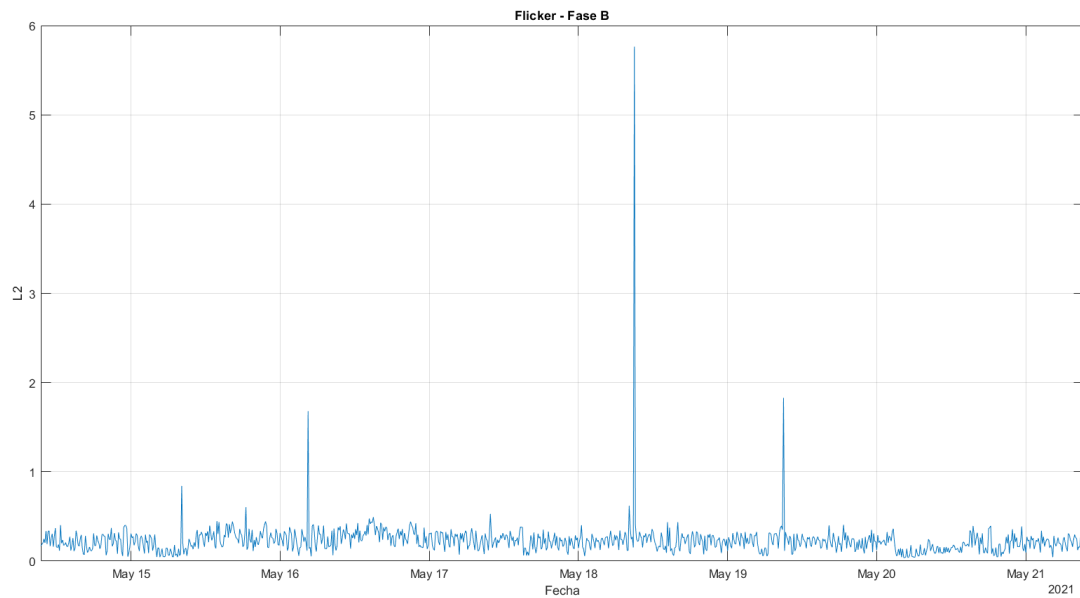


Figura E.8: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

Se observa que en la fase B se encuentra el flicker más alto registrado. Sin embargo, las variaciones de este indicador son similares en las 2 fases.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, este tipo de cargas pueden encontrarse en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión Armónica Individual

Este parámetro no será evaluado debido a la no medición de datos de las componentes armónicas individuales en los datos compartidos por la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

Distorsión Armónica Total

En la Tablas E.12 y E.13, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20, americana IEEE 519 y europea EN50160.

Tabla E.12: Distorsión armónica total

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,56%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,01 %	2,34 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 02:30	Fecha y hora 20-05-2021 20:30

Tabla E.13: Distorsión armónica total

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,58%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,02 %	2,34 %
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 02:30	Fecha y hora 20-05-2021 20:40

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura E.9, se presenta los valores de distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

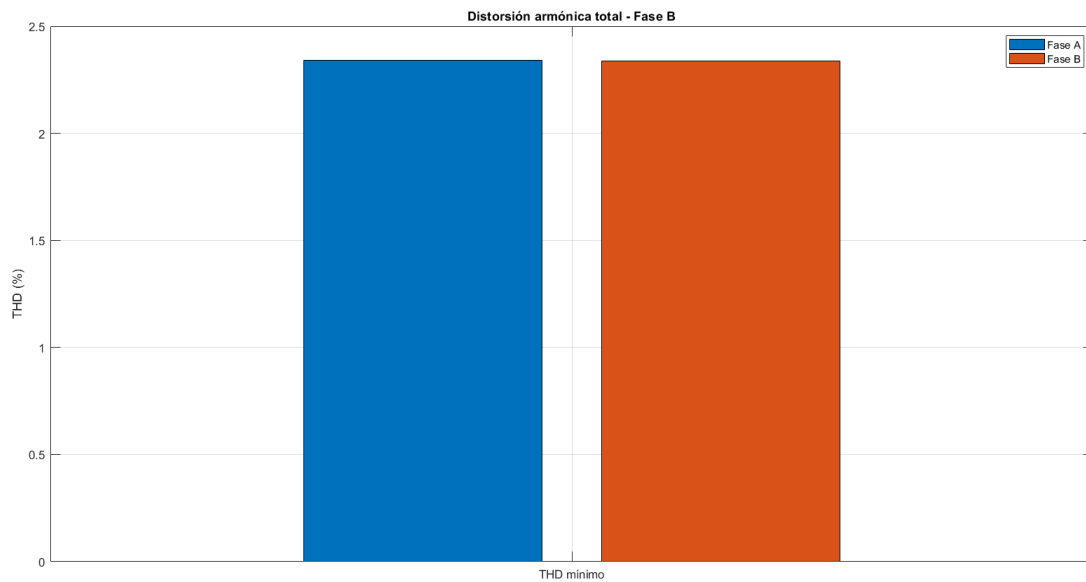


Figura E.9: Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

Este parámetro no será evaluado debido a la no medición de datos de la frecuencia en los datos compartidos por la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

AGRADECIMIENTO

Primero agradecer a Dios por la voluntad de levantarme cada día y materializar mis anhelos. A mis padres, quienes desde pequeño me aconsejaron, apoyaron y creyeron en todos mis objetivos. A mis hermanas y familia, su compañía y buenos deseos nunca faltaron. A todos mis amigos y futuros colegas, por su infinita ayuda y buena voluntad.

Marlon Arturo Barreto Naula

AGRADECIMIENTO

Estas líneas no son lo suficientemente largas para dar un reconocimiento a cada una de las personas que fueron piezas claves en la obtención de este nuevo logro. Sin embargo, me gustaría agradecer a mi familia y amigos en general por el apoyo, por sus enseñanzas y por su gran ayuda que me han brindado durante esta etapa de mi vida.

Por supuesto, quiero dar las gracias a mi madre Ruth y a mi padre Galo por brindarme su apoyo durante el transcurso de mi vida escolar y por permitirme vivir este momento tan especial ya que sin ellos esto no hubiera sido posible. Siento gran orgullo al poder decir que son mi ejemplo a seguir para ser una mejor persona y desde ahora un gran profesional.

A mis hermanos Dennis y Adrián quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional y palabras de aliento en momentos difíciles. Espero ser un gran ejemplo para ellos y hacer que se sientan un gran orgullo de mí.

Ariel Oswaldo Guananga Guananga

DEDICATORIA

A mis padres Arturo y Trancito, por ser los guías de mi vida, su paciencia, comprensión y solidaridad durante mi preparación profesional.

A mis hermanas Jenny y Johmayra, por ser el impulso de mis sueños y esperanzas desde la infancia, Este logro también es de ustedes.

A mi sobrino Andrés, que este logro represente un estímulo para el largo camino que debes recorrer.

A Leonardo, mi cuñado, por siempre brindarme su apoyo y consejos.

A mis amigos y familia, por su apoyo, necesario en los momentos difíciles.

A mi difunta hermana Mariela, siempre estuviste presente para mi, te dedico mi éxito desde el fondo de mi corazón mi compañera de infancia.

Marlon Arturo Barreto Naula

DEDICATORIA

Quiero dedicar todo el trabajo y esfuerzo realizado en todos estos años a las personas que tuvieron una gran influencia en mí y tristemente hoy ya no están.

Este logro se lo dedico especialmente a mi tía Marianita quién con gran amor y paciencia supo guiarme, aconsejarme y corregirme para ser una persona responsable, juiciosa y dedicada que creo ser. Todo este camino recorrido fue el resultado de sus enseñanzas que hoy y siempre procuraré seguir para continuar hacia adelante.

Por supuesto a mi abuelita Martha quién siempre soñó estar junto a mí en este momento. Siempre quedará en mí corazón todo el amor que me brindó, su apoyo incondicional y la sabiduría para obrar correctamente en este camino.

Ariel Oswaldo Guananga Guananga

RESUMEN

En este trabajo de titulación, se estudió la calidad de energía eléctrica de varios sistemas fotovoltaicos conectados a la red ubicados en la ciudad de Cuenca. Se realizó una búsqueda de normativas ecuatorianas, americanas y europeas referentes a la calidad de energía para así estudiar los parámetros y límites establecidos por cada una de ellas. Utilizando datos reales medidos por los autores, e información entregada por el laboratorio de microrred de la Universidad de Cuenca y la Empresa Eléctrica Centrosur, se elaboraron informes de calidad de energía de cada sistema, aplicando la normativa nacional e internacional vigente en la actualidad.

Palabras clave: Calidad de energía, sistema fotovoltaico, perturbación, nivel de tensión, nivel de corriente, desequilibrio, flicker, distorsión armónica, frecuencia.

ÍNDICE

RESUMEN	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	1
1.2 Estado del arte	2
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo General	7
1.3.2 Objetivos Específicos	7
2 MARCO TEÓRICO	8
2.1 Situación nacional de los sistemas fotovoltaicos	8
2.2 Normativa nacional	9
2.2.1 ARCERNNR 001/2021: Marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regula- dos de energía eléctrica	9
2.2.1.1 Caracterización de la generación distribuida para au- toabastecimiento	9
2.2.1.2 Potencia nominal del sistema de generación dis- tribuida para autoabastecimiento	10
2.2.1.3 Factibilidad de conexión de sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento	10
2.2.2 ARCERNNR 002/20: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica	11
2.2.2.1 Distorsión armónica de tensión	11
2.2.2.2 Desequilibrio de tensión	12
2.3 Normativa Americana	12
2.3.1 ANSI C84.1: Electric power systems voltage ratings	13
2.3.1.1 Sistemas de 120V a 600V	13
2.3.2 IEEE 519: Recommended practice and requirements for har- monic control in electric power systems	13
2.3.3 IEEE 1159: Recommended practice for monitoring electric power quality	15

2.3.4	IEEE 1250: Guide for identifying and improving voltage quality in power systems	15
2.3.4.1	Límite recomendado de voltaje	15
2.3.4.2	Desequilibrio de tensión	16
2.3.4.3	Límites recomendados de armónicos	16
2.4	Normativa Europea	17
2.4.1	EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks	17
2.4.1.1	Frecuencia	17
2.4.1.2	Variación de tensión	18
2.4.1.3	Flicker y huecos de tensión	18
2.4.1.4	Interrupciones	18
2.4.1.5	Distorsión Armónica de Voltaje	19
2.4.2	IEC 61000-2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems	19
2.4.2.1	Desequilibrio de tensión	19
2.4.2.2	Variación de frecuencia	20
2.4.3	IEC 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances	20
2.5	Comparación entre normativas	22
3	METODOLOGÍA	24
3.1	Introducción	24
3.2	Recopilación de normas y regulaciones	25
3.3	Determinar variables e indicadores	26
3.4	Recolección de datos	26
3.4.1	Equipo utilizado	26
3.5	Procesamiento de datos	26
3.6	Interpretación, análisis y evaluación de datos	27
4	RESULTADOS	28
4.1	Caso I	29
4.2	Caso II	30
4.3	Caso III	31
4.4	Caso IV	32
4.5	Caso V	33
4.6	Resumen	34
5	DISCUSIÓN	38

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
6.1 Conclusiones	40
6.2 Recomendaciones	42
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	46
A Caso I	47
B Caso II	66
C Caso III	86
D Caso IV	106
E Caso V	119

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Capacidad instalada en Ecuador de sistemas fotovoltaicos	8
3.1	Diagrama de flujo	25
A.1	Niveles de tensión - Fase A	50
A.2	Niveles de tensión - Fase B	50
A.3	Niveles de tensión - Fase C	51
A.4	Desequilibrio de tensión	52
A.5	Niveles de corriente - Fase A	54
A.6	Niveles de corriente - Fase B	54
A.7	Niveles de corriente - Fase C	55
A.8	Desequilibrio de corriente	56
A.9	Flicker - Fase A	58
A.10	Flicker - Fase B	58
A.11	Flicker - Fase C	59
A.12	Armónicos pares	61
A.13	Armónicos impares múltiplos de 3	62
A.14	Armónicos impares	62
A.15	Distorsión armónica total de voltaje	64
A.16	Niveles de Frecuencia	65
B.1	Niveles de tensión - Fase A	69
B.2	Niveles de tensión - Fase B	69
B.3	Niveles de tensión - Fase C	70
B.4	Desequilibrio de tensión	71
B.5	Niveles de corriente - Fase A	73
B.6	Niveles de corriente - Fase B	73
B.7	Niveles de corriente - Fase C	74
B.8	Desequilibrio de corriente	75
B.9	Flicker - Fase A	77
B.10	Flicker - Fase B	77
B.11	Flicker - Fase C	78
B.12	Armónicos pares	81

B.13 Armónicos impares múltiplos de 3	81
B.14 Armónicos impares	82
B.15 Distorsión armónica total de voltaje	84
B.16 Niveles de Frecuencia	85
C.1 Niveles de tensión - Fase A	89
C.2 Niveles de tensión - Fase B	89
C.3 Niveles de tensión - Fase C	90
C.4 Desequilibrio de tensión	91
C.5 Niveles de corriente - Fase A	93
C.6 Niveles de corriente - Fase B	93
C.7 Niveles de corriente - Fase C	94
C.8 Desequilibrio de corriente	95
C.9 Flicker - Fase A	97
C.10 Flicker - Fase B	97
C.11 Flicker - Fase C	98
C.12 Armónicos pares	101
C.13 Armónicos impares múltiplos de 3	101
C.14 Armónicos impares	102
C.15 Distorsión armónica total de voltaje	104
C.16 Niveles de Frecuencia	105
D.1 Niveles de tensión - Fase A	108
D.2 Niveles de tensión - Fase B	109
D.3 Desequilibrio de tensión	110
D.4 Niveles de corriente - Fase A	112
D.5 Niveles de corriente - Fase B	112
D.6 Desequilibrio de corriente	113
D.7 Flicker - Fase A	115
D.8 Flicker - Fase B	116
D.9 Distorsión Armónica Total de voltaje	118
E.1 Niveles de tensión - Fase A	121
E.2 Niveles de tensión - Fase B	122
E.3 Desequilibrio de tensión	123
E.4 Niveles de corriente - Fase A	125
E.5 Niveles de corriente - Fase B	125
E.6 Desequilibrio de corriente	126
E.7 Flicker - Fase A	128
E.8 Flicker - Fase B	128

E.9 Distorsión armónica total de voltaje	130
--	-----

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Resumen del estado del arte	6
2.1	Potencia nominal sGDA categoría 1	10
2.2	Límites para el índice de nivel de tensión	11
2.3	Límites máximos de armónicos de tensión	12
2.4	Límites de operación para sistemas de 120V a 600V	13
2.5	Límites de distorsión de voltaje	14
2.6	Límites de distorsión de corriente	14
2.7	Límites según la norma IEEE 1250	16
2.8	Límites armónicos norma IEEE 1250	16
2.9	Límites según la norma EN 50160	18
2.10	Límites armónicos norma EN 50160	19
2.11	Límites armónicos norma IEC 61000-2-2	20
2.12	Límites de tolerancia de perturbaciones norma IEC 61000-2-4	21
2.13	Límites de armónicos norma IEC 61000-2-4	21
2.14	Comparación de perturbaciones según cada normativa	22
2.15	Comparación de armónicos múltiplos 3 según cada normativa	22
2.16	Comparación de armónicos impares no múltiplos de 3 según cada normativa	23
2.17	Comparación de armónicos pares según cada normativa	23
3.1	Normativas vigentes - 2022	27
4.1	Resumen de resultados - Normativa ecuatoriana	35
4.2	Resumen de resultados - Normativa americana	36
4.3	Resumen de resultados - Normativa europea	37
A.1	Niveles de tensión - Fase A	48
A.2	Niveles de tensión - Fase A	48
A.3	Niveles de tensión - Fase B	48
A.4	Niveles de tensión - Fase B	49
A.5	Niveles de tensión - Fase C	49
A.6	Niveles de tensión - Fase C	49
A.7	Desequilibrio de tensión	51

A.8 Desequilibrio de tensión	52
A.9 Niveles de corriente - Fase A	53
A.10 Niveles de corriente - Fase B	53
A.11 Niveles de corriente - Fase C	53
A.12 Desequilibrio de corriente	55
A.13 Nivel de flicker - Fase A	57
A.14 Nivel de flicker - Fase B	57
A.15 Nivel de flicker - Fase C	57
A.16 Componentes armónicos pares de voltaje	60
A.17 Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3	60
A.18 Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3	61
A.19 Distorsión armónica total - Fase A	63
A.20 Distorsión armónica total - Fase B	63
A.21 Distorsión armónica total - Fase C	63
A.22 Niveles de frecuencia	64
A.23 Niveles de frecuencia	65
B.1 Niveles de tensión - Fase A	67
B.2 Niveles de tensión - Fase A	67
B.3 Niveles de tensión - Fase B	67
B.4 Niveles de tensión - Fase B	68
B.5 Niveles de tensión - Fase C	68
B.6 Niveles de tensión - Fase C	68
B.7 Desequilibrio de tensión	70
B.8 Desequilibrio de tensión	71
B.9 Niveles de corriente - Fase A	72
B.10 Niveles de corriente - Fase B	72
B.11 Niveles de corriente - Fase C	72
B.12 Desequilibrio de corriente	74
B.13 Nivel de flicker - Fase A	76
B.14 Nivel de flicker - Fase B	76
B.15 Nivel de flicker - Fase C	76
B.16 Componentes armónicos pares de voltaje	79
B.17 Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3	80
B.18 Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3	80
B.19 Distorsión armónica total - Fase A	82
B.20 Distorsión armónica total - Fase B	83

B.21	Distorsión armónica total - Fase C	83
B.22	Niveles de frecuencia	84
B.23	Niveles de frecuencia	85
C.1	Niveles de tensión - Fase A	87
C.2	Niveles de tensión - Fase A	87
C.3	Niveles de tensión - Fase B	87
C.4	Niveles de tensión - Fase B	88
C.5	Niveles de tensión - Fase C	88
C.6	Niveles de tensión - Fase C	88
C.7	Desequilibrio de tensión	90
C.8	Desequilibrio de tensión	91
C.9	Niveles de corriente - Fase A	92
C.10	Niveles de corriente - Fase B	92
C.11	Niveles de corriente - Fase C	92
C.12	Desequilibrio de corriente	94
C.13	Nivel de flicker - Fase A	95
C.14	Nivel de flicker - Fase B	96
C.15	Nivel de flicker - Fase C	96
C.16	Componentes armónicos pares de voltaje	99
C.17	Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3	99
C.18	Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3100	
C.19	Distorsión armónica total - Fase A	102
C.20	Distorsión armónica total - Fase B	103
C.21	Distorsión armónica total - Fase C	103
C.22	Niveles de frecuencia	104
C.23	Niveles de frecuencia	105
D.1	Niveles de tensión - Fase A	107
D.2	Niveles de tensión - Fase A	107
D.3	Niveles de tensión - Fase B	107
D.4	Niveles de tensión - Fase B	108
D.5	Desequilibrio de tensión	109
D.6	Desequilibrio de tensión	110
D.7	Niveles de corriente - Fase A	111
D.8	Niveles de corriente - Fase B	111
D.9	Desequilibrio de corriente	113
D.10	Nivel de flicker - Fase A	114
D.11	Nivel de flicker - Fase B	115

D.12	Distorsión Armónica Total - Fase A	117
D.13	Distorsión Armónica Total - Fase B	117
E.1	Niveles de tensión - Fase A	120
E.2	Niveles de tensión - Fase A	120
E.3	Niveles de tensión - Fase B	120
E.4	Niveles de tensión - Fase B	121
E.5	Desequilibrio de tensión	122
E.6	Desequilibrio de tensión	123
E.7	Niveles de corriente - Fase A	124
E.8	Niveles de corriente - Fase B	124
E.9	Desequilibrio de corriente	126
E.10	Nivel de flicker - Fase A	127
E.11	Nivel de flicker - Fase B	127
E.12	Distorsión armónica total	129
E.13	Distorsión armónica total	130

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Las fluctuaciones de tensión y la distorsión armónica son los problemas más comunes en los sistemas eléctricos fotovoltaicos. La existencia de estas anomalías, a su vez producen en los equipos eléctricos fallos como: atenuación en luminarias, desconexión de equipos, pérdida de datos y problemas en el control de las protecciones eléctricas.

Es por ello que, se propone analizar la calidad de energía de los sistemas fotovoltaicos para valorar si los diferentes parámetros como: sobretensiones, subten-siones, variaciones de frecuencia, flickers, interrupciones y armónicos cumplen con los límites especificados en la normativa eléctrica actual.

Para cada sistema fotovoltaico, se va a establecer condiciones de la tensión, corriente y distorsión armónica. Toda esta información se recopila en un período de una semana. Utilizando estos datos se procede a evaluar los valores medidos, comparándolos con los límites especificados en normas y regulaciones vigentes, tanto nacionales como internacionales.

Este trabajo proporciona información sobre la calidad de energía de algunos sistemas fotovoltaicos instalados en la ciudad de Cuenca, para así determinar si el suministro eléctrico proporcionado por estos sistemas es seguro y confiable. También se busca comparar la normativa ecuatoriana con normativas internacionales, a fin de determinar si las características y límites establecidos en la normativa local son suficientes para evaluar la calidad de energía de un sistema fotovoltaico.

1.2 Estado del arte

En la Universidad de Murdoch (Australia) se realizó un estudio de calidad de energía con la inserción de un sistema de generación fotovoltaico [1]. Se obtuvo información de: distorsión de voltaje y corriente, ángulo de desfase de la tensión, además de la temperatura de los equipos utilizados por la universidad que funcionan con sistemas trifásicos. Como referencia de análisis se empleó las normas IEC 61000-2-2 [2] y NEMA [3]. Se estableció una variación de voltaje dentro del 2% determinado por la norma. Con respecto a la corriente, esta superaba el 5% descrito por la norma IEC y NEMA. Al realizar el estudio de temperatura en el transformador se observó un sobrecalentamiento. La razón de este fenómeno se debe a que el tercer armónico de corriente es superior al límite de la norma IEEE 519 [4]. Otra causa de esta anomalía es el mal dimensionamiento del transformador.

Oliva y Balda [5], realizaron mediciones de armónicos de dos sistemas fotovoltaicos ubicados al oeste de Texas en el área de Davis. En dicho estudio se presentan los resultados obtenidos de un análisis de calidad de energía eléctrica aplicando la norma IEEE 519 [6]. De las mediciones adquiridas se reveló que los armónicos pares producidos superaban hasta un 25% los límites a excepción del armónico 34. El valor elevado de los armónicos no se puede atribuir a la inserción de los sistemas fotovoltaicos, debido a que incluso cuando no había generación, los valores armónicos se mantenían en condiciones similares. Se cree que la causa de este fenómeno es la alta demanda de cargas no lineales conectadas al sistema.

En Canadá se analizó la calidad de energía estudiando el impacto de sistemas fotovoltaicos en perfiles de tensión en barrios residenciales. En la evaluación del sistema, se determinaron sobrevoltajes según la norma IEEE 1547 [7] de hasta un 11,25 % en el alimentador y hasta 75 % en el transformador de la red de distribución. Se estableció que la calidad se puede mejorar variando parámetros de la red de bajo voltaje y reduciendo la impedancia de cortocircuito tanto del transformador como del alimentador, logrando así reducir los problemas existentes [8]. Finalmente se determinó que la tensión en la red no sería afectada por los sistemas fotovoltaicos cuando la potencia distribuida por estos sistemas no supere los 2,5 kW en cada hogar.

En Moscú (Rusia), se realizaron estudios de calidad de energía en centrales fotovoltaicas teniendo como base las condiciones meteorológicas de la zona. Como resultado del estudio se obtuvo que la temperatura del ambiente tiene nula inter-

vención sobre la calidad de energía del sistema. Sin embargo, la irradiación influye, pues al producirse una sombra en el panel fotovoltaico se determinó que, el voltaje del sistema fotovoltaico fluctúa en un $\pm 15\%$. También se diagnosticó que las componentes armónicas se elevaron hasta 0.2% de los límites establecidos en la norma IEC 61000-2-4 [9]. Se definió que los parámetros de la calidad de energía dependen del tipo de inversor utilizado [10].

En el año 2021, se realizaron estudios para la interconexión de sistemas fotovoltaicos a una red de bajo o medio voltaje en Estados Unidos. El objetivo fue minimizar el impacto en la calidad de energía al implementar estos sistemas. Los resultados de este estudio demuestran que la interconexión de un sistema fotovoltaico puede variar los parámetros de calidad de energía de la red, pues aumenta la distorsión armónica y eleva los voltajes entre el 4% y 9% . Una posible solución para que los límites de calidad de energía se encuentren dentro de lo establecido, es restringir la carga para que no supere la potencia generada por el sistema fotovoltaico [11].

En Guatemala se realizó un estudio de calidad de energía en el edificio del Ministerio de Relaciones Exteriores. Se analizaron varios parámetros como: voltajes, flickers, distorsión armónica de voltaje y distorsión armónica de corriente, con la finalidad de mejorar la eficiencia energética del edificio. El resultado del estudio encontró que, varios equipos reducen la calidad de energía especialmente en horas de la tarde al elevarse el consumo de la energía eléctrica en el edificio. El autor recomienda dar seguimiento a los equipos electrónicos debido a que estos inyectan armónicos en la red y se aconseja la inclusión de un sistema fotovoltaico para elevar la calidad de energía eléctrica del edificio [12].

En [13], se presenta un estudio realizado en la India en el entorno SIMULINK. Estas simulaciones tienen la finalidad de estudiar el sistema eléctrico a fin de mejorar la calidad de energía de un sistema fotovoltaico con la implementación de un control de detección de armónicos. El algoritmo funciona detectando la potencia activa y reactiva fundamental de las cargas para posteriormente compensar sus desequilibrios. Al compensar la energía reactiva y corregir el factor de potencia se determina que las fluctuaciones de tensión y la distorsión armónica son reducidas.

Debido al incremento de producción de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos surge la necesidad de conseguir la máxima potencia del sistema y de mejorar su calidad de la energía. Para analizar esto, en Alemania se desarrolló un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) el cual se basa en un controlador de inteligencia artificial. Al realizar simulaciones en el entorno

SIMULINK se pudo observar que el algoritmo MPPT puede conseguir la máxima potencia del sistema fotovoltaico y reducir las distorsiones armónicas al aumentar el voltaje de salida mejorando la calidad de energía [14].

El análisis de calidad de energía en el Hospital San José, cantón Taisha, determinó los índices de tensión en las líneas A y B con valores de 17.2% y 7.4% respectivamente, incumpliendo los valores admisibles adoptados por la regulación ARCONEL 005/18 [15], vigente en su momento. Se realizaron mediciones durante una semana y se definió el día de mayor demanda con una potencia de 33.3 kW, valor a considerar para el diseño del sistema [16]. Se concluye que con la implementación de un sistema fotovoltaico en el hospital, el nivel de voltaje va a mejorar aumentando la calidad de energía.

En la Universidad Politécnica Salesiana se realizó un estudio de calidad de energía del sistema fotovoltaico [17], adaptándose a las normas indicadas en [4], [15] y [18], vigentes en ese momento. Se realizó el estudio analizando las ondas de voltaje y la distorsión armónica producida cuando este sistema entra en operación. El desequilibrio de voltaje una vez terminado el estudio se encuentra por debajo del 2% permitido, pero en cuanto al desequilibrio de corriente, se pudo evidenciar que esta supera el 10%. La causa de este desequilibrio se debe al alto consumo de electricidad durante horas de la mañana, mientras que, en las noches cuando el sistema no genera electricidad este se comporta como una carga más, pues introduce perturbaciones en la red eléctrica.

En un transformador particular perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana se realizó un estudio de calidad de energía [19]. Se evaluaron los índices de calidad del sistema fotovoltaico diseñado para alimentar electrolineras que puedan cargar baterías de vehículos eléctricos, cuando se conecta y desconecta a la red de energía. Para ambos casos se realizaron mediciones en un período de 7 días, según dicta la regulación ARCONEL 005/18 [15]. Al analizar los parámetros se observó que ninguno supera los límites establecidos por la normativa ecuatoriana. Concluyendo que el sistema fotovoltaico no repercute en la calidad de energía dentro de los límites de las normas pertinentes. Aunque se introducen armónicos en la red de energía, estos se encontraron dentro de los límites indicados en la norma.

En el año 2012, en la ciudad de Cuenca debido a la necesidad de evaluar la calidad de energía suministrada en la red [20], se desarrolla un software que permite evaluar y monitorear estos parámetros. Se obtuvieron muestras en puntos de acoplamiento de sistemas fotovoltaicos y en cualquier otro punto de la red. Se midieron factores de

severidad de flickers Pst (corto plazo) y Plt (largo plazo). La evaluación estableció que el sistema muestreado cumple con los parámetros de calidad de energía establecidos en las normas IEEE 519 [4] y en IEEE 1159 [21].

En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de los estudios y simulaciones realizadas en el estudio del arte sobre la calidad de energía en sistemas fotovoltaicos.

Tabla 1.1: Resumen del estado del arte

RESUMEN DE ESTUDIOS REALIZADOS				
Ubicación	Estudio	Potencia	Parámetros	Resultado
Universidad de Murdoch (Australia)	Calidad de energía	56 kW	Nivel de voltaje, nivel de corriente y desequilibrios	Nivel de corriente fuera de los límites establecidos
Área de Davis (Texas)	Calidad de energía	25 kW	Armónicos	Todos cumplen a excepción del armónico 34
Moscú (Rusia)	Calidad de energía	Varios sistemas	Nivel de voltaje según las condiciones meteorológicas	Dependiendo de la irradiación solar el voltaje fluctúa en $\pm 15\%$
Canadá	Impacto de sistemas fotovoltaicos		Nivel de tensión en transformadores	No tiene ninguna afección si cada sistema no supera la generación de 2.5 kW
Estados Unidos	Simulaciones para la interconexión de SFV		Nivel de voltaje y distorsión armónica	Elevación del nivel de voltaje hasta el 9%. Aumento de la distorsión armónica
India	Simulaciones		Armónicos	Disminución de THD compensando la potencia reactiva
Alemania	Simulaciones		Nivel de voltaje y distorsión armónica	Algoritmo MPPT consigue la potencia máxima del sistema y reduce el THD
Ministerio de Relaciones Exteriores (Guatemala)	Calidad de energía	68,64 kW	Nivel de voltaje, flickers y distorsión armónica	La calidad de energía es reducida debido al incremento de cargas no lineales
Hospital San José (Taisha)	Calidad de energía	33 kW	Nivel de voltaje	Cumple con la normativa ARCONEL 005/18
Universidad Politécnica Salesiana (Edif. Guillermo Mensi)	Calidad de energía	0,87 kW	Nivel de voltaje, flicker, distorsión armónica y desequilibrios	Los desequilibrios se encuentran fuera del límite establecidos en las normativas de calidad
Universidad Politécnica Salesiana (Cuenca)	Calidad de energía	12,6 kW	Nivel de voltaje, flicker, distorsión armónica y desequilibrios	Cumple con la normativa ARCONEL 005/18
Cuenca (Ecuador)	Desarrollo de software		Nivel de voltaje, flicker, distorsión armónica y desequilibrios	Desarrollo de software que monitorea y evalúa los parámetros con la normativa IEEE 519

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Identificar los efectos producidos en la calidad de energía por la incorporación de sistemas fotovoltaicos de la ciudad de Cuenca teniendo en cuenta las normas y regulaciones vigentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer parámetros de calidad de energía al incorporar generación distribuida, particularmente energía fotovoltaica.
- Analizar las mediciones de calidad de energía de cada sistema fotovoltaico conectado a la red de distribución, evaluando suficientes sistemas para obtener resultados generales.
- Definir el cumplimiento de los parámetros de calidad de energía, aplicando normativas nacionales e internacionales.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Situación nacional de los sistemas fotovoltaicos

Ecuador mantiene una gran ventaja en radiación solar debido a su ubicación geográfica. La política de reducir el consumo de combustibles fósiles en generación eléctrica, ha fomentado la construcción de varios sistemas fotovoltaicos en algunas ciudades del país. Hasta el año 2018, en el país se han instalado 88 sistemas fotovoltaicos con una potencia nominal de 2,9 MW [22].

En la Figura 2.1 se presenta la capacidad instalada de cada empresa distribuidora.

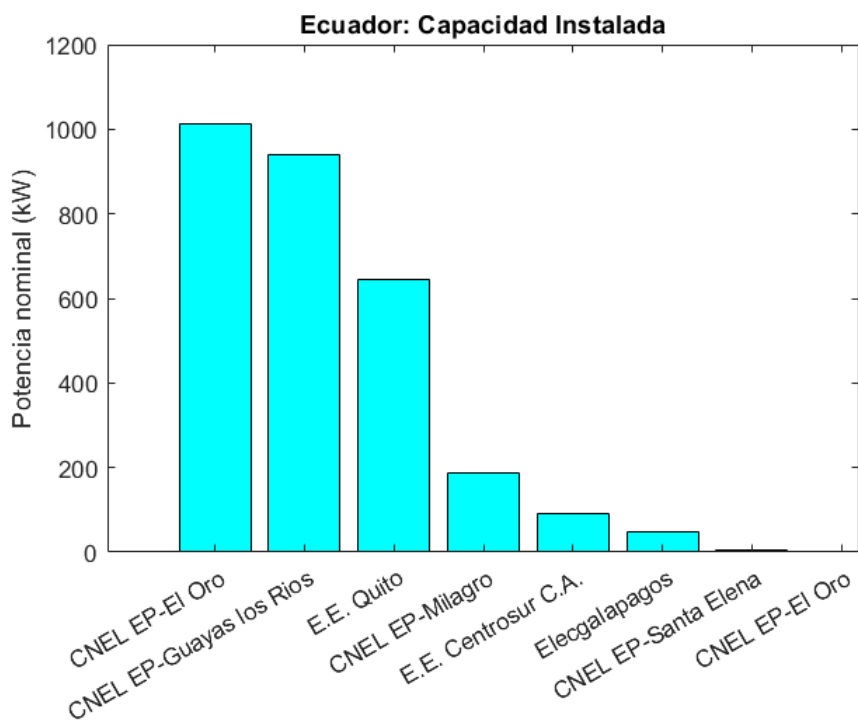


Figura 2.1: Capacidad instalada en Ecuador de sistemas fotovoltaicos

2.2 Normativa nacional

En Ecuador se han establecido varias normas que tienen la finalidad de brindar a los usuarios un suministro eléctrico de calidad. Uno de los objetivos principales de la creación de estas normas es establecer parámetros y limitarlos para que el suministro eléctrico sea confiable y de calidad. La normativa ecuatoriana analiza los siguientes índices:

- Nivel de voltaje
- Flicker
- Distorsión armónica de voltaje
- Desequilibrios de voltaje

Estos parámetros son medidos en un punto de acoplamiento común, pudiéndose aplicar a cualquier sistema eléctrico incluyendo a sistemas fotovoltaicos interconectados con la red de distribución [23].

2.2.1 ARCERNNR 001/2021: Marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica

Esta normativa aprobada en 2021, en vigencia tiene como objetivo establecer las condiciones de operación de la generación distribuida basados en fuentes renovables. Esta normativa busca regular a los consumidores que instalen sistemas para su autoabastecimiento, sistemas conectados a la red y para las empresas distribuidoras [23].

2.2.1.1 Caracterización de la generación distribuida para autoabastecimiento

Un sistema de generación distribuida para autoabastecimiento (SGDA), es aquel que se encuentra en la misma área del consumidor y su demanda es habilitada bajo una cuenta contrato y debe cumplir con algunas condiciones:

- Posee una potencia nominal menor a 1 MW
- Está conectado a las instalaciones internas del consumidor o a la red de distribución
- Aprovecha recursos energéticos renovables
- Utiliza cualquier tecnología de generación de electricidad con o sin almacenamiento.

2.2.1.2 Potencia nominal del sistema de generación distribuida para autoabastecimiento

El cálculo de la potencia nominal del sistema está basado en un análisis de la carga y demanda de energía, con el fin de cubrir la necesidad del consumidor durante un año, su dimensionamiento es responsabilidad del usuario que implemente el sistema. La energía producida durante un año debe ser menor o igual a la demanda del consumidor durante el mismo tiempo.

2.2.1.3 Factibilidad de conexión de sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento

La normativa establece dos categorías para la conexión de los sistemas. En la Tabla 2.1, se describe las potencias nominales establecidas en la categoría 1 para conectar el sistema en sincronismo con la red de distribución, para la categoría dos corresponden valores superiores a los establecidos en la categoría 1.

Tabla 2.1: Potencia nominal sGDA categoría 1

Voltaje de conexión	Potencia Nominal
Bajo	\leq a 10 kW monofásica
	\leq a 20 kW bifásica
	\leq a 30 kW trifásica

En la factibilidad de conexión, se explican las modificaciones que deberá implementar el usuario en la red de distribución para la conexión del sistema de autoabastecimiento. Así como las condiciones de funcionamiento que debe tener el sistema en operación normal y de falla de la red.

2.2.2 ARCERNNR 002/20: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica

Esta normativa se encuentra vigente y fue aprobada en 2020, busca definir los límites e índices para la calidad de comercialización y distribución de la energía eléctrica. Así como definir los procesos de registro, medición y evaluación que las empresas distribuidoras, consumidores regulados y no regulados conectados a la red deben cumplir [24].

En la Tabla 2.2, se resumen los rangos de tensiones admisibles con respecto a la tensión en cualquier punto y el valor nominal:

Tabla 2.2: Límites para el índice de nivel de tensión

Nivel de voltaje	Rango admisible
Alto voltaje	$\pm 5.0 \%$
Medio voltaje	$\pm 6.0 \%$
Bajo voltaje	$\pm 8.0 \%$

2.2.2.1 Distorsión armónica de tensión

Este índice evalúa la distorsión armónica individual y total de tensión. En la Tabla 2.3, se resumen los límites máximos de distorsión armónica individual y total de tensión:

Tabla 2.3: Límites máximos de armónicos de tensión

Nivel de Voltaje	DITh	DTT
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	1.5

2.2.2.2 Desequilibrio de tensión

El desequilibrio de voltaje en un punto de medición del sistema será de 2 % para los niveles de voltaje.

2.3 Normativa Americana

Existen una gran variedad de perturbaciones eléctricas que pueden afectar el servicio eléctrico. La calidad de energía se basa en el cumplimiento de los límites establecidos por las diferentes normas para cada parámetro involucrado en el análisis. Las normativas americanas establecen los principales índices para un estudio de calidad de energía [4]:

- Variación de voltaje
- Sobrevoltaje
- Huecos de voltaje
- Flicker
- Variación de la frecuencia
- Interrupciones
- Distorsión armónica de voltaje

2.3.1 ANSI C84.1: Electric power systems voltage ratings

Aprobada en 2020, esta norma establece límites de operación de voltaje para sistemas eléctricos de 60 Hz y que actúan de 100 V hasta 1200 kV (niveles de voltaje estables). En esta regulación se divide los voltajes en rangos. Rango A, para voltajes óptimos y el Rango B, para voltajes aceptables pero no óptimos [25].

2.3.1.1 Sistemas de 120V a 600V

- El voltaje mínimo para el rango A es 95% del voltaje nominal
- El voltaje máximo para el rango A es 105% del voltaje nominal
- El voltaje mínimo para el rango B es 91.7% del voltaje nominal
- El voltaje máximo para el rango B es 105.8% del voltaje nominal

En la Tabla 2.4 se presenta los límites de operación de voltaje para sistemas de 120V a 600V.

Tabla 2.4: Límites de operación para sistemas de 120V a 600V

Sistemas de 120V a 600V				
Voltaje nominal (V)	Rango A		Rango B	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
120	126	114	127	110
240	252	228	254	220
480	504	456	508	440

2.3.2 IEEE 519: Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems

Aprobada en 2014, esta norma establece límites de armónicos en las ondas de voltajes y corrientes en los cuales la operación del sistema eléctrico sea de calidad y confiable. Considerando que, un cierto nivel de distorsión armónica es aceptable para la

empresa distribuidora y el cliente, los cuales deben trabajar en conjunto para mantener estas distorsiones dentro de los límites establecidos por la norma. La medición de armónicos se la realiza en el punto de unión entre la línea de distribución y la recepción del usuario, porque al aplicarse en aparatos individuales las distorsiones podrían ser mayores a los límites recomendados [4].

En la Tabla 2.5 se presenta los límites de distorsión de voltaje establecidos por esta norma.

Tabla 2.5: Límites de distorsión de voltaje

Voltaje nominal	Armónico individual (%)	Distorsión armónica total THD(%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

En la Tabla 2.6 se presenta los límites de distorsión de corriente establecidos por esta norma.

Tabla 2.6: Límites de distorsión de corriente

Corriente de distorsión máxima						
Orden de los armónicos impares						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<20	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

I_{sc} Corriente máxima de cortocircuito

I_L Corriente máxima de demanda (Componente de frecuencia fundamental)

2.3.3 IEEE 1159: Recommended practice for monitoring electric power quality

Aprobado en 2019, el estándar engloba una supervisión de los sistemas de alimentación de corriente alterna. Describe los efectos de fenómenos electromagnéticos que ocurren en circuitos de potencia, así como condiciones nominales que se pueden originar en el suministro analizando los equipos que controlan la calidad de energía [21]. Los fenómenos que esta norma recomienda estudiar en el monitoreo de la calidad de energía de un sistema eléctrico son los siguientes:

- Amplitud
- Frecuencia
- Sobretensión
- Huecos de tensión
- Interrupciones

2.3.4 IEEE 1250: Guide for identifying and improving voltage quality in power systems

Aprobada en 2018, esta norma se revisa la calidad de energía en los sistemas eléctricos. Se evalúan niveles de calidad de energía, factores que afectan el desempeño del sistema, medidas de mitigación que mejoran el desempeño del sistema [26].

2.3.4.1 Límite recomendado de voltaje

Al existir mayor variación de voltaje dentro de las construcciones que en las líneas de distribución, el nivel de variación de voltaje recomendado es de $\pm 5\%$, con la probabilidad del 95% de que se encuentre dentro de este límite de operación.

En la Tabla 2.7 se presenta los límites establecidos en la norma americana IEEE 1250.

Tabla 2.7: Límites según la norma IEEE 1250

Perturbación	Límite
Variación de voltaje	$\pm 5\%$ condiciones normales $\pm 10\%$ condiciones inusuales
Desequilibrio de voltaje	3 %
Variación de frecuencia	± 0.5 Hz
Flicker	≥ 1
Distorsión armónica de voltaje	5% distorsión armónica total 3% componente armónica

2.3.4.2 Desequilibrio de tensión

La norma evalúa los desequilibrios de voltaje con efectos de largo plazo, es decir con una duración superior a los 10 minutos. El nivel de desequilibrio entre la secuencia negativa y positiva es de 3%.

2.3.4.3 Límites recomendados de armónicos

Los límites de armónicos individuales son importantes a altas frecuencias. Los componentes armónicos de alta frecuencia deben limitarse a niveles más bajos debido a la inserción de bancos de condensadores. Los múltiples cruces por cero de la onda debido a los armónicos crean un incorrecto funcionamiento de los aparatos eléctricos. Los límites armónicos según esta norma se describen en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Límites armónicos norma IEEE 1250

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)	Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)	Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

2.4 Normativa Europea

Existen una gran variedad de perturbaciones eléctricas que pueden afectar el servicio eléctrico. Las normativas europeas establecen los siguientes parámetros como los principales para un estudio de calidad de energía [27]:

- Variación de frecuencia
- Flicker
- Huecos de tensión
- Interrupciones
- Distorsión armónica de tensión

2.4.1 EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks

Aprobada en 2020, esta normativa tiene el propósito de asegurar el correcto funcionamiento de las instalaciones eléctricas en bajo voltaje en un punto de acoplamiento común. La norma EN 50160 [27], se puede aplicar a cualquier sistema eléctrico incluyendo a sistemas fotovoltaicos interconectados con la red de distribución. Define diferentes límites de operación tales como: frecuencia, variaciones de tensión, flicker, huecos de tensión, interrupciones, y armónicos de voltaje.

2.4.1.1 Frecuencia

Las variaciones de frecuencia para sistemas eléctricos en baja tensión pueden variar en $\pm 1\%$ de la frecuencia fundamental.

2.4.1.2 Variación de tensión

Las variaciones de tensión generalmente no superan el 5% de la tensión nominal del sistema eléctrico, sin embargo, la norma EN 50160 limita estas variaciones hasta el 10% de la tensión nominal sin poner en riesgo la integridad de los equipos conectados.

2.4.1.3 Flicker y huecos de tensión

Esta norma define que el límite del parpadeo de larga duración (P_{lt}) debe ser igual o menor a 1.

Los huecos de tensión se dan cuando la tensión nominal se encuentra entre el 90% y el 10%.

2.4.1.4 Interrupciones

La interrupción se da cuando la tensión está por debajo del 10% de la tensión nominal llegando incluso en algunos casos a ser 0.

En la Tabla 2.9 se resume el tipo de perturbación y los límites establecidos según la norma EN 50160.

Tabla 2.9: Límites según la norma EN 50160

Perturbación	Límite
Frecuencia	$\pm 1\%$
Variación de Tensión	$\pm 10\%$
Flicker	≥ 1
Hueco de tensión	$90\% \geq V_n \geq 10\%$
Interrupción	$V_n \leq 10\%$

2.4.1.5 Distorsión Armónica de Voltaje

Esta norma define límites armónicos hasta el número 25, los que preceden al 25 no tienen gran incidencia en el sistema eléctrico y es por ello que no se los toman en cuenta. En la Tabla 2.10 se detallan los límites establecidos para cada armónico. La distorsión armónica total hasta el armónico 40 no debe superar el 8%.

Tabla 2.10: Límites armónicos norma EN 50160

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden del armónico (h)	Nivel de voltaje	Orden del armónico (h)	Nivel de voltaje	Orden del armónico (h)	Nivel de voltaje
5	6.0 %	3	5.0 %	2	2.0 %
7	5.0 %	9	1.5 %	4	1.0 %
11	3.5 %	15	0.5 %	6 - 24	0.5 %
13	3.0%	21	0.5 %		
17	2.0 %				
19	1.5 %				
23	1.5 %				
25	1.5 %				

2.4.2 IEC 61000-2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems

Aprobada en 2003, la regulación incluye una guía completa sobre los niveles de compatibilidad de cada parámetro que conforma la calidad de energía tales como: fluctuaciones de voltaje, armónicos, interarmónicos, interrupciones del servicio eléctrico, sobretensiones, transitorios y variaciones de la frecuencia [2].

2.4.2.1 Desequilibrio de tensión

La norma evalúa los desequilibrios de voltaje con efectos de largo plazo, es decir con una duración superior a los 10 minutos. El nivel de desequilibrio entre la secuencia negativa y positiva es de 2% y a grandes cargas el valor podría llegar al 3%.

2.4.2.2 Variación de frecuencia

En sistemas de suministro de energía eléctrica la frecuencia debe mantenerse cerca de su valor nominal, intervalo determinado entre ± 1 Hz.

En la Tabla 2.11 se describen los límites armónicos según la norma IEC 61000-2-2.

Tabla 2.11: Límites armónicos norma IEC 61000-2-2

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)	Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)	Orden del armónico h	Voltaje del armónico (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 37$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 39$	0.2	$10 \leq h \leq 40$	$0.25 \times (10/h) + 0.25$

2.4.3 IEC 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances

Aprobada en 2002, esta norma presenta los niveles de perturbaciones en sistemas eléctricos de baja de tensión con frecuencia de 50 y 60 Hz. La norma se divide en tres clases. La primera corresponde a suministros protegidos y sensibles ante perturbaciones en sus fuentes de alimentación, la segunda clase es aplicada a los puntos en los que se conecta con la red pública y la última corresponde a la conexión interna de industrias en donde las cargas fluctúan rápidamente [9].

En la Tabla 2.12 se presentan los niveles permitidos ante perturbaciones establecidos en la norma IEC 61000-2-4.

Tabla 2.12: Límites de tolerancia de perturbaciones norma IEC 61000-2-4

Niveles de tolerancia			
Perturbaciones	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Fluctuaciones de tensión	$\pm 8 \%$	$\pm 10 \%$	$\pm 10 \%$ a 15%
Desequilibrio de tensión	2%	2%	3%
Variación de frecuencia	$\pm 1 \text{ Hz}$	$\pm 1 \text{ Hz}$	$\pm 1 \text{ Hz}$

La normativa define los límites armónicos hasta el número 49 y la distorsión armónica total. En la Tabla 2.13 se detalla los niveles permitidos para cada armónico según la norma IEC 61000-2-4.

Tabla 2.13: Límites de armónicos norma IEC 61000-2-4

Armónicos impares			
Armónicos	Clase 1	Clase 2	Clase 3
5	3%	6%	8%
7	3%	5%	7%
11	3%	3.5%	5%
13	3%	3%	4.5%
17	2%	2%	4%
$17 < h \leq 49$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$4.5 \times (17/h) - 0.5$
Armónicos impares múltiplos de 3			
Armónicos	Clase 1	Clase 2	Clase 3
3	3%	5%	6%
9	1.5%	1.5%	2%
15	0.3%	0.4%	2%
21	0.2%	0.3%	1.75%
$21 < h \leq 45$	0.2%	0.25%	1%
Armónicos pares			
Armónicos	Clase 1	Clase 2	Clase 3
2	3%	5%	6%
4	1.5%	1.5%	2.5%
6	0.3%	0.4%	2%
8	0.2%	0.3%	1.75%
10	0.2%	0.25%	1%
Distorsión armónica total			
Armónicos	Clase 1	Clase 2	Clase 3
THD	5%	8%	10%

2.5 Comparación entre normativas

En la Tabla 2.14 se comparan los límites establecidos para las diferentes perturbaciones que afectan la calidad de energía del sistema eléctrico por cada norma estudiada anteriormente. En las Tablas 2.15, 2.16 y 2.17 se comparan los límites armónicos establecidos por cada norma, los valores expresados se encuentran en porcentaje.

Tabla 2.14: Comparación de perturbaciones según cada normativa

Perturbación	Normativa					
	IEEE 519	IEEE 1250	EN 50160	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	ARCENNR 002/20
THD	8%		8%			8%
Flicker		≤ 1	≤ 1			≤ 1
Frecuencia		± 0.5 Hz	± 1 Hz	± 1 Hz	± 1 Hz	
Variación de voltaje		$\pm 10\%$	$\pm 10\%$		$\pm 10\%$	$\pm 8\%$
Desequilibrio de voltaje		3%	2%	2%	2%	2%
Desequilibrio de corriente	20%					20%

Tabla 2.15: Comparación de armónicos múltiplos 3 según cada normativa

Armónicos impares múltiplos de 3				
Orden	Límites			
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160
3	5%	5%	5%	5%
9	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%
15	0,4%	0,4%	0,4%	0,5%
21	0,3%	0,3%	0,3%	0,5%

Tabla 2.16: Comparación de armónicos impares no múltiplos de 3 según cada normativa

Armónicos Impares no múltiplos de 3				
Orden	Limites			
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160
5	6%	6%	6%	6%
7	5%	5%	5%	5%
11	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%
13	3%	3%	3%	3%
17	2%	2%	2%	2%
19	1,76%	1,76%	1,76%	1,5%
23	1,41%	1,41%	1,41%	1,5%
25	1,27%	1,27%	1,27%	1,5%
$17 \leq h \leq 49$	$2,27x17/h - 0,27$	$2,27x17/h - 0,27$	$2,27x17/h - 0,27$	

Tabla 2.17: Comparación de armónicos pares según cada normativa

Armónicos pares				
Orden	Limites			
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	EN 50160	IEC 61000 2-4
2	2%	2%	2%	5%
4	1%	1%	1%	1,5%
6	0,5%	0,5%	0,5%	0,4%
8	0,5%	0,5%	0,5%	0,3%
10	0,5%	0,5%	0,5%	0,25%
$10 \leq h \leq 50$	$0,25x10/h + 0,25$	$0,25x10/h + 0,25$		$0,25x10/h + 0,25$

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Introducción

La finalidad de este proyecto es determinar si la calidad de energía de los sistemas fotovoltaicos cumple con las normas y regulaciones vigentes. El trabajo de titulación es elaborado bajo la metodología con enfoque cuantitativo y sistemático. La parte cuantitativa mediante la utilización de datos reales de instalaciones fotovoltaicas y la parte sistemática en su procesamiento y comparación mediante parámetros establecidos en las normas vigentes.

En la Figura 3.1 se presenta un flujograma en el que se indica los pasos a seguir para el desarrollo del trabajo.

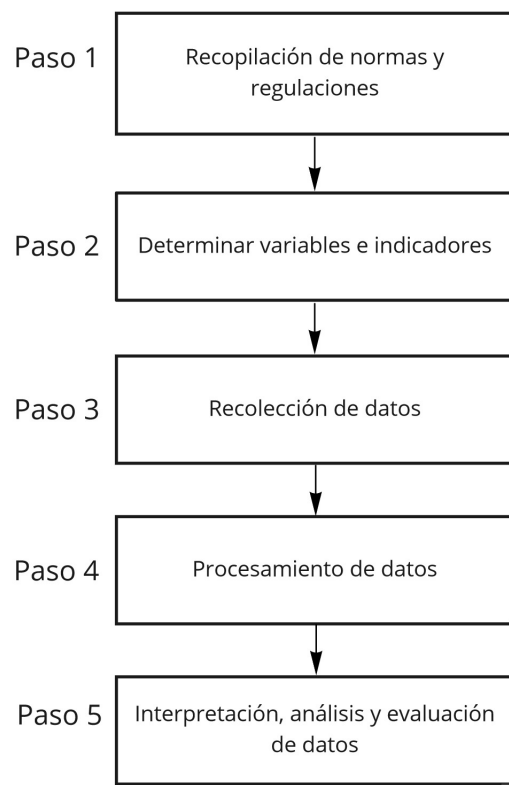


Figura 3.1: Diagrama de flujo

Fuente: Autores

3.2 Recopilación de normas y regulaciones

Para el desarrollo del trabajo, primero, se realiza una investigación de las normas y regulaciones vigentes y actualizadas del sector eléctrico de Ecuador, así como de normativa internacional.

Se realiza el análisis de normativa según la utilidad en cada región en la que es utilizada, clasificándolas en 3 grupos: normativa nacional, americana y europea.

3.3 Determinar variables e indicadores

Se recopilan los parámetros y valores que tienen más influencia en la evaluación y determinación para que el sistema eléctrico sea confiable y de calidad. Siendo los principales los siguientes: nivel de voltaje, nivel de corriente, desequilibrios de voltaje y corriente, frecuencia, flicker y armónicos

3.4 Recolección de datos

Se identificarán sistemas solares fotovoltaicos, y se realizarán mediciones de calidad de energía. En caso de disponer los datos de mediciones de calidad en la red en donde operan los sistemas fotovoltaicos, se emplearán las mismas para el análisis. Se revisará si se cumplen los índices de calidad de energía de la normativa ecuatoriana y otras normas internacionales. En caso de incumplimiento se identificará las causas.

3.4.1 Equipo utilizado

El analizador de calidad eléctrica y energía FLUKE 435 permite la medición, así como el registro de diferentes parámetros que influyen en la calidad de energía eléctrica en la red. Este dispositivo permite realizar el análisis de calidad de energía eléctrica de manera visual y con valores numéricos guardados en su memoria.

Las especificaciones de los analizadores de calidad de energía eléctrica tienen características similares. En caso de disponer datos registrados por terceros, los equipos utilizados deberán dar las mismas mediciones.

3.5 Procesamiento de datos

El programa Excel permite la exportación de los datos registrados por el analizador de calidad de energía, permitiendo el ordenamiento de datos. La herramienta Matlab hace posible la exportación de los datos ordenados desde el programa Excel, generando las gráficas para el análisis de los registros.

3.6 Interpretación, análisis y evaluación de datos

Una vez realizado el procesamiento de los datos se verificó el cumplimiento con las normativas vigentes especificadas en la Tabla 3.1. Se evalúa la calidad de energía de la red con la implementación de los sistemas fotovoltaicos. Finalmente se identifica si es necesario incluir nuevos índices de medición en la normativa local.

Tabla 3.1: Normativas vigentes - 2022

Normativas	
Ecuatoriana	ARCERNNR 002/20
Americana	IEEE 519 IEEE 1250
Europea	EN 50160 IEC 61000 2-2 IEC 61000 2-4

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En Ecuador, se consideran criterios y requisitos relacionados con la conexión de generadores fotovoltaicos con el fin de evitar la degradación de la calidad y confiabilidad del servicio eléctrico a los usuarios. Estos criterios se refieren principalmente a mantenerse dentro de los límites de operación admisibles según la Regulación No. ARCERNNR - 002/20.

En ese mismo sentido las principales normativas que establecen límites para las diferentes perturbaciones eléctricas que degradan la calidad de energía son IEEE 519, IEEE 1159 y IEEE 1250.

Mientras que, en Europa, las principales normativas que detallan los parámetros y límites son EN50160, IEC 61000-2-2 y IEC 61000-2-4.

Debido a la variedad de normas existentes hoy en día, se pretende realizar un análisis de calidad de energía considerando los siguientes indicadores.

- Nivel de voltaje y corriente
- Desequilibrio de voltaje y corriente
- Flicker
- Armónicos
- Frecuencia

4.1 Caso I

En el Anexo A, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana. Los datos fueron medidos por los autores con el equipo FLUKE 435.

La topología es trifásica a cuatro hilos con conexión en estrella. Este sistema está conformado 22 módulos solares SFP - 275 y 22 módulos solares SFM - 300. También posee 2 inversores de la marca Sunny Boy.

El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica. Está diseñado para alimentar una electrolinera ubicada en el parqueadero de la universidad, además los edificios Guillermo Mensi y Mario Rizzini.

Este sistema suministra 12,65 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 11,38 kW. El factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 18,2 %.

Las tensiones de cada fase poseen un 99,85% de efectividad y un desequilibrio del 99,80% de cumplimiento al ser evaluados dentro de los límites establecidos en la normativa ecuatoriana [24] e internacional [9], [26] y [27].

Para la corriente eléctrica del sistema se observa una mayor variación entre corriente mínima y máxima de la fase A respecto a las fases B y C. Provocando un 93,49% de la muestra desequilibrios de corriente superiores al 20% establecido en las normas [4] y [24]. Esto puede estar determinado por el desbalance de las cargas, cortocircuitos producidos en laboratorios o la nula generación del sistema fotovoltaico. Los flicker del sistema evaluado poseen un cumplimiento superior al 99% de las muestras, respecto a lo establecido en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica individual, obtuvo el 100% de valores de la muestra dentro de los límites establecidos en las normas [2], [26] y [27] y de la norma [9]. En la distorsión armónica total se obtuvo como valor máximo 3,45% de THD en la fase A, es decir el 100% la muestra cumple con los valores evaluados de 5% establecido en la norma [26] y 8% determinado por las normas [4], [24] y [27].

De acuerdo a la normativa europea [2], [9] y [27], se obtiene el 100% de cumplimiento de la muestra evaluada para la variación de frecuencia de $\pm 1\%$. La normativa

americana [26], establece una variación del $\pm 0,5\%$ en la frecuencia, obteniendo una obediencia del 99,8% de los valores muestreados.

4.2 Caso II

En el Anexo B, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico perteneciente a la Universidad del Azuay. Los datos fueron medidos por los autores con el equipo FLUKE 435. La topología es trifásica a cuatro hilos con conexión en estrella.

El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica y diseñado para alimentar a la biblioteca Hernán Malo perteneciente a la universidad.

Este sistema suministra 69 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 30,59 kW. Finalmente, el factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 15,96 %.

Las tensiones de las fases poseen un 99,80% de efectividad de tensiones mínimas admisibles. Para los límites máximos de tensiones se tiene un 100% de efectividad en las tres fases. El sistema posee un 99,70% de cumplimiento de desequilibrios cuando son evaluados dentro de lo establecido en las normativas ecuatoriana [24] e internacionales [9], [26] y [27].

Para la corriente eléctrica del sistema se observa una mayor variación entre corriente mínima y máxima en cada fase. Provocando un 99,01% de la muestra desequilibrios de corriente superiores al 20% establecido en las normas [4] y [24]. Los flicker del sistema evaluado poseen un cumplimiento superior al 99,60% de las muestras, respecto a lo determinado en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica individual, obtuvo el 100% de valores de la muestra dentro de los límites establecidos en las normas [2], [26] y [27] y de la norma [9] para armónicos pares e impares no múltiplos de 3. Para las armónicas impares múltiplos de 3, los armónicos 15, 21 y 27 poseen valores superiores a los parámetros determinados en las normas. En la distorsión armónica total se obtuvo como valor máximo 7,58% de THD en la fase A, es decir el 100% la muestra cumple con los valores determinados por las normas [4], [24] y [27].

La normativa europea [2], [9] y [27], establece una variación de $\pm 1\%$ y la normativa americana [26], establece una variación del $\pm 0,5\%$ para la frecuencia. Obteniendo el 100% de valores de la muestra por debajo de estos límites establecidos.

4.3 Caso III

En el Anexo C, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico perteneciente a la Universidad de Cuenca. Los datos registrados fueron provistos por el Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca. El equipo utilizado para la medición fue el analizador de calidad AEMC 8336.

La topología es trifásica a cuatro hilos con conexión en estrella. El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica. Está diseñado únicamente para el uso del laboratorio de microrred perteneciente a la universidad.

Este sistema suministra 15 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 0,96 kW. Finalmente, el factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 5,23 %.

El sistema fotovoltaico de la Universidad del Cuenca cumple con la normativa de calidad de energía eléctrica. Las tensiones de las fases A, B y C poseen una efectividad superior al 99,30% de tensiones mínimas admisibles y 100% en valores de tensiones máximas admisibles cuando el sistema es evaluado mediante la normativa ecuatoriana [24]. Y una efectividad superior al 99,70% cuando se evalúa según la normativa internacional [9], [26] y [27].

Al evaluar el sistema dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana [24] e internacionales [9], [26] y [27], se determina que el sistema no posee desequilibrios de tensión.

La corriente eléctrica del sistema se encuentra muy desequilibrada entre cada fase. Provocando un 97,42% de la muestra de desequilibrios de corriente por debajo del 20% establecido en las normas [4] y [24]. Los flicker del sistema evaluado poseen un cumplimiento superior al 99,50% de las muestras, respecto a lo determinado en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica individual, obtuvo el 100% de valores

de la muestra dentro de los límites establecidos en las normas [2], [26] y [27] y de la norma [9] para armónicos impares múltiplos y no múltiplos de 3. La componente armónica 6 posee valores superiores a los parámetros determinados en las normas. En la distorsión armónica total se obtuvo como valor máximo 1,60% de THD en la fase C, es decir el 100% la muestra cumple con los límites determinados por las normas [4], [24] y [27].

La normativa europea [2], [9] y [27], establece una variación de $\pm 1\%$ y la normativa americana [26], establece una variación del $\pm 0,5\%$ para la frecuencia. Determinando el 100% de valores de la muestra por debajo de estos límites establecidos.

4.4 Caso IV

En el Anexo D, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico residencial 1. Los datos fueron provistos por la empresa Centrosur. El equipo de monitoreo es el PQBox 100.

La topología es bifásica a tres hilos. El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica. Está diseñado para alimentar una vivienda ubicada en el sector Baguanchi del cantón Cuenca.

Este sistema suministra 2 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 0,38 kW. Finalmente, el factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 19,11%.

El sistema fotovoltaico residencial caso 1 posee una calidad de energía eléctrica regular. Las tensiones poseen un 94,35% y 96,53% de efectividad en las muestras de la fase A y B respectivamente evaluadas con una variación de $\pm 8\%$ establecido en [24]. Y una efectividad superior al 95% al ser evaluadas las tensiones respecto a una variación de $\pm 10\%$, valor establecido en las normas [9], [26] y [27]. Los desequilibrios de tensión son evaluados respecto a los límites de 2% establecido por [2], [9], [23] y [27], mientras que el 3% determinado por [26]. Dando por resultado un incumplimiento en las muestras evaluadas del 17,06% y 9,52% para cada limite.

Para la corriente eléctrica del sistema se observa grandes variaciones entre corriente mínima y máxima de las fases A y B. Provocando un 70,83% de la muestra de desequilibrios de corriente superiores al límite de 20% establecido en las normas

[4] y [24]. Los flicker del sistema evaluado poseen un incumplimiento del 9,52% y 11,51% de las muestras en las fases A y B, respecto a lo establecido en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica total se obtuvo como valor máximo 4,18% de THD en la fase A, es decir el 100% la muestra cumple con los valores evaluados de 5% establecido en la norma [26] y 8% determinado por las normas [4], [24] y [27].

4.5 Caso V

En el Anexo E, se desarrolla un informe con los datos obtenidos del sistema fotovoltaico residencial 2. Los datos fueron provistos por la empresa Centrosur. El equipo de monitoreo es el PQBox 100.

La topología es bifásica a tres hilos. El sistema está conectado a la red de distribución de la empresa eléctrica. Está diseñado para alimentar una vivienda ubicada en el sector condominios del valle, cantón Cuenca.

Este sistema suministra 1,34 kW, mientras que las cargas conectadas consumen una media de 0,012 kW. Finalmente, el factor de planta de este sistema fotovoltaico es de 10,14 %.

El sistema fotovoltaico residencial caso 2 posee una excelente calidad de energía eléctrica. Las tensiones de cada fase poseen un 99,85% de efectividad y para los desequilibrios el cumplimiento del 100% de la muestra, cuando son evaluados dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana [24] e internacionales [9], [26] y [27].

Para la corriente eléctrica del sistema se observa grandes variaciones de corriente entre las fases A y B. Provocando un 90,97% de la muestra de desequilibrios de corriente superiores al límite de 20% establecido en las normas [4] y [24]. Los flicker del sistema evaluado poseen un cumplimiento del 99,70% de las muestras en las fases A y B, respecto a lo establecido en las normas [24], [26] y [27].

La evaluación de la distorsión armónica total obtuvo como valor máximo 2,43% de THD en la fase A y B, es decir el 100% la muestra cumple con los valores evaluados de 5% establecido en la norma [26] y 8% determinado por las normas [4], [24] y [27].

4.6 Resumen

En las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se presenta el resumen de resultados obtenidos de la evaluación de parámetros de calidad de energía basado en la normativa ecuatoriana, americana y europea respectivamente. Se resumen los porcentajes del cumplimiento de los parámetros eléctricos obtenidos durante las mediciones en cada sistema analizado.

Según la normativa ARCERNNR 002/20, si el parámetro analizado supera el 95% de cumplimiento de los datos registrados durante la medición en cada fase, se considera que este está dentro del límite de calidad establecido por cada normativa. Cabe resaltar que esta regulación está basada con la normativa americana.

A continuación, se describe la nomenclatura utilizada en las tablas de resumen:

N/L La normativa no define este parámetro

N/D El parámetro no fue medido

Tabla 4.1: Resumen de resultados - Normativa ecuatoriana

Resumen de resultados - Normativa Ecuatoriana													
Perturbación	Universidad Politecnica Salesiana			Universidad del Azuay			Universidad de Cuenca			Caso residencial 1		Caso residencial 2	
	12,65 kW			69,00 kW			15 kW			2,00 kW		1,34 kW	
Potencia	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
Fase	99,85%	99,85%	100%	99,80%	99,90%	99,90%	99,50%	99,30%	99,60%	94,35%	96,53%	99,60%	99,60%
Nivel de tensión	99,80%			99,70%			100%			82,94%		100%	
Desequilibrio de tensión	6,51%			0,99%			97,42%			29,17%		9,03%	
Desequilibrio de corriente	99,41%	99,56%	99,41%	99,60%	99,60%	99,80%	99,50%	99,50%	99,80%	90,48%	88,49%	99,70%	99,70%
Flicker	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	
Distorsión armónica individual	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Distorsión armónica total	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	
Frecuencia	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	

Tabla 4.2: Resumen de resultados - Normativa americana

Resumen de resultados - Normativa americana													
Perturbación	Universidad Politecnica Salesiana			Universidad del Azuay			Universidad de Cuenca			Caso residencial 1		Caso residencial 2	
	12,65 kW			69,00 kW			15 kW			2,00 kW		1,34 kW	
Fase	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
Nivel de tensión	99,85%	99,85%	100%	99,80%	99,90%	99,90%	99,70%	99,70%	99,80%	95,04%	97,42%	99,60%	99,60%
Desequilibrio de tensión	99,80%			99,70%			100%			90,48%		100%	
Desequilibrio de corriente	6,51%			0,99%			97,42%			29,17%		9,03%	
Flicker	99,41%	99,56%	99,41%	99,60%	99,60%	99,80%	99,50%	99,50%	99,80%	90,48%	88,49%	99,70%	99,70%
Distorsión armónica individual	Todos cumplen con las normativas			Armónico 15, 21 y 27 fuera de los límites establecidos			Armónico 6 fuera de los límites establecidos			N/D		N/D	
Distorsión armónica total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Frecuencia	99,80%			100%			100%			N/D		N/D	

Tabla 4.3: Resumen de resultados - Normativa europea

Resumen de resultados - Normativa europea													
Perturbación	Universidad Politécnica Salesiana			Universidad del Azuay			Universidad de Cuenca			Caso residencial 1		Caso residencial 2	
	12,65 kW			69,00 kW			15 kW			2,00 kW		1,34 kW	
Potencia	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
Fase	99,85%	99,85%	100%	99,80%	99,90%	99,90%	99,70%	99,70%	99,80%	95,04%	97,42%	99,60%	99,60%
Nivel de tensión	99,80%			99,70%			100%			82,94%		100%	
Desequilibrio de tensión	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	
Desequilibrio de corriente	N/L			N/L			N/L			N/L		N/L	
Flicker	99,41%	99,56%	99,41%	99,60%	99,60%	99,80%	99,50%	99,50%	99,80%	90,48%	88,49%	99,70%	99,70%
Distorsión armónica individual	Todos cumplen con las normativas			Armónico 15, 21 y 27 fuera de los límites establecidos			Armónico 6 fuera de los límites establecidos			N/D		N/D	
Distorsión armónica total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Frecuencia	100%			100%			100%			N/D		N/D	

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

En los resultados del trabajo se pudo apreciar que el nivel de voltaje, corriente, desequilibrios, flicker, armónicos y frecuencia son indicadores que permiten evaluar la calidad de energía de un sistema eléctrico. Esto coincide con los trabajos realizados en [17] y [19] en los que los sistemas son evaluados únicamente con la normativa ecuatoriana.

En [1], la evaluación determinó variaciones de tensión dentro de los límites establecidos en [2] y [3]. La variación de corriente está fuera de lo establecido en la normativa, debido a una variación en el tercer armónico. Los resultados del presente trabajo también poseen un incumplimiento en el parámetro debido a que se determinaron incrementos en los armónicos 15, 21 y 27 respecto a los límites establecidos en [4] y [24].

En [5], la evaluación de los armónicos y el análisis de calidad de energía obtuvo un incumplimiento de valores en las componentes armónicas individuales pares a excepción del armónico 34, para los sistemas evaluados en este trabajo mediante las normas [2], [4], [9], [26] y [27]. El caso III, es el sistema que presentó este tipo de variaciones, el armónico par 6 incumple con los valores establecidos en las regulaciones. Para el caso III y [5] este efecto es producido por algunas cargas no lineales que se encuentran conectadas al sistema.

En [11], se obtuvo variaciones en los niveles de tensión entre 4% y 9% cuando el sistema fotovoltaico se encontraba conectado a la red de energía eléctrica. En los sistemas fotovoltaicos evaluados se evidencia variaciones en la tensión de hasta 5,01% para el caso I, 4,60% para el caso II, 4,17% para el caso III, 11,55% para el caso IV y 1,33% para el caso V. El caso IV, posee elevaciones de tensión significativas. Con el fin de reducir estas variaciones de tensión del sistema y en [11], se recomienda

limitar las cargas evitando así superar lo generado por los sistemas fotovoltaicos instalados.

Los resultados obtenidos en [19] y los de este trabajo, presentan un cumplimiento general de la normativa ecuatoriana, americana y europea superior al 95% necesario en los parámetros de nivel de tensión, nivel de corriente, frecuencia, distorsión armónica individual y total. Presentándose incumplimientos en los parámetros de desequilibrios de tensión y flicker para el caso IV, así como un incumplimiento del indicador de desequilibrios de corriente en el 80% de los sistemas evaluados en este trabajo, es decir, únicamente el caso III está dentro de los límites establecidos en cada normativa para este parámetro.

La evaluación de calidad de energía eléctrica realizada en [17] y en el presente trabajo, determinaron desequilibrios de tensión por debajo de los límites establecidos en las normativas. A excepción del caso IV, donde se evidencia que menos del 95% de la muestra incumple este parámetro. Sin embargo, como en estudios anteriores se identifica el incumplimiento en valores de desequilibrio de corriente para los sistemas evaluados y en [17]. Esto debido a los desbalances presentes en los puntos de baja tensión en nuestro país. Los indicadores restantes se encuentran dentro de los límites establecidos, corresponden cumplimientos superiores al 95% de las muestras evaluadas.

Los resultados presentan pequeñas variaciones entre las normativas estudiadas. Sin embargo, existen parámetros que no son analizados en la regulación ecuatoriana como la distorsión armónica individual y la frecuencia. El estudio de los armónicos individuales pueden ser de gran ayuda al momento de detectar sobrecalentamientos en los equipos eléctricos. Con respecto a la frecuencia, si bien este parámetro siempre estuvo dentro de los límites establecidos, su análisis podría evitar fallas en máquinas eléctricas especialmente en industrias.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La calidad de energía de un sistema eléctrico se refiere al comportamiento durante el tiempo de las señales de voltaje y corriente. Se busca establecer si el sistema eléctrico es confiable y seguro. Son varias las causas que producen que la calidad de energía sea deficiente, normalmente se debe a perturbaciones en la línea eléctrica, variaciones de voltaje, interrupciones del servicio y distorsiones armónicas.

Según las diferentes normativas estudiadas y analizadas se logra establecer que, el nivel de voltaje y corriente, desequilibrios de voltaje y corriente, flicker, distorsión armónica y frecuencia son los parámetros que más relevancia tienen en el análisis de calidad de energía en sistemas fotovoltaicos.

En este trabajo se realizó el análisis de cinco sistemas fotovoltaicos diferentes ubicados en la ciudad de Cuenca, las mediciones obtenidas de la Universidad Politécnica Salesiana y la Universidad del Azuay fueron realizadas por los autores. Las mediciones de la Universidad de Cuenca las realizaron el laboratorio de microrredes de la institución y las medidas de los sistemas residenciales a cargo de la empresa eléctrica Centrosur.

Al obtener las mediciones de diferentes fuentes se observa que existen diferentes equipos que realizan el registro de los datos. Sin embargo, se puede advertir que los parámetros de medición realizados por los autores y el laboratorio de microrredes de la Universidad de Cuenca son más completos que los registrados por la empresa eléctrica CENTROSUR.

Al realizar el análisis en cada sistema fotovoltaico estudiado se puede observar

el incumplimiento en los desequilibrios de corriente con respecto a las normativas ecuatoriana y americana. Este incumplimiento se debe a que en horas de baja o nula generación eléctrica el sistema se comporta como una carga inyectando corriente a la red de distribución.

Con referencia a los resultados alcanzados en el estudio del caso IV, se observa que existen incumplimientos en la mayoría de los parámetros estudiados. Los mismos que, sugieren una baja eficacia en los equipos eléctricos conectados en la vivienda que reducen la calidad de energía.

Debido a la similitud que existe entre los límites de las normativas ecuatoriana, americana y europea, no se presentan grandes diferencias entre los resultados al ser analizados por cada normativa. Sin embargo, no existe un consenso en los parámetros que deben ser estudiados para determinar la calidad de energía eléctrica de un sistema fotovoltaico.

El estudio de la calidad de energía determina el cumplimiento de los límites establecidos para los casos I, II, III y V, a excepción de los desequilibrios de corriente. Sin embargo, el caso IV presenta incumplimientos en mediciones de voltaje, desequilibrios de tensión, corriente y flicker, es decir el sistema incumple con el 80% de parámetros en los que fue evaluado. Problemas que pueden ser resueltos mediante la evaluación de las cargas conectadas en el sistema.

6.2 Recomendaciones

Actualizar la normativa de calidad de energía ecuatoriana definiendo y delimitando la distorsión armónica individual, debido a que con este análisis se puede detectar sobrecargas en la red eléctrica que pueden acortar la vida útil de equipos eléctricos y de los conductores.

Realizar estudios de la distorsión armónica individual de los sistemas eléctricos para elaborar métodos de reducción de estos armónicos, esto debido al incremento de equipos electrónicos y cargas no lineales conectados a la red.

Establecer una normativa de calidad de energía eléctrica específica para sistemas fotovoltaicos, debido al incremento de generación de energía fotovoltaica en el país.

Redactar una regulación para definir la conexión o desconexión del sistema fotovoltaico de la red teniendo en cuenta factores ambientales y así minimizar el impacto de los desequilibrios de corriente que son debido a los momentos que no existe generación de energía por parte del sistema fotovoltaico comportándose éste como carga.

Realizar un correcto balance de cargas en cada fase del sistema, para así poder reducir los desequilibrios de voltaje y corriente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Adbullah. *Power Quality Analysis at Murdoch University*. thesis, Murdoch University School of Engineering and Information Technology, July 2018.
- [2] International Electrotechnical Commission (IEC). Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. 2002.
- [3] National Electric Manufacturers Association (NEMA). Performance Measurements and Quality Control Guidelines for Non-Imaging Intraoperative Gamma Probes. 2004.
- [4] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pages 1–29, June 2014.
- [5] A.R. Oliva and J.C. Balda. A PV dispersed generator: a power quality analysis within the IEEE 519. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2):525–530, April 2003.
- [6] M. Halpin. Overview of revisions to IEEE standard 519-1992. In *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003. CIGRE/PES 2003*. IEEE, 2003.
- [7] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, pages 1–138, 2018.
- [8] R. Tonkoski, D. Turcotte, and T. EL-Fouly. Impact of High PV Penetration on Voltage Profiles in Residential Neighborhoods. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3:518–527, July 2012.

- [9] International Electrotechnical Commission (IEC). Environment - Compatibility Levels in Industrial Plants for low-frequency Conducted Disturbances. 2002.
- [10] Y. Kolomiets, Y. Menshikov, and A. Tarasenko. Influence of Insulation Level on Electric Power Quality and Transformation Efficiency of Grid-Connected Photovoltaic Power Plants. 54:18–23, 2018.
- [11] A. Sharma, M. Kolhe, A. Kontou, D. Lagos, and P. Kotsampopoulos. Solar photovoltaic-based microgrid hosting capacity evaluation in electrical energy distribution network with voltage quality analysis. *SN Applied Sciences*, 3, apr 2021.
- [12] J. Marroquín. Estudio de calidad de energía y eficiencia energética en el edificio del Ministerio de Relaciones Exteriores, zona 10, Guatemala. 2020.
- [13] B. Singh and S. Goel. Adaptive Harmonic Detection Control of Grid Interfaced Solar Photovoltaic Energy System with Power Quality Improvement. *Journal of The Institution of Engineers (India)*, 96:37–45, jul 2014.
- [14] I. Mahendrarvarman, S. A. Elankurisil, M. Venkateshkumar, A. Ragavendiran, and N. Chin. Artificial intelligent controller-based power quality improvement for microgrid integration of photovoltaic system using new cascade multilevel inverter. *Soft Computing*, June 2020.
- [15] Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL). Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica. 2018.
- [16] M. Lata and A. Sánchez. *Análisis de calidad de energía eléctrica de un sistema hospitalario “básico de segundo nivel” suministrado por la red convencional y su mejora mediante energía solar fotovoltaica*. PhD thesis, Universidad de Cuenca, October 2020.
- [17] D. Domínguez and B. Salvatierra. *Análisis de Calidad de Energía Eléctrica en Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red*. PhD thesis, Universidad Politécnica Salesiana, July 2016.
- [18] Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL). Requerimientos técnicos para la conexión y operación de generadores renovables no convencionales a las redes de transmisión y distribución. 2015.
- [19] J. Arias and C. 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*. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, aug 2019.

- [20] R. Rodríguez. Análisis de la calidad de energía en el sistema eléctrico, utilizando equipo de medición de parámetros de sistemas fotovoltaicos. 2012.
- [21] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality - Redline. *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009) - Redline*, pages 1–180, 2019.
- [22] Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL). Generación fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica. 2018.
- [23] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). Marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica. 2021.
- [24] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica. 2020.
- [25] American National Standards Institute (ANSI). Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hz). 2020.
- [26] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems. *IEEE Std 1250-2018 (Revision of IEEE Std 1250-2011)*, 2018.
- [27] European Standard (EN). Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, year=2010*.

ANEXOS

ANEXO A

Caso I

Características de sistema: Universidad Politécnica Salesiana

- **Ubicación de medición:** Salida del transformador #19597P
- **Nivel de tensión:** 127/220 V
- **Topología de medición:** Trifásico
- **Equipo de monitoreo:** FLUKE 435
- **Período de medición:** Desde 18/01/2022 hasta 25/01/2022
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos fueron medidos por los autores con el equipo FLUKE 435 perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana.

Nivel de tensión

En la Tabla A.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla A.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla A.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,26 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				110,41 V	132,46 V
99,85 % Cumple	0,15 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 14:54	Fecha y hora 23-01-2022 07:54

Tabla A.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,26 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				110,41 V	132,46 V
99,85 % Cumple	0,15 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 14:54	Fecha y hora 23-01-2022 07:54

Se observa que, para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,15%. Para las tensiones máximas, toda la muestra está dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla A.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla A.4, se expone la evaluación de la muestra con las normativa americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla A.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,86 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				105,71 V	133,36 V
99,85 % Cumple	0,15 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 14:54	Fecha y hora 23-01-2022 07:54

Tabla A.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,86 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				105,71 V	133,36 V
99,85 % Cumple	0,15 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 14:54	Fecha y hora 23-01-2022 07:54

Se observa que, para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,15%. Para las tensiones máximas, toda la muestra está dentro de lo determinado por las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla A.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla A.6, se expone la evaluación de la muestra con las normativa americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla A.5: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,69 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				120,56 V	132,93 V
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 11:24	Fecha y hora 23-01-2022 08:14

Tabla A.6: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,69 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				120,56 V	132,93 V
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 11:24	Fecha y hora 23-01-2022 08:14

Se observa que para las tensiones mínimas y máximas, toda la muestra esta dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

En las Figuras A.1, A.2 y A.3, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.



Figura A.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores

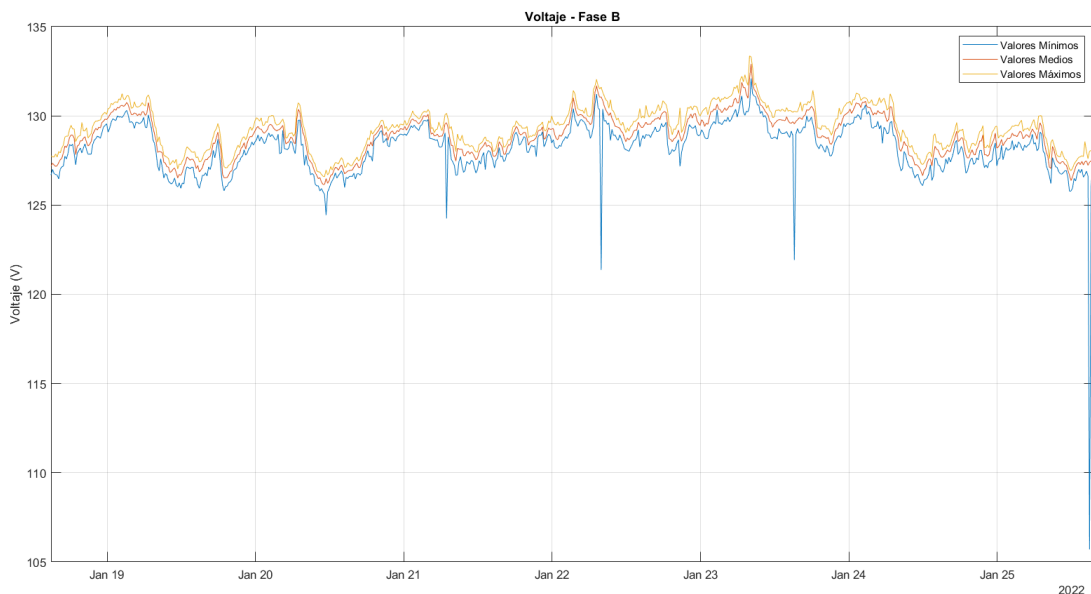


Figura A.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores

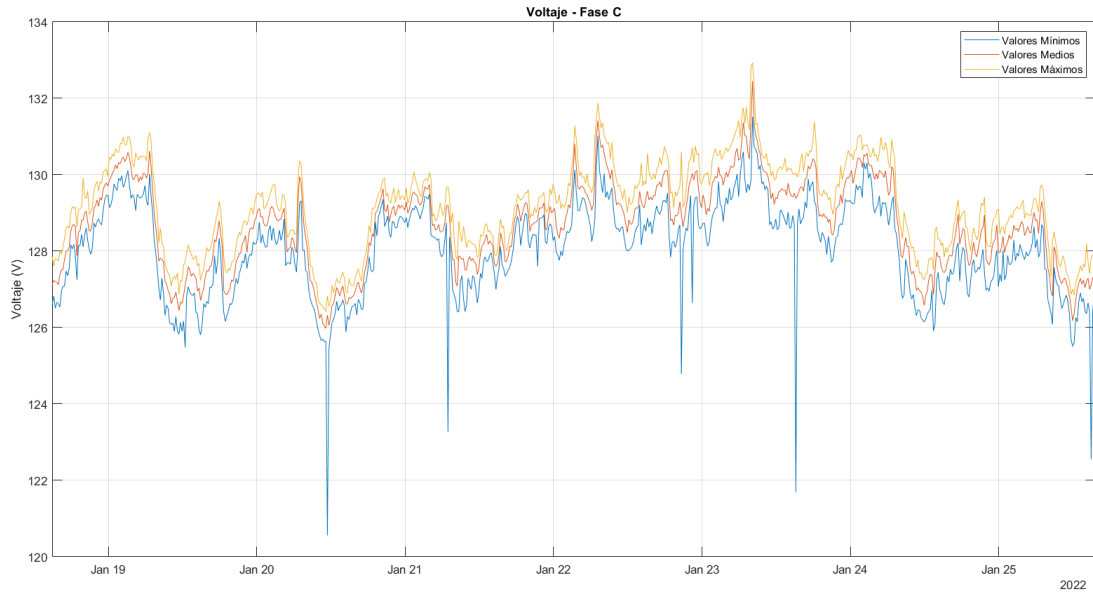


Figura A.3: Niveles de tensión - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase son similares, presentándose únicamente pequeñas diferencias en la fase C con respecto a las fases A y B.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla A.7, se presenta el resumen de mediciones y se evalúa con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla A.8, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en la normativa americana IEEE 1250.

Tabla A.7: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,27 \%$	
Muestras mayores al límite (2)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,02 %	9,12 %
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 07:54	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.8: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,27 \%$	
Muestras mayores al límite (2)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,02 %	9,12 %
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 07:54	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,20% tanto en las normativas nacionales como internacionales.

En la Figura A.4, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

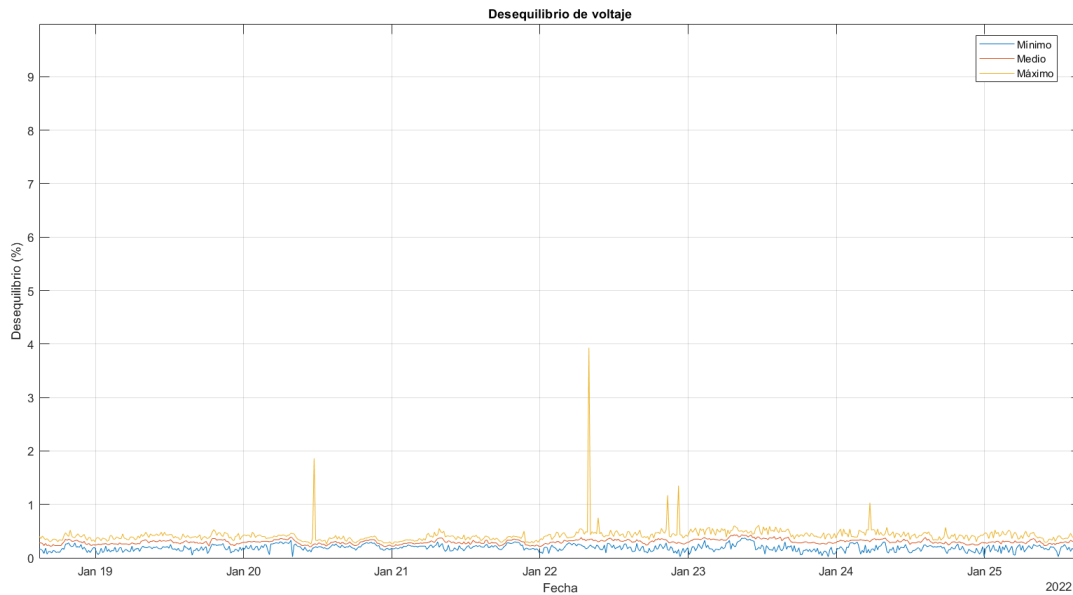


Figura A.4: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la similitud que existe entre los valores de tensión de cada fase, se concluye que, el desequilibrio de tensión se encuentra en un gran porcentaje dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas A.9, A.10 y A.11, se presenta el resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas durante la medición.

Tabla A.9: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 39,38 A	
Mínimo	Máximo
3 A	183 A
Fecha y hora 23-01-2022 07:54	Fecha y hora 19-01-2022 18:54

Tabla A.10: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 30,09 A	
Mínimo	Máximo
6 A	145 A
Fecha y hora 23-01-2022 08:24	Fecha y hora 20-01-2022 08:54

Tabla A.11: Niveles de corriente - Fase C

NIVELES DE CORRIENTE - FASE C	
Ipromedio = 33,49 A	
Mínimo	Máximo
3 A	154 A
Fecha y hora 23-01-2022 08:24	Fecha y hora 24-01-2022 09:24

En las Figuras A.5, A.6 y A.7, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

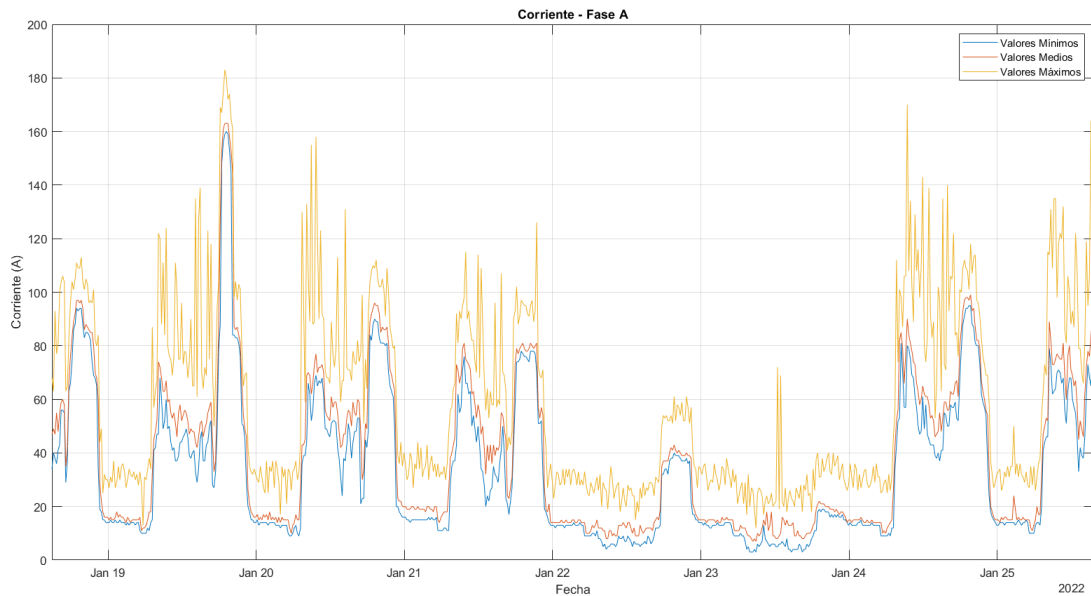


Figura A.5: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

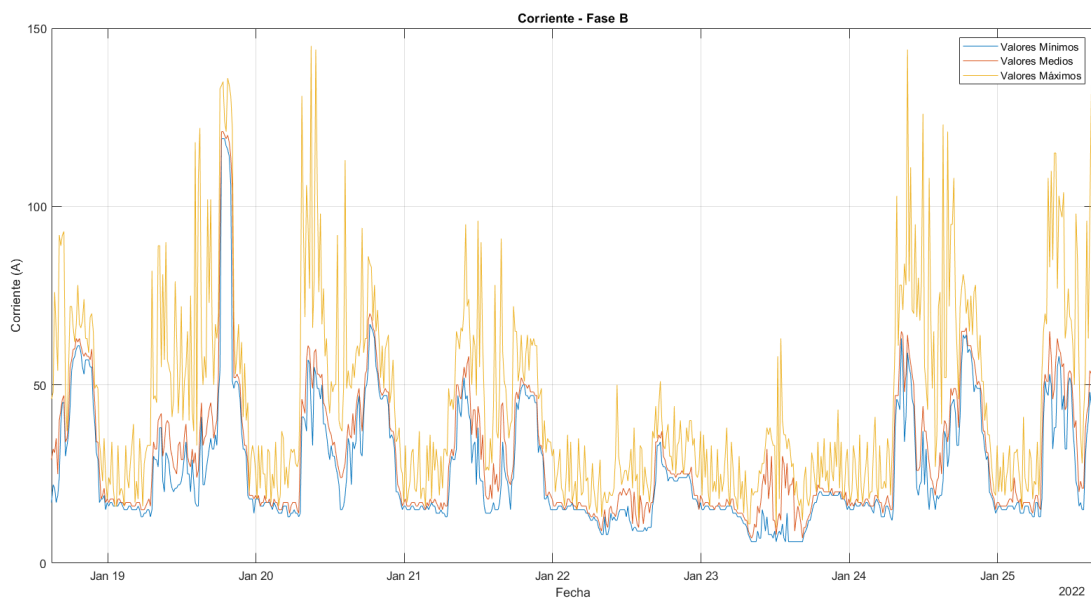


Figura A.6: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

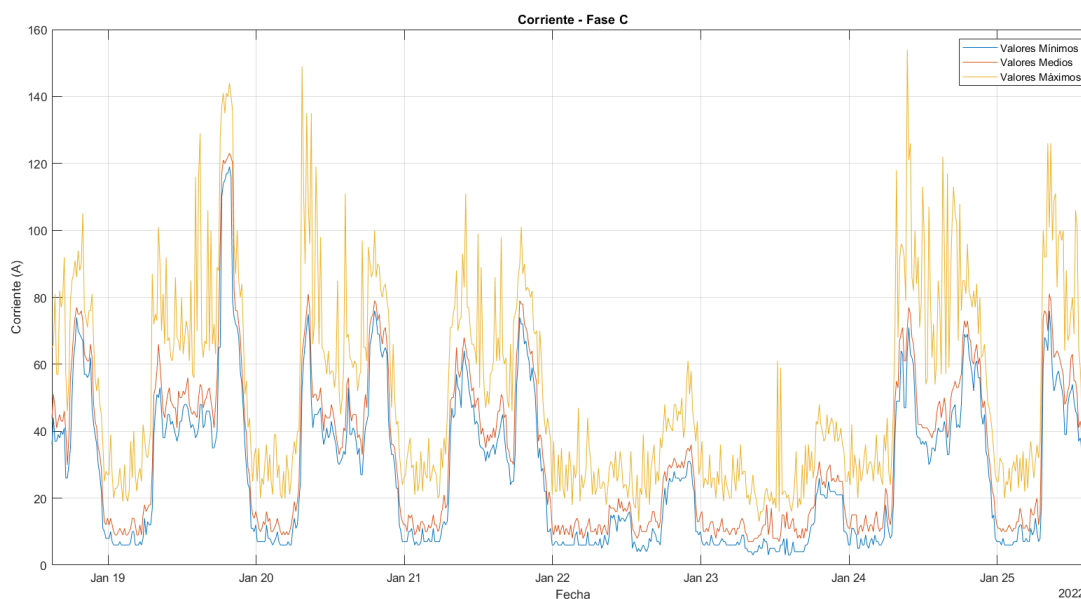


Figura A.7: Niveles de corriente - Fase C

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se puede observar varias diferencias entre las fases, además se puede evidenciar elevaciones de corriente a partir del medio día y parte de la noche. Por otra parte, en los días 22, 23 y las madrugadas los valores de corriente disminuyen significativamente.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla A.12, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla A.12: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 47,23 %	
Muestras mayores al límite (943)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,02 %	327,67 %
6,51 %	93,49 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	20-01-2022 18:14	22-01-2022 10:54

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos es de 93,49% tanto en las normativas nacionales e internacionales.

En la Figura A.8, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

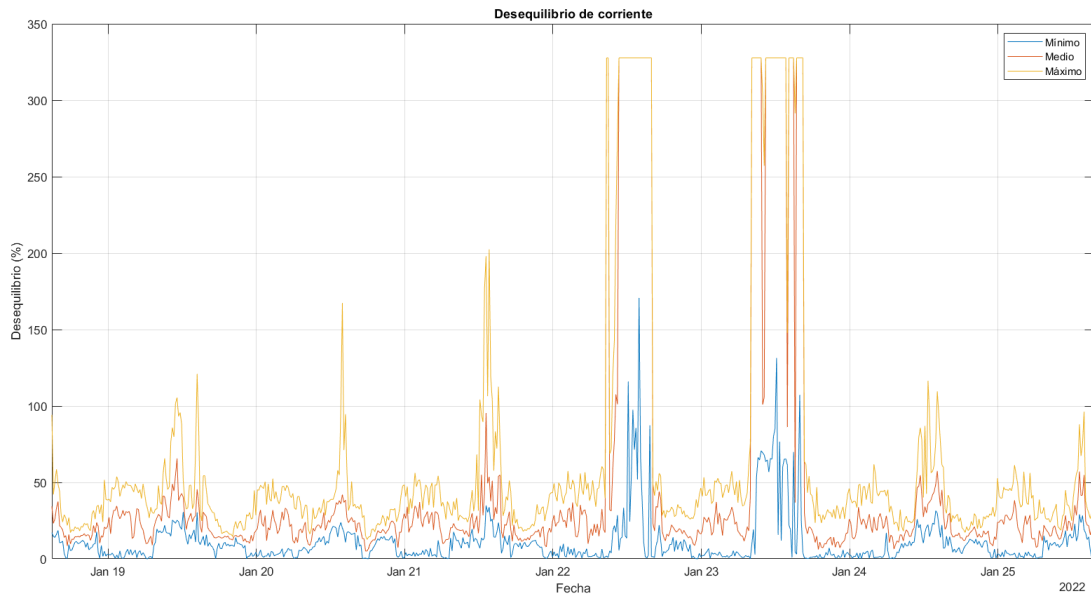


Figura A.8: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

Debido a la gran diferencia entre los valores de corriente registrados durante la medición, se muestra que los desequilibrios de corriente en su mayoría están fuera de los límites establecidos por cada normativa.

Los desbalances presentados en la Universidad Politécnica Salesiana se debe a las cargas utilizadas, es decir:

- Arranque de motores monofásicos y trifásicos produciendo incrementos de corriente
- Cortocircuitos producidos en los laboratorios de la universidad
- Desbalance de cargas en las fases
- El sistema fotovoltaico inyecta corriente al transformador debido a la falta de generación de energía

Flicker

En las Tablas A.13, A.14 y A.15, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Tabla A.13: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,23$ p.u	
≤ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,41 %	0,59 %	0,05 p.u	4,15 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 23-01-2022 10:54	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.14: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,24$ p.u	
≤ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,56 %	0,44 %	0,05 p.u	3,53 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 24-01-2022 19:14	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.15: Nivel de flicker - Fase C

FLICKER - FASE C			
Límite flicker		$P_{st} = 0,25$ p.u	
≤ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,41 %	0,59 %	0,05 p.u	1,54 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 20-01-2022 05:54	Fecha y hora 23-01-2022 15:14

Se observa que en las fases A y C, las muestras que están fuera de los límites establecidos son únicamente 0,59%. Para la fase B, este valor corresponde a 0,44% tanto en la normativa nacional como internacional.

En las Figuras A.9, A.10 y A.11, se presenta el comportamiento de los flicker en cada una de las fases por medio de los valores registrados durante la medición.

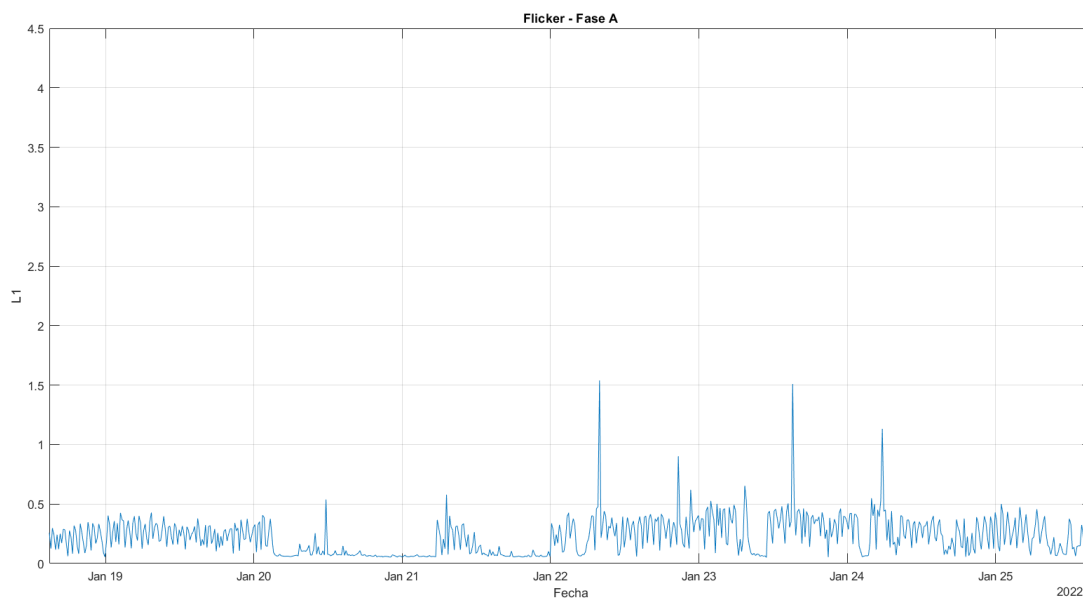


Figura A.9: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

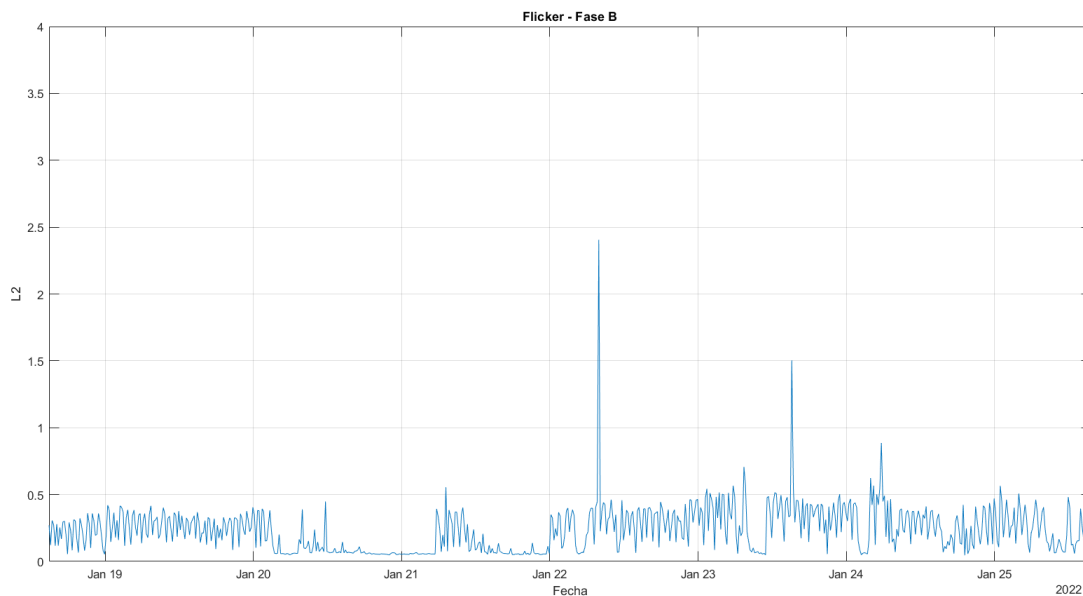


Figura A.10: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

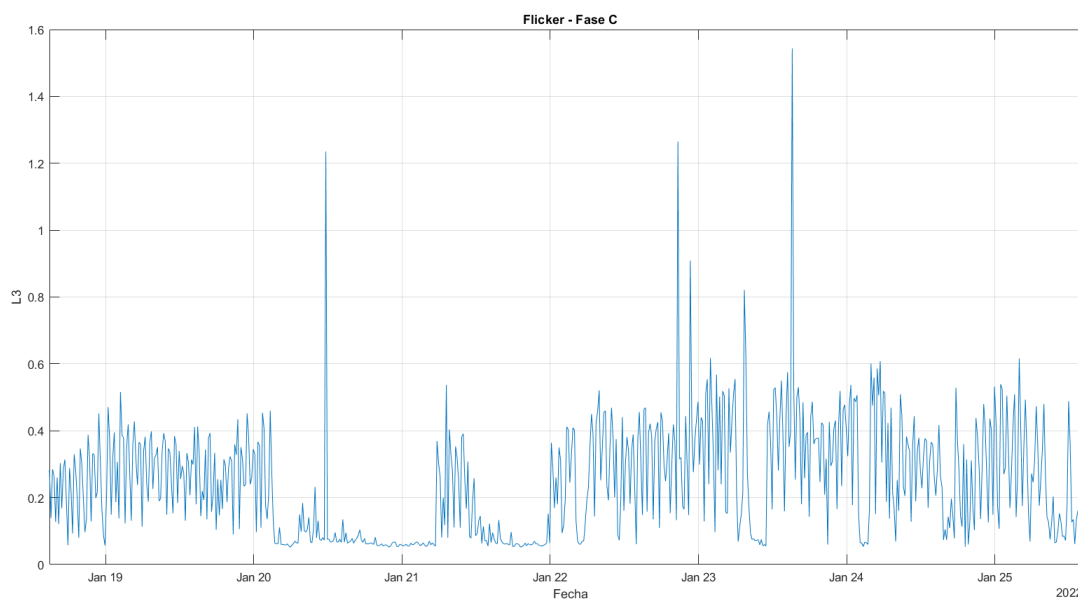


Figura A.11: Flicker - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que en la fase A se encuentra el flicker más alto registrado. Sin embargo, en la fase C existen mayores variaciones de este indicador.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, estas se presentan en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión armónica individual

En las Tablas A.16, A.17 y A.18, se presenta el resumen mediciones de las componentes armónicas individuales y se las compara con los límites establecidos en las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4.

Tabla A.16: Componentes armónicos pares de voltaje

Armónicos individuales de voltaje pares							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	EN 50160	IEC 61000 2-4	Máximo	Máximo	Máximo
2	2%		2%	5%	0,15	0,14	0,15
4	1%		1%	1,5%	0,07	0,07	0,07
6	0,5%		0,5%	0,4%	0,04	0,03	0,03
8	0,5%		0,5%	0,3%	0,02	0,02	0,02
10	0,5%		0,5%	0,25%	0,02	0,02	0,02
12	0,46%		0,5%	0,25%	0,01	0,02	0,02
14	0,43%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01
16	0,41%		0,5%	0,25%	0,02	0,01	0,01
18	0,39%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01
20	0,38%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01
22	0,36%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01
24	0,35%		0,5%	0,25%	0,01	0,01	0,01

Tabla A.17: Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3

Armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
5	6%			6%	2,41%	1,94	2,06
7	5%			5%	0,64	0,51	0,5
11	3,5%			3,5%	0,41	0,51	0,37
13	3%			3%	0,35	0,22	0,22
17	2%			2%	0,2	0,13	0,11
19	1,76%			1,5%	0,18	0,12	0,15
23	1,41%			1,5%	0,1	0,13	0,09
25	1,27%			1,5%	0,12	0,08	0,11

Tabla A.18: Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3

Armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3							
Orden	Límites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
3	5%	5%	5%	5%	0,93%	0,77%	0,85%
9	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	0,22%	0,2%	0,27%
15	0,4	0,4	0,4	0,5%	0,12%	0,13%	0,13%
21	0,3%	0,3%	0,3%	0,5%	0,09%	0,12%	0,11%

Se observa que todas las componentes armónicas individuales están dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura A.12, se presenta el comportamiento de los armónicos pares, en la Figura A.13, se presenta el comportamiento de los armónicos impares múltiplos de 3 y en la Figura A.14, se presenta el comportamiento de los armónicos impares no múltiplos de 3. Estos valores se muestran para cada fase y fueron registrados durante la medición.

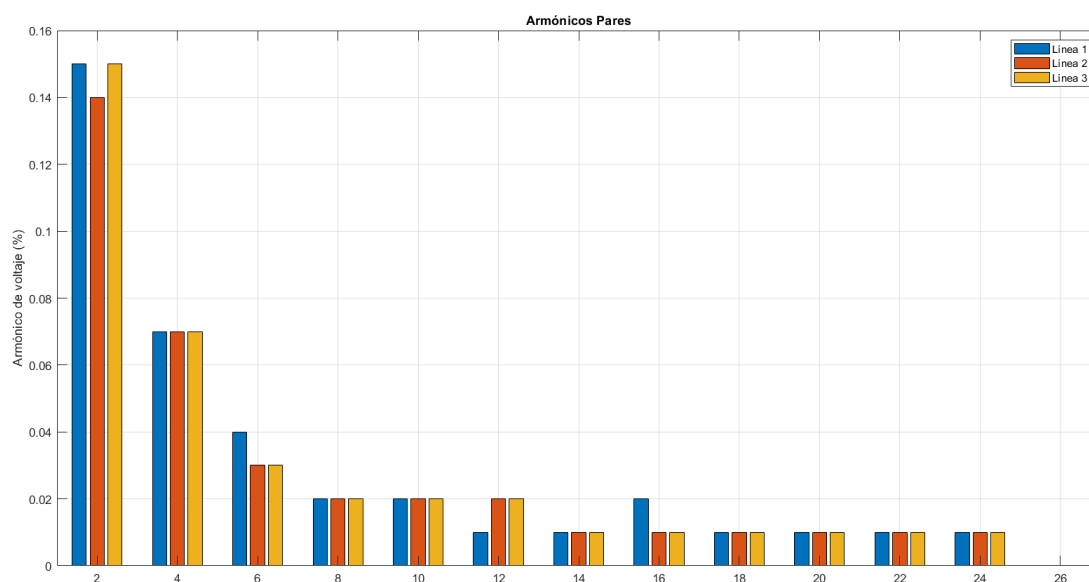


Figura A.12: Armónicos pares

Fuente: Autores

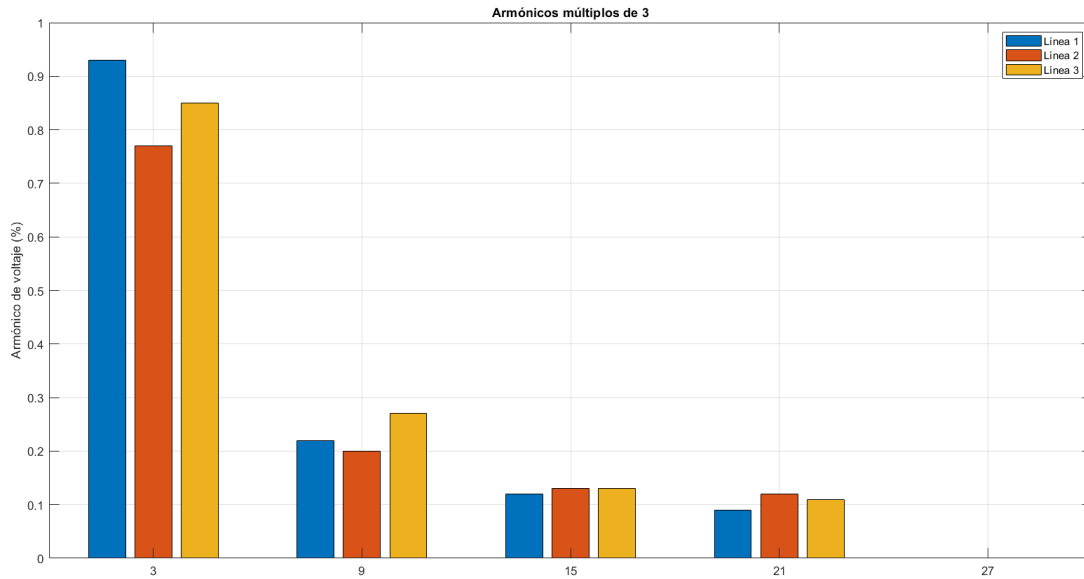


Figura A.13: Armónicos impares múltiplos de 3

Fuente: Autores

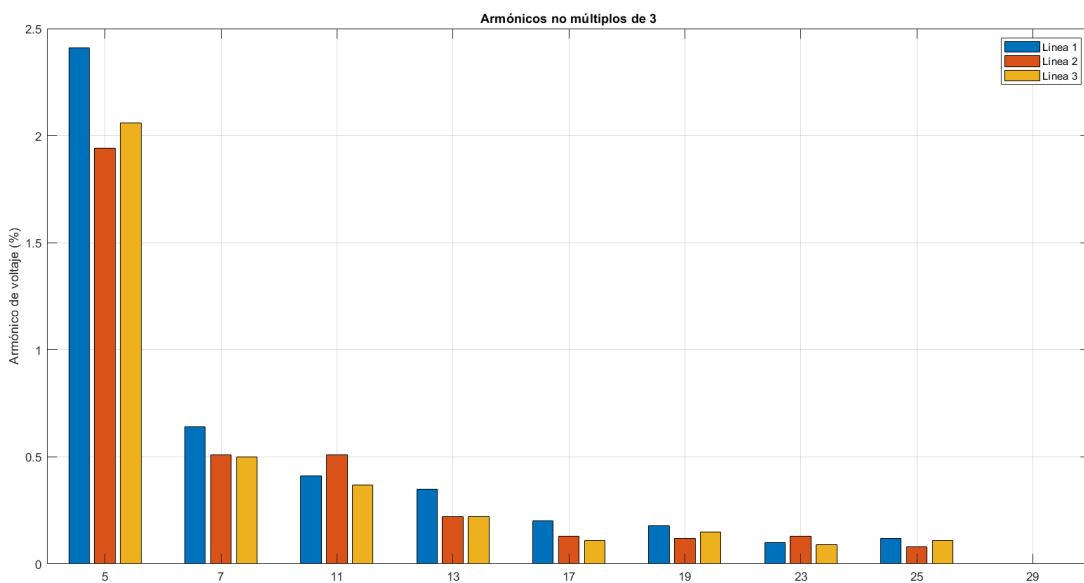


Figura A.14: Armónicos impares

Fuente: Autores

Se observa que los valores de las componentes armónicas individuales se encuentran dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

Distorsión Armónica Total

En las Tablas A.19, A.20 y A.21, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 519 y europea EN50160.

Tabla A.19: Distorsión armónica total - Fase A

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,56%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,66 %	3,45 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 03:54	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.20: Distorsión armónica total - Fase B

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,34%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,61%	3,43%
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 23-01-2022 07:24	Fecha y hora 25-01-2022 14:54

Tabla A.21: Distorsión armónica total - Fase C

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE C			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,29%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,45 %	2,49 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 25-01-2022 02:14	Fecha y hora 25-01-2022 14:14

Se observa que todas las muestras evaluadas cumplen con los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura A.15, se presenta la distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

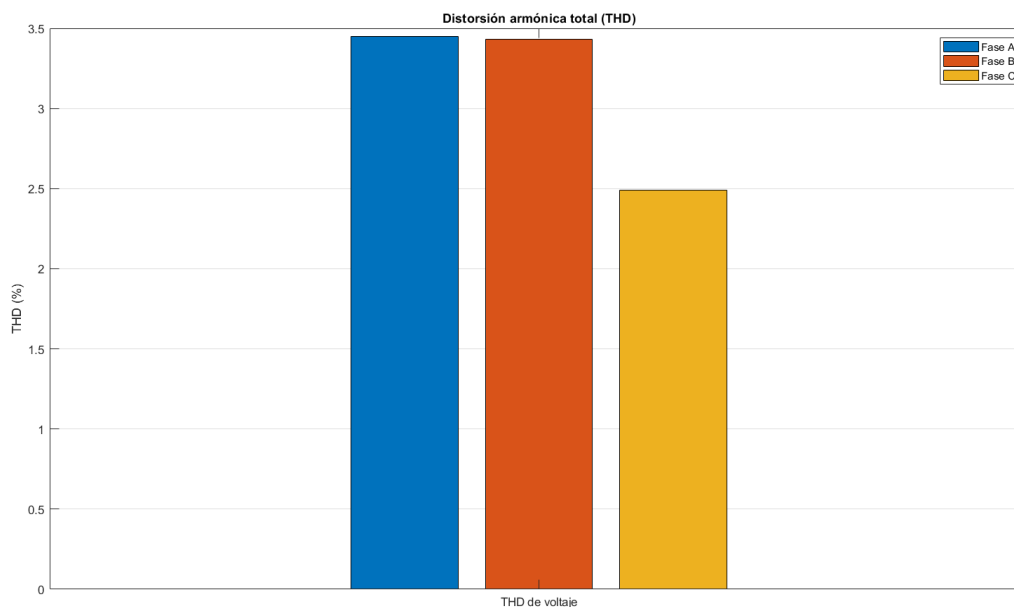


Figura A.15: Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales presentes en cada fase no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

En la Tabla A.22, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas europeas EN50160, IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-2. En la Tabla A.23, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa americana IEEE 1250.

Tabla A.22: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia (± 1 Hz)				Frecuencia = 60 Hz	
-1 Hz	59 Hz	+1 Hz	61 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,82 Hz	60,12 Hz
100 % Cumple	0,00 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 18-01-2022 14:54	Fecha y hora 18-01-2022 15:14

Tabla A.23: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia ($\pm 0,5$ Hz)				Frecuencia = 60 Hz	
-1 Hz	59,5 Hz	+1 Hz	60,5 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,82 Hz	60,12 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 18-01-2022 14:54	Fecha y hora 18-01-2022 15:14

Se observa que todas las muestras evaluadas cumplen con los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura A.16, se presenta el comportamiento de la frecuencia por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

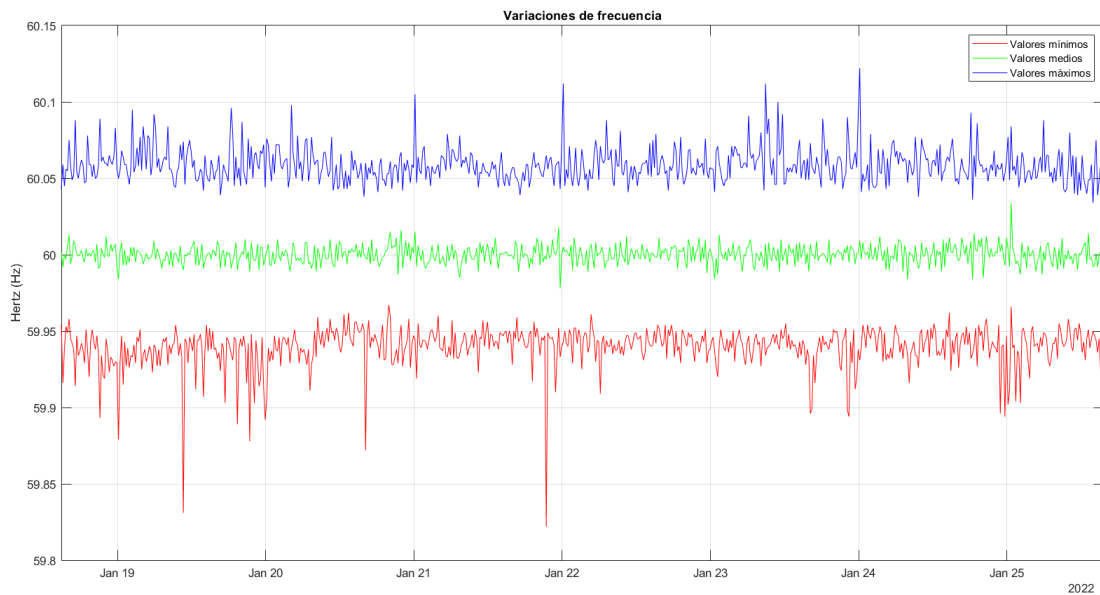


Figura A.16: Niveles de Frecuencia

Fuente: Autores

Se observa que los valores de frecuencia cumplen con los límites establecidos por las normativas internacionales.

ANEXO B

Caso II

Características de sistema: Universidad del Azuay

- **Ubicación de medición:** Tablero de generación de CA fotovoltaica
- **Nivel de tensión:** 127/220 V
- **Topología de medición:** Trifásico
- **Equipo de monitoreo:** FLUKE 435
- **Período de medición:** Desde 27/04/2022 hasta 04/05/2022
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos fueron medidos por los autores con el equipo FLUKE 435 perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana.

Nivel de tensión

En la Tabla B.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla B.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla B.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,80 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				96,76 V	132,36 V
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 06:18	Fecha y hora 02-05-2022 03:38

Tabla B.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,80 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				96,76 V	132,36 V
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 06:18	Fecha y hora 02-05-2022 03:38

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,20%. Para las tensiones máximas, todas las muestras cumplen con las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla B.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla B.4, se expone la evaluación de la muestra con las normativas IEEE 1250, EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla B.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,99 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				99,74 V	132,60 V
99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:48	Fecha y hora 01-05-2022 06:48

Tabla B.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,99 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				99,74 V	132,60 V
99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:48	Fecha y hora 01-05-2022 06:48

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,10%. Para las tensiones máximas, toda la muestra cumple con las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla B.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla B.6, se expone la evaluación de la muestra con las normativas IEEE 1250, EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla B.5: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 129,83 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				107,04 V	132,84 V
99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:48	Fecha y hora 01-05-2022 06:38

Tabla B.6: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 129,83 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				107,04 V	132,84 V
99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:48	Fecha y hora 01-05-2022 06:38

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,10%. Para las tensiones máximas, toda la muestra cumple con las normativas nacionales e internacionales.

En las Figuras B.1, B.2 y B.3, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

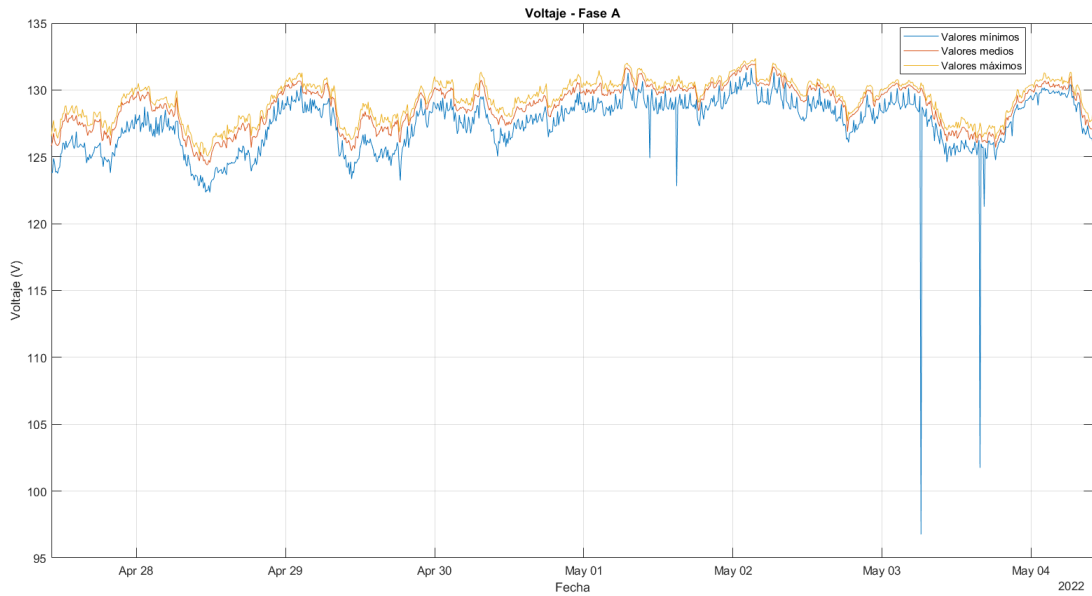


Figura B.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores

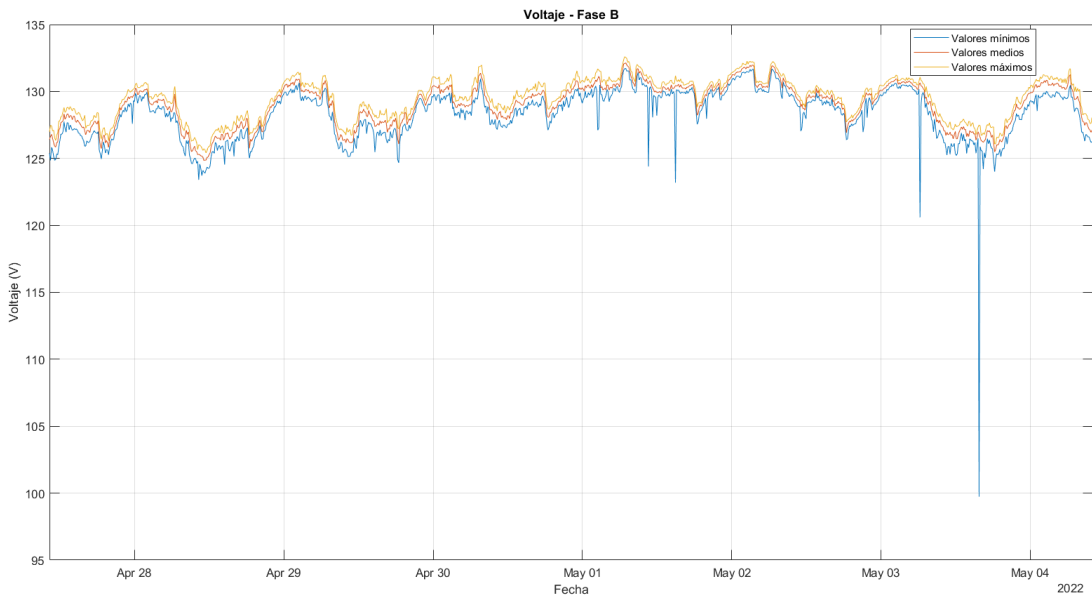


Figura B.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores



Figura B.3: Niveles de tensión - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase son similares, presentándose únicamente pequeñas diferencias entre cada una de las fases.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla B.7, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla B.8, se presenta el resumen de mediciones y se los evalúa con la normativa americana IEEE 1250.

Tabla B.7: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,42 \%$	
Muestras mayores al límite (3)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,00 %	14,46 %
99,70 %	0,30 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	28-04-2022 05:48	03-05-2022 06:18

Tabla B.8: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,42 \%$	
Muestras mayores al límite (3)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,00 %	14,46 %
99,70 % Cumple	0,30 % No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:48	Fecha y hora 03-05-2022 06:18

Se observa que las muestras que están fuera de los límites establecidos son únicamente 0,30% tanto en las normativas nacionales como internacionales.

En la Figura B.4, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

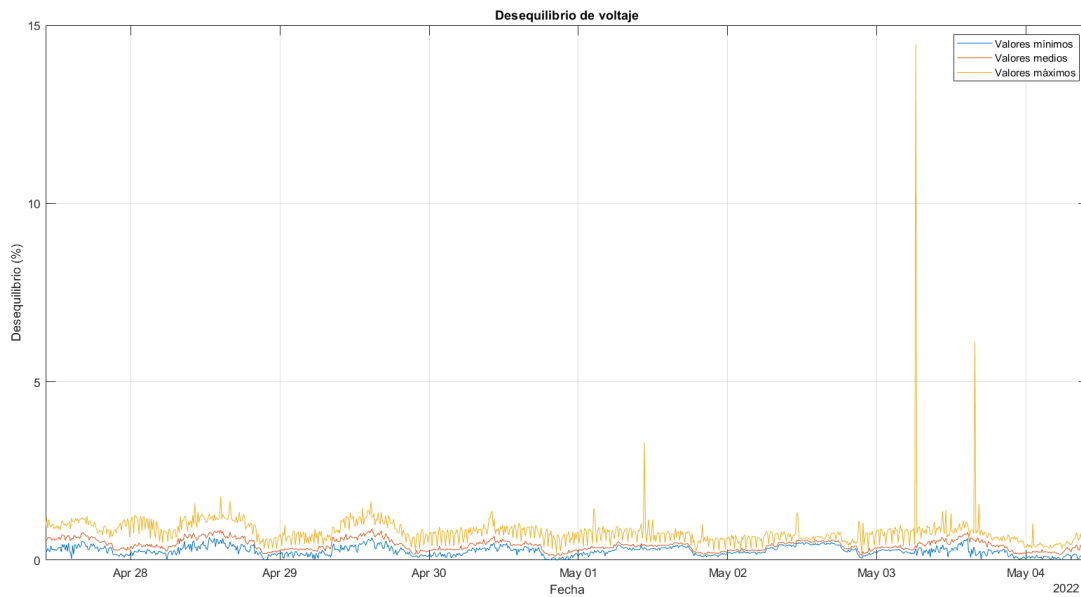


Figura B.4: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la similitud que existe entre los valores de tensión de cada fase, se observa que el desequilibrio de tensión se encuentra en su mayoría dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas B.9, B.10 y B.11, se presenta el resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas durante la medición.

Tabla B.9: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 102,49 A	
Mínimo	Máximo
13 A	351 A
Fecha y hora 01-05-2022 08:58	Fecha y hora 28-04-2022 15:58

Tabla B.10: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 84,58 A	
Mínimo	Máximo
12 A	326 A
Fecha y hora 01-05-2022 07:18	Fecha y hora 03-05-2022 16:28

Tabla B.11: Niveles de corriente - Fase C

NIVELES DE CORRIENTE - FASE C	
Ipromedio = 77,76 A	
Mínimo	Máximo
11 A	316 A
Fecha y hora 30-04-2022 13:48	Fecha y hora 27-04-2022 17:08

En las Figuras B.5, B.6 y B.7, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

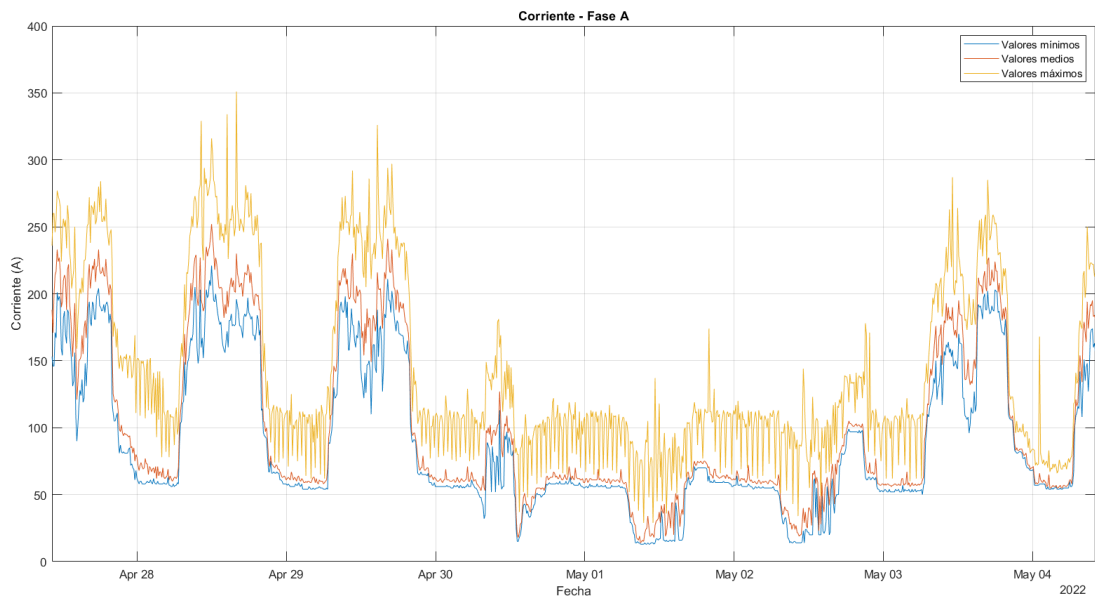


Figura B.5: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

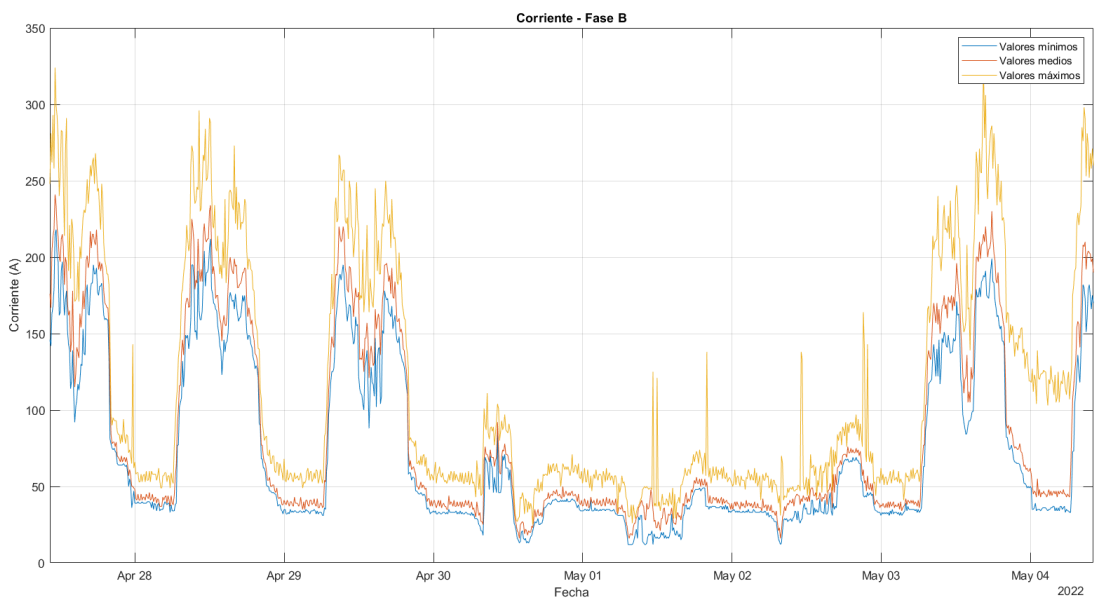


Figura B.6: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

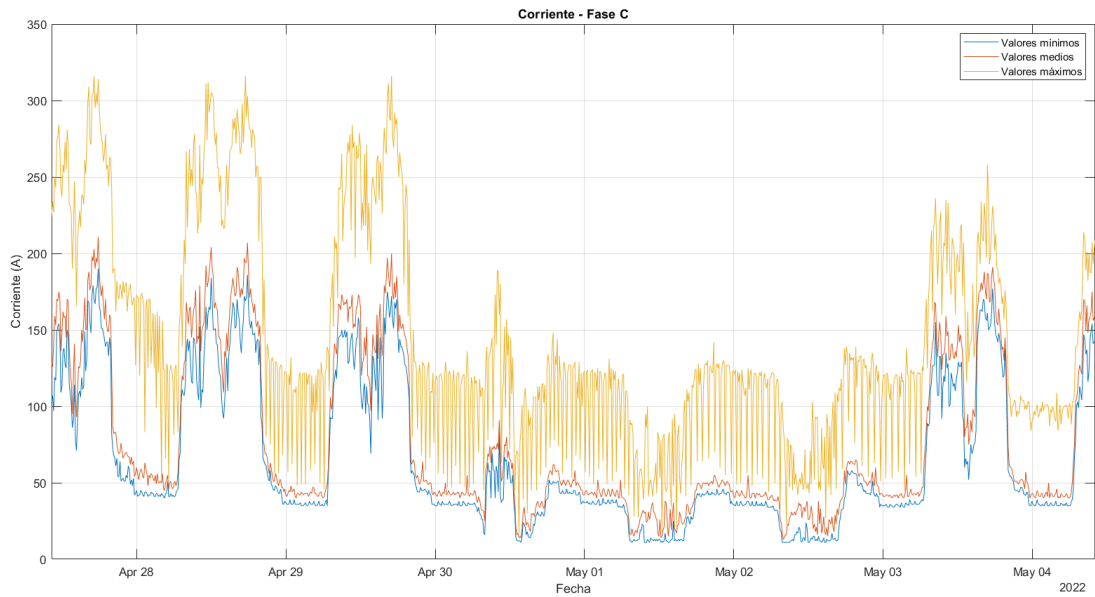


Figura B.7: Niveles de corriente - Fase C

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se observan diferencias entre las fases, además se evidencia elevaciones de corriente a partir del medio día y parte de la noche. También se presentan reducciones significativas de las corrientes desde la noche del 30 de abril hasta la noche del 2 de mayo.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla B.12, se presentan las mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla B.12: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 50,46 %	
Muestras mayores al límite (998)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,28 %	327,67 %
0,99 %	99,01 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	03-05-2022 16:58	30-04-2022 12:58

Se observa que las muestras que están fuera de los límites establecidos son el 99,01% tanto en las normativas nacionales como internacionales.

En la Figura B.8, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

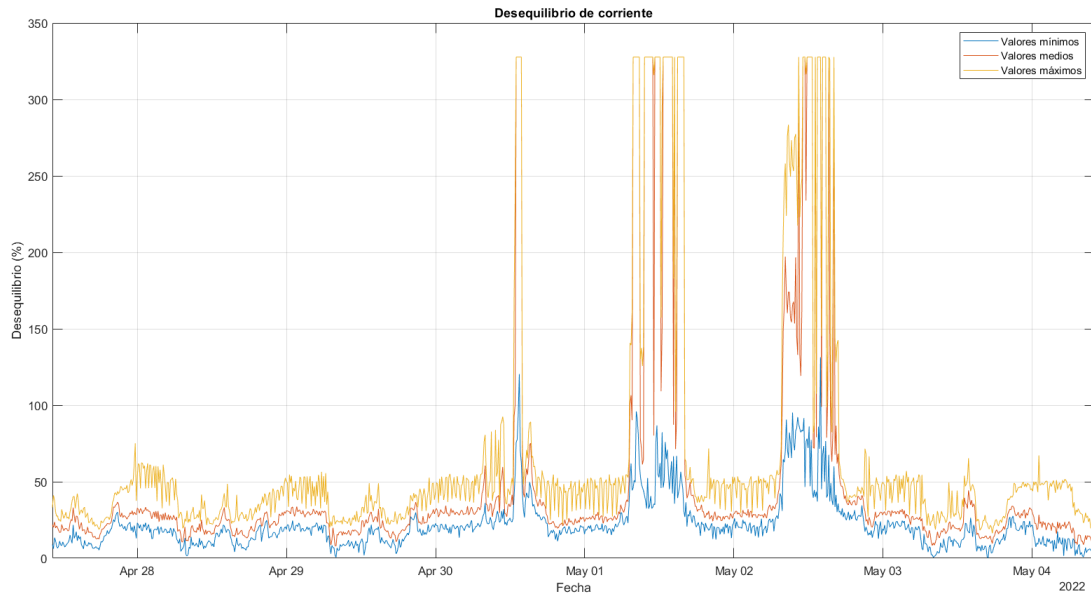


Figura B.8: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

Debido a la gran diferencia entre los valores de corriente registrados durante la medición, el desequilibrio de corriente se encuentra mayormente fuera de los límites establecidos por cada normativa.

Los desbalances presentados en la Universidad del Azuay se deben a las cargas utilizadas, es decir:

- Arranque de motores monofásicos y trifásicos produciendo incrementos de corriente
- Cortocircuitos producidos en los laboratorios de la universidad
- Desbalance de cargas en las fases
- El sistema fotovoltaico inyecta corriente al transformador debido a la falta de generación de energía

Flicker

En las Tablas B.13, B.14 y B.15, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Tabla B.13: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,33$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,60 %	0,40 %	0,05 p.u	3,49 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 21:48	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Tabla B.14: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,27$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,60 %	0,40 %	0,05 p.u	3,72 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 14:38	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Tabla B.15: Nivel de flicker - Fase C

FLICKER - FASE C			
Límite flicker		$P_{st} = 0,28$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,80 %	0,20 %	0,05 p.u	3,60 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 02-05-2022 02:58	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Se observa que en las fases A y B, las muestras fuera de los límites establecidos es de 0,40%. Para la fase C, este valor corresponde al 0,20% tanto en la normativa nacional como internacional.

En las Figuras B.9, B.10 y B.11, se presenta el comportamiento de los flicker en cada una de las fases por medio de los valores registrados durante la medición.

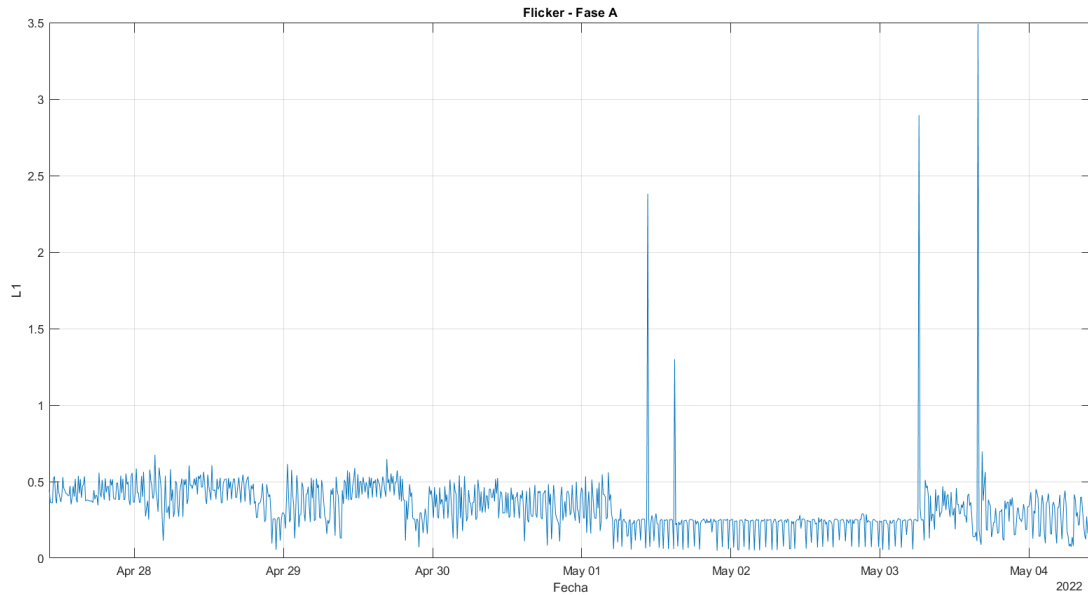


Figura B.9: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

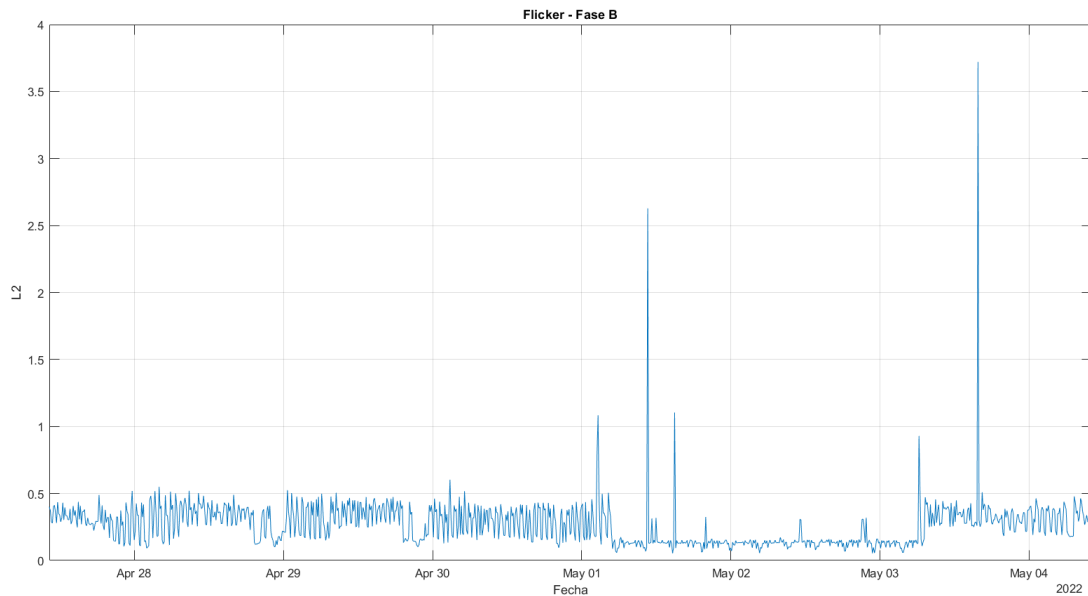


Figura B.10: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

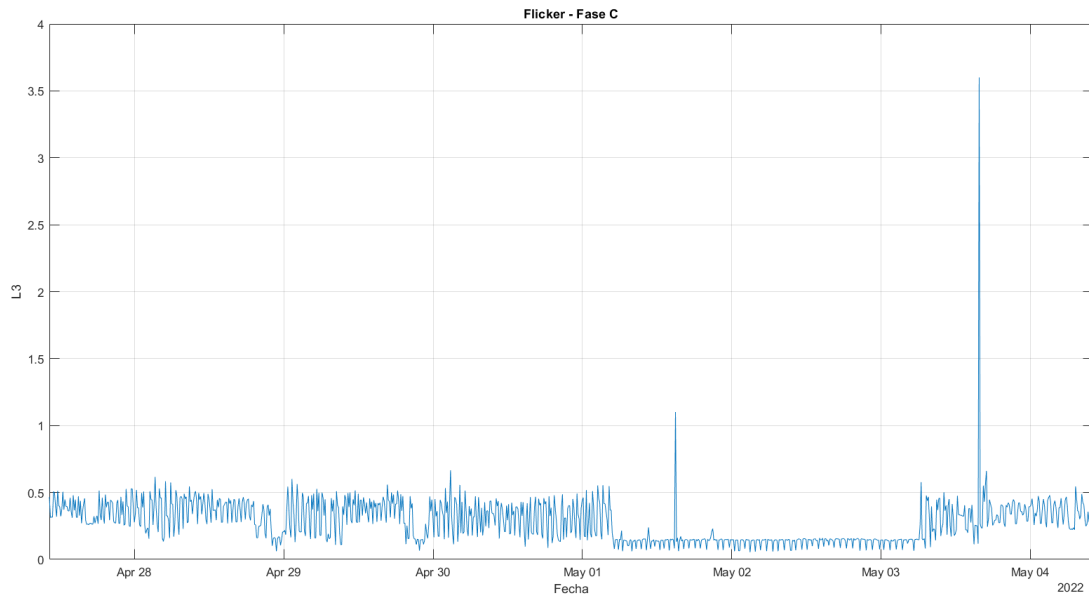


Figura B.11: Flicker - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que en la fase B se encuentra el flicker más alto registrado. En las tres fases existen grandes variaciones de este indicador.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, estas se encuentran tanto en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos son responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originando corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión Armónica Individual

En las Tablas B.16, B.17 y B.18, se presenta el resumen las componentes armónicas individuales y se las comparan con los límites establecidos en las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4.

Tabla B.16: Componentes armónicos pares de voltaje

Armónicos individuales de Voltaje Pares							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	EN 50160	IEC 61000 2-4	Máximo	Máximo	Máximo
2		2%	2%	5%	0,17%	0,18%	0,18%
4		1%	1%	1,5%	0,09%	0,08%	0,07%
6		0,5%	0,5%	0,4%	0,07%	0,05%	0,05%
8		0,5%	0,5%	0,3%	0,05%	0,04%	0,04%
10		0,5%	0,5%	0,25%	0,04%	0,03%	0,03%
12		0,46%	0,5%	0,25%	0,06%	0,03%	0,03%
14		0,43%	0,5%	0,25%	0,06%	0,03%	0,03%
16		0,41%	0,5%	0,25%	0,09	0,03%	0,03%
18		0,39%	0,5%	0,25%	0,11%	0,03%	0,04%
20		0,38%	0,5%	0,25%	0,12%	0,04%	0,04%
22		0,36%	0,5%	0,25%	0,13%	0,04%	0,04%
24		0,35%	0,5%	0,25%	0,15%	0,05%	0,04%
26		0,35%			0,15%	0,05%	0,05%
28		0,34%			0,13%	0,03%	0,05%
30		0,33%			0,1%	0,02%	0,05%
32		0,33%			0,1%	0,01%	0,03%
34		0,32%			0,09%	0,02%	0,03%
36		0,32%			0,07	0,02	0,03%
38		0,32%			0,07	0,01	0,02%
40		0,31%			0,07	0,01	0,02%
42		0,31%			0,05	0,01	0,02%
44		0,31%			0,05	0,01	0,02%
46		0,3%			0,04	0,02	0,02%
48		0,3%			0,03	0,01	0,01%
50		0,3%			0,03	0,01	0,01%

Tabla B.17: Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3

Armónicos individuales de Voltaje Impares no múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
5	6%			6%	1,37%	1,5%	1,44%
7	5%			5%	0,75%	0,63%	0,67%
11	3,5%			3,5%	0,96%	0,57%	0,84%
13	3%			3%	0,4%	0,61%	0,7%
17	2%			2%	0,41%	0,48%	0,52%
19	1,76%			1,5%	0,47%	0,28%	0,36%
23	1,41%			1,5%	0,46%	0,3%	0,24%
25	1,27%			1,5%	0,44%	0,21%	0,26%
29	1,06%				0,3%	0,14%	0,15%
31	0,97%				0,25%	0,15%	0,17%
35	0,83%				0,18%	0,09%	0,12%
37	0,77%				0,14%	0,06%	0,08%
41	0,67%				0,1%	0,04%	0,07%
43	0,63%				0,12%	0,06%	0,06%
47	0,55%				0,07%	0,04%	0,04%
49	0,52%				0,05%	0,04%	0,05%

Tabla B.18: Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3

Armónicos individuales de Voltaje Impares múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
3	5%		5%	5%	3,08%	3,17%	3,01%
9	1,5%		1,5%	1,5%	1,32%	1,05%	1,15%
15	0,4		0,4	0,5%	0,7%	0,44%	0,55%
21	0,3%		0,3%	0,5%	0,48%	0,35%	0,4%
27	0,2%		0,25%		0,33%	0,2%	0,20%
33	0,2%		0,25%		0,2%	0,07%	0,12%
39	0,2%		0,25%		0,11%	0,05%	0,07%
45	0,2%		0,25%		0,08%	0,04%	0,06%

Se observa que únicamente los armónicos 15, 21 y 27 no se encuentran dentro de los límites establecidos por las normativas internacionales.

En la Figura B.12, se presenta el comportamiento de los armónicos pares, en la Figura B.13, se presenta el comportamiento de los armónicos impares múltiplos de 3 y en la Figura B.14, se presenta el comportamiento de los armónicos impares no múltiplos de 3. Estos valores se muestran para cada fase y fueron registrados durante la medición.

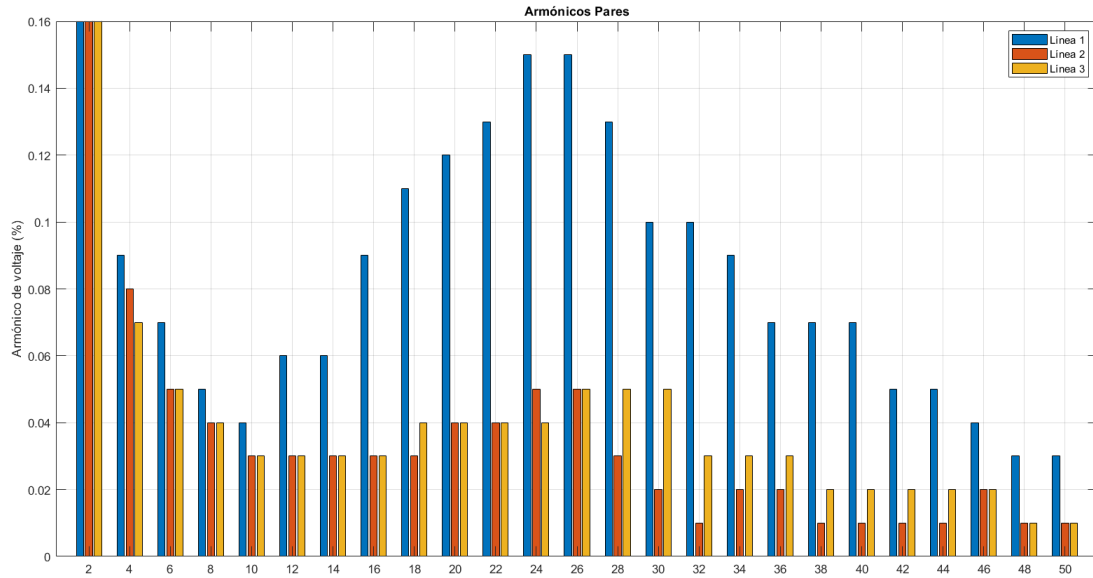


Figura B.12: Armónicos pares

Fuente: Autores

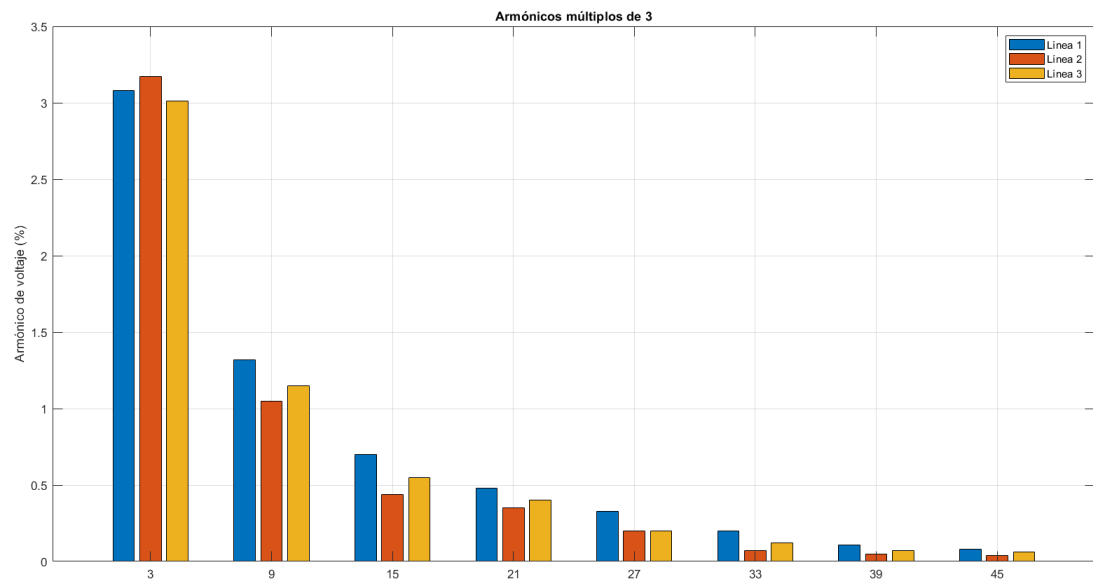


Figura B.13: Armónicos impares múltiplos de 3

Fuente: Autores

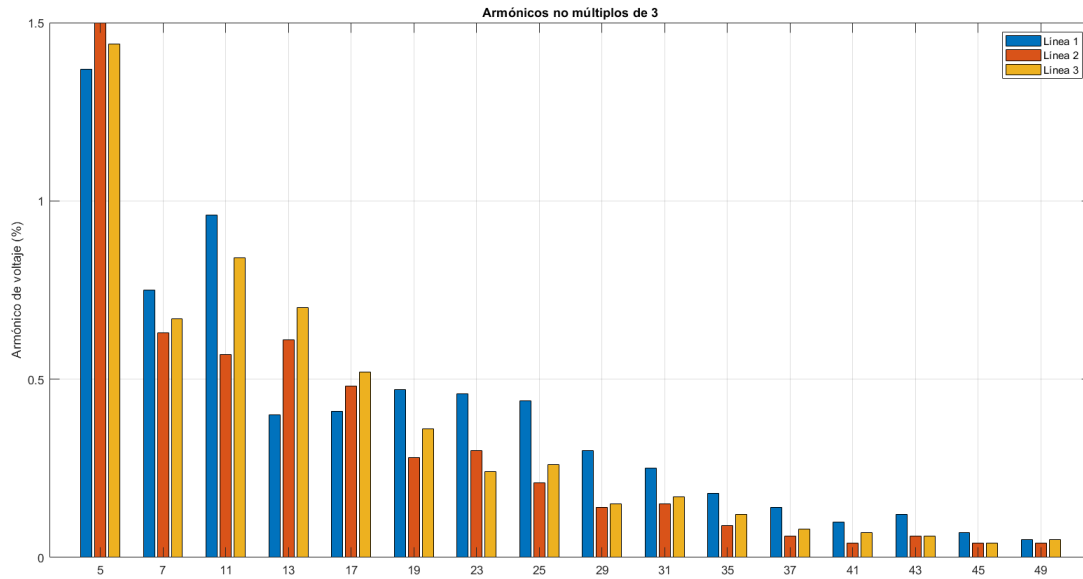


Figura B.14: Armónicos impares

Fuente: Autores

Se observa que las componentes armónicas de orden par e impar no múltiplos de 3 presentes en cada fase no exceden los límites establecidos. Sin embargo, las componentes armónicas 15, 21 y 27 exceden los valores establecidos por las normativas internacionales.

Distorsión Armónica Total

En las Tablas B.19, B.20 y B.21, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 519 y en la normativa europea EN50160.

Tabla B.19: Distorsión armónica total - Fase A

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THDv = 2,34%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,54 %	7,58 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 30-04-2022 13:08	Fecha y hora 03-05-2022 16:28

Tabla B.20: Distorsión armónica total - Fase B

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THDv = 2,06%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,16 %	4,39 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 30-04-2022 13:08	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Tabla B.21: Distorsión armónica total - Fase C

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE C			
Límite	Muestras mayores al límite	THDv = 2,34%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,15 %	4,68 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 30-04-2022 23:58	Fecha y hora 03-05-2022 15:48

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura B.15, se presenta la distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

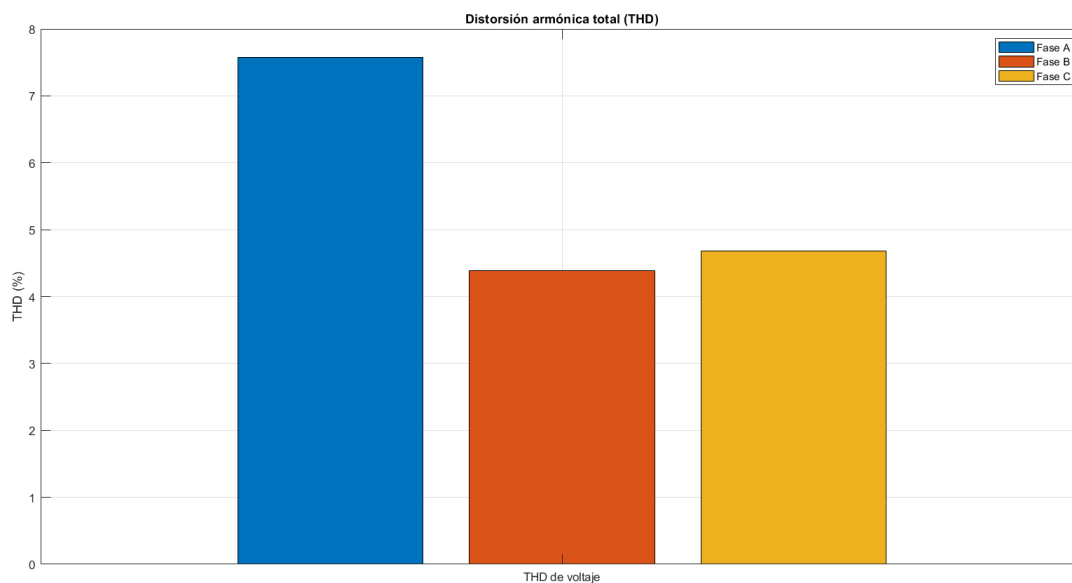


Figura B.15: Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales presentes en cada fase no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

En la Tabla B.22, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas europeas EN50160, IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-2. En la Tabla B.23, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa americana IEEE 1250.

Tabla B.22: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia (± 1 Hz)				Frecuencia = 60 Hz	
-1 Hz	59 Hz	+1 Hz	61 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,87 Hz	60,18 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 23:48	Fecha y hora 29-04-2022 23:58

Tabla B.23: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia ($\pm 0,5$ Hz)				Frecuencia = 60 Hz	
-1 Hz	59,50 Hz	+1 Hz	60,50 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,87 Hz	60,18 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 23:48	Fecha y hora 29-04-2022 23:58

Se observa que todas las muestras se encuentran dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura B.16, se presenta el comportamiento de la frecuencia por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

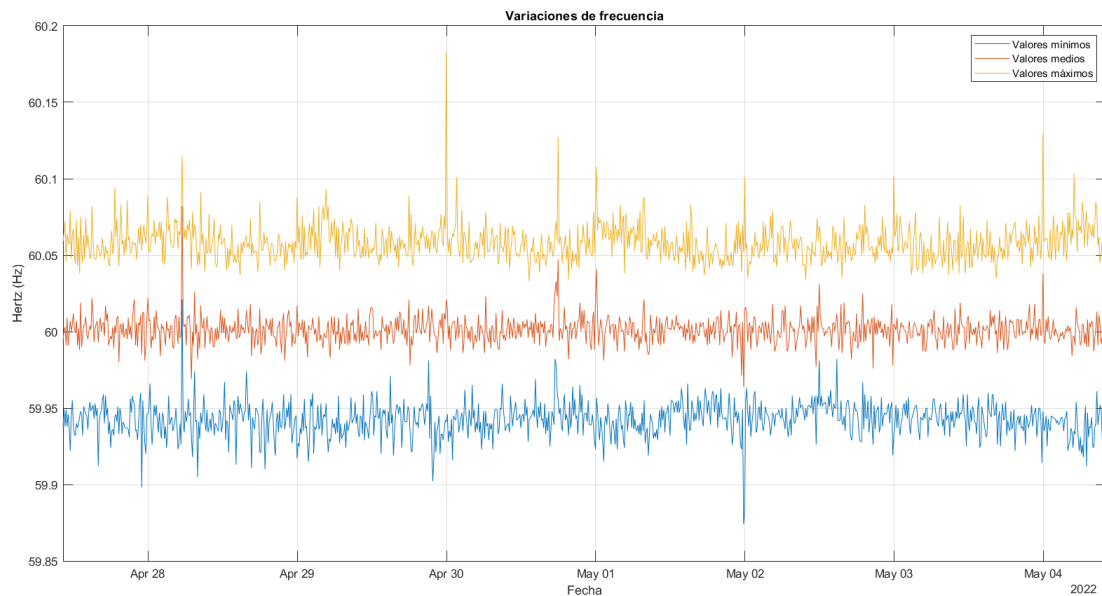


Figura B.16: Niveles de Frecuencia

Fuente: Autores

Se observa que los valores de frecuencia se encuentran dentro de los límites establecidos por las normativas internacionales en todo momento.

ANEXO C

Caso III

Características de sistema: Universidad de Cuenca

- **Ubicación de medición:** Tablero de generación de CA fotovoltaica
- **Nivel de tensión:** 127/220 V
- **Topología de medición:** Trifásico
- **Equipo de monitoreo:** AEMC 8336
- **Período de medición:** Desde 27/04/2022 hasta 4/05/2022
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos registrados fueron provistos por el Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca.

Nivel de tensión

En la Tabla C.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla C.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas IEEE 1250, EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla C.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 127,73 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				101,70 V	131,80 V
99,50 % Cumple	0,50 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:50	Fecha y hora 01-05-2022 08:40

Tabla C.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 127,73 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				101,70 V	131,80 V
99,70 % Cumple	0,30 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:50	Fecha y hora 01-05-2022 08:40

Se observa que para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana es de 0,50% y 0,30% al ser evaluadas con las regulaciones internacionales. Toda la muestra de tensiones máximas está dentro de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla C.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla C.4, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla C.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,14 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				102,60 V	132,30 V
99,30 % Cumple	0,70 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:450	Fecha y hora 01-05-2022 03:50

Tabla C.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128,14 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				102,60 V	132,30 V
99,70 % Cumple	0,30 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:450	Fecha y hora 01-05-2022 03:50

Se observa que para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana son es 0,70% y la internacional es de 0,30%. Para las tensiones máximas, toda la muestra esta dentro de lo determinado por la normativa nacional e internacional.

En la Tabla C.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla C.6, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla C.5: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 127,98 V	
- 8%	116,84	+ 8%	137,16	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				103,40 V	132,10 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:50	Fecha y hora 01-05-2022 08:40

Tabla C.6: Niveles de tensión - Fase C

NIVELES DE TENSIÓN - FASE C					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 127,98 V	
- 10%	114,30	+ 10%	139,70	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				103,40 V	132,10 V
99,80 % Cumple	0,20 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 03-05-2022 15:50	Fecha y hora 01-05-2022 08:40

Se observa que para las tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana es 0,40% y las internacionales es 0,20%. Para las tensiones máximas, toda la muestra esta dentro de lo determinado por la normativa nacional e internacional.

En las Figuras C.1, C.2 y C.3, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

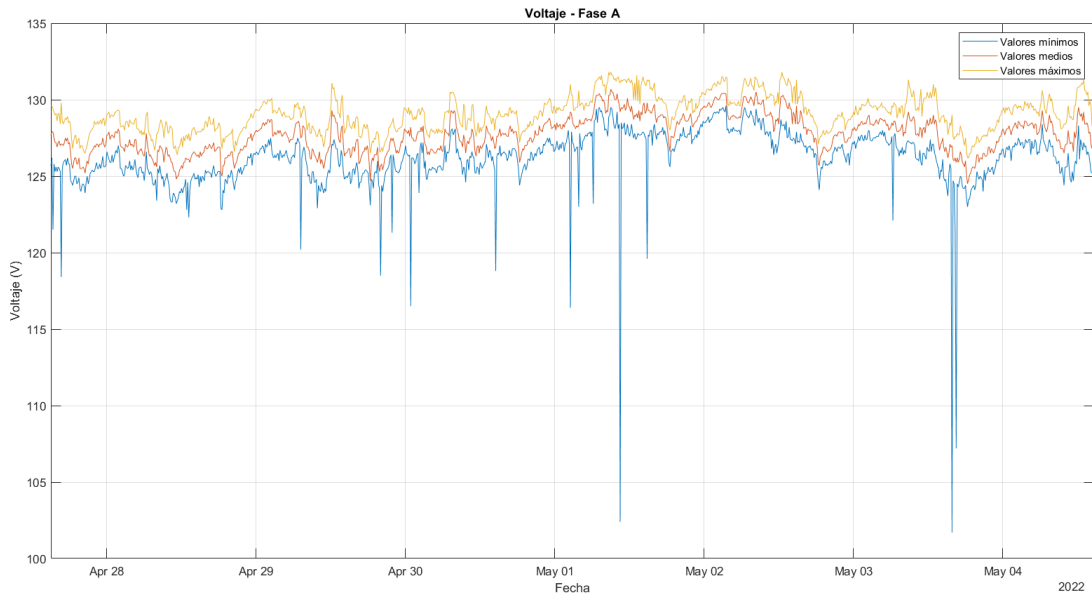


Figura C.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores



Figura C.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores

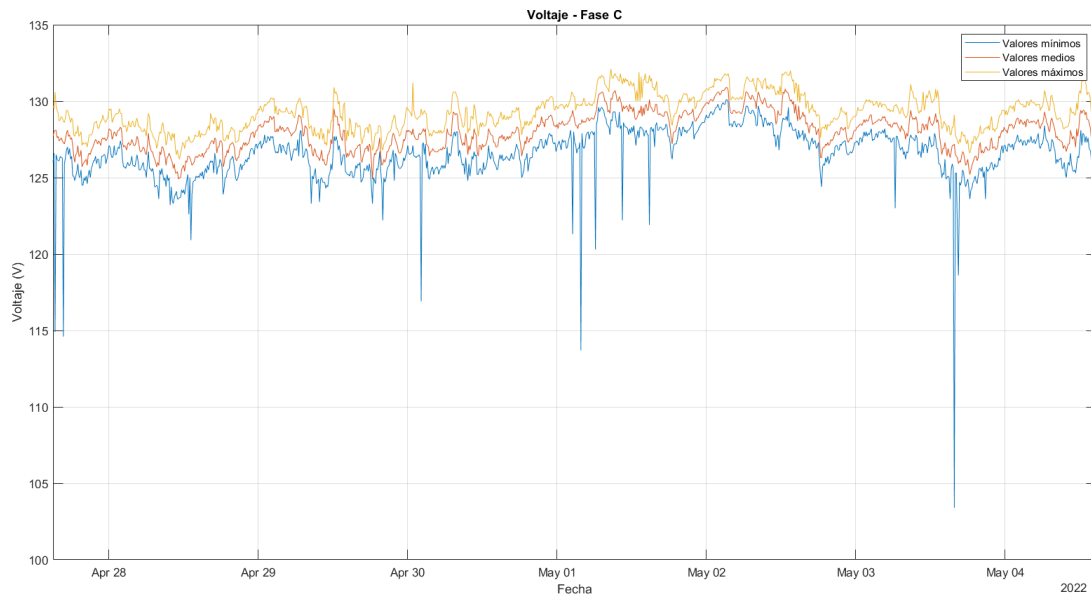


Figura C.3: Niveles de tensión - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase son similares, presentándose únicamente pequeñas diferencias en la fase B con respecto a las fases A y C.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla C.7, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla C.8, se resumen las mediciones y se las evalúa con lo determinado por el estándar IEEE 1250.

Tabla C.7: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,30 \%$	
Muestras mayores al límite (0)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,10 %	0,50 %
100,00 %	0,00 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	29-04-2022 12:30	28-04-2022 18:00

Tabla C.8: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,30 \%$	
Muestras mayores al límite (0)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,10 %	0,50 %
100,00 %	0,00 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	29-04-2022 12:30	28-04-2022 18:00

Se observa que el 100% de las muestras están dentro de los límites establecidos tanto en las normativas nacionales como internacionales.

En la Figura C.4, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores registrados durante la medición.

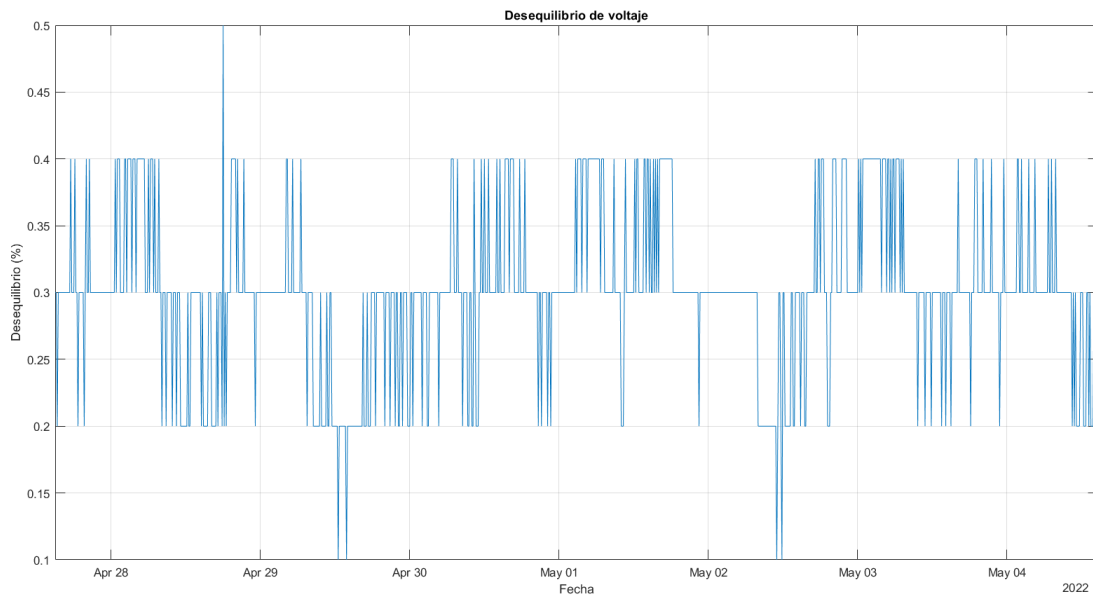


Figura C.4: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la similitud que existe entre los valores de tensión de cada fase, se observa que el desequilibrio de tensión se encuentra dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas C.9, C.10 y C.11, se presenta el resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas durante la medición.

Tabla C.9: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 6,74 A	
Mínimo	Máximo
0 A	45,39 A
Fecha y hora 27-04-2022 18:20	Fecha y hora 30-04-2022 10:40

Tabla C.10: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 6,50 A	
Mínimo	Máximo
0 A	43,16 A
Fecha y hora 27-04-2022 17:40	Fecha y hora 03-05-2022 11:40

Tabla C.11: Niveles de corriente - Fase C

NIVELES DE CORRIENTE - FASE C	
Ipromedio = 77,76 A	
Mínimo	Máximo
0 A	44,65 A
Fecha y hora 27-04-2022 20:20	Fecha y hora 27-05-2022 11:40

En las Figuras C.5, C.6 y C.7, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

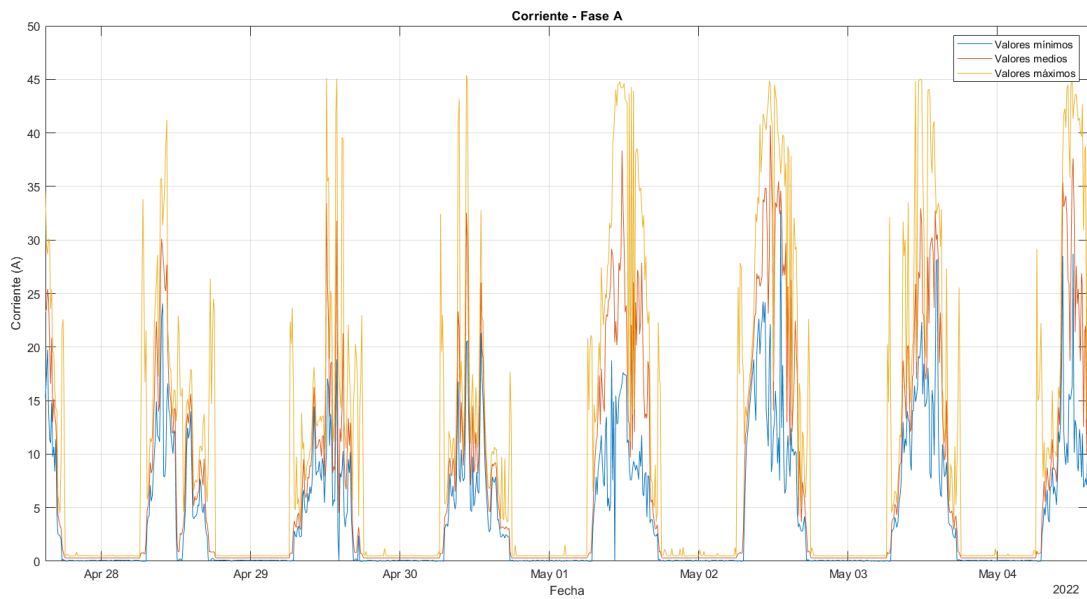


Figura C.5: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

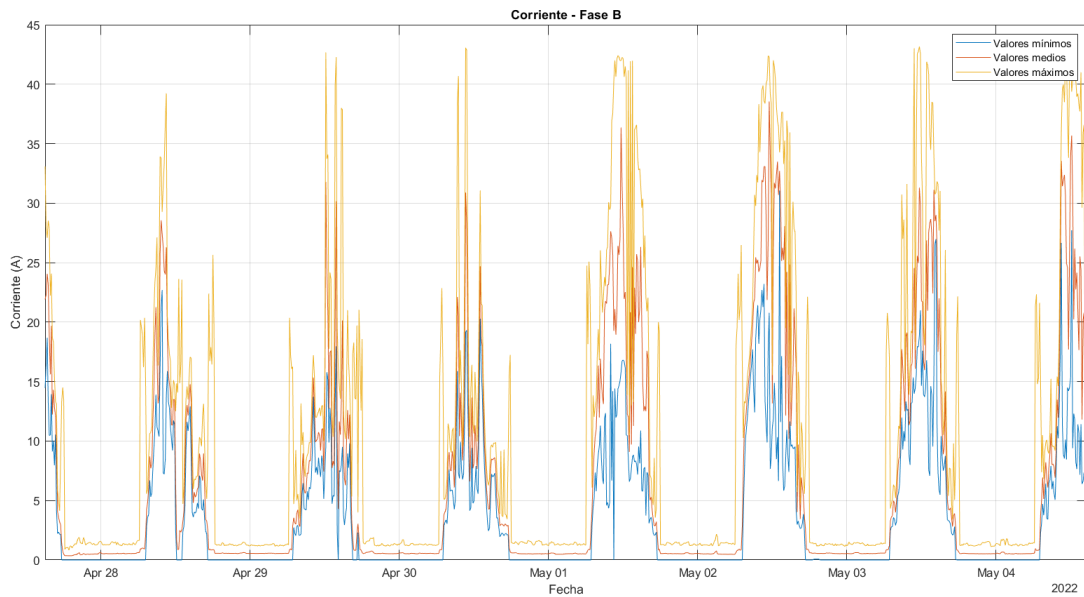


Figura C.6: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

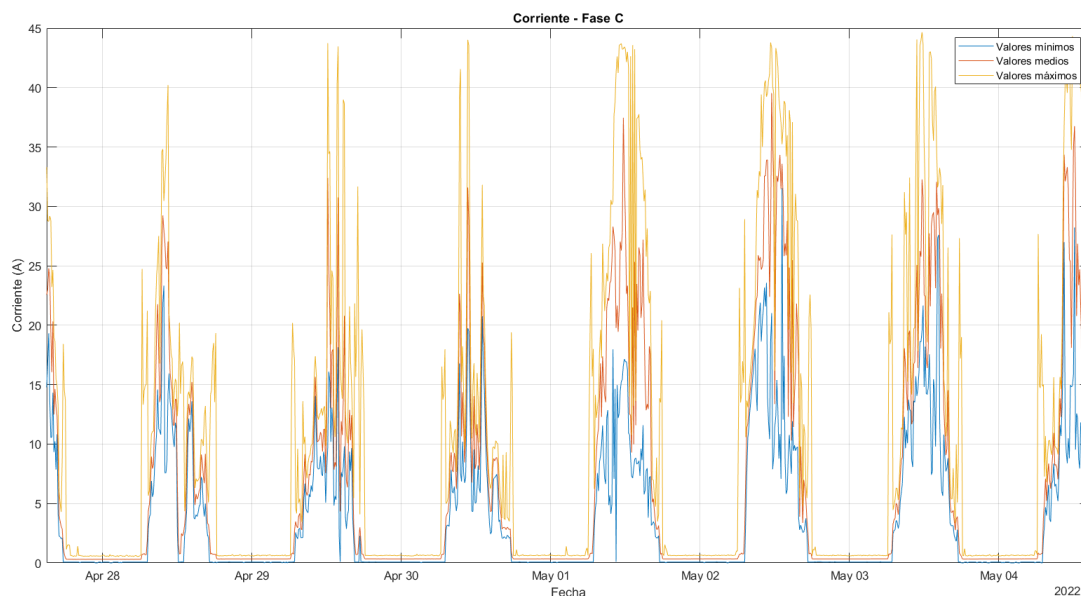


Figura C.7: Niveles de corriente - Fase C

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se observa similitudes entre las fases, además se puede presenciar elevaciones de la corriente a partir del medio día y parte de la noche.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla C.12, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla C.12: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 6,12 %	
Muestras mayores al límite (26)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		1,80 %	44,20 %
97,42 %	2,58 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	29-04-2022 09:00	27-04-2022 17:50

Se observa que el 97,42% de las muestras se encuentran dentro de los límites establecidos tanto en las normativas nacionales e internacionales.

En la Figura C.8, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores registrados durante la medición.

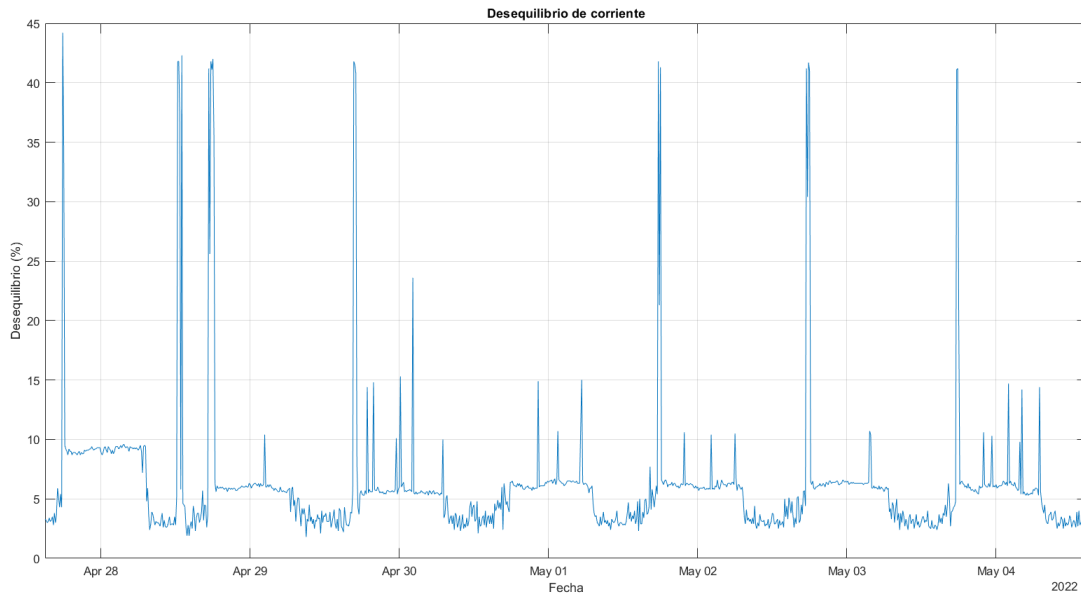


Figura C.8: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

El sistema fotovoltaico esta conectado únicamente al laboratorio de Microrred debido a esto un gran porcentaje de los desequilibrios de corriente están dentro de los límites establecidos por cada normativa.

Flicker

En las Tablas C.13, C.14 y C.15, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Tabla C.13: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,27$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,50 %	0,50 %	0,17 p.u	2,07 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 05:40	Fecha y hora 01-05-2022 02:40

Tabla C.14: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,27$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,50 %	0,50 %	0,17 p.u	2,09 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 19:50	Fecha y hora 01-05-2022 02:40

Tabla C.15: Nivel de flicker - Fase C

FLICKER - FASE C			
Límite flicker		$P_{st} = 0,27$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,80 %	0,20 %	0,17 p.u	1,90 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:30	Fecha y hora 03-05-2022 16:00

Se observa que en las fases A y B, las muestras fuera de los límites establecidos es de 0,50%. Para la fase C, son únicamente 0,20% tanto en la normativa nacional como internacional.

En las Figuras C.9, C.10 y C.11, se presenta el comportamiento de los flicker en cada una de las fases por medio de los valores registrados durante la medición.

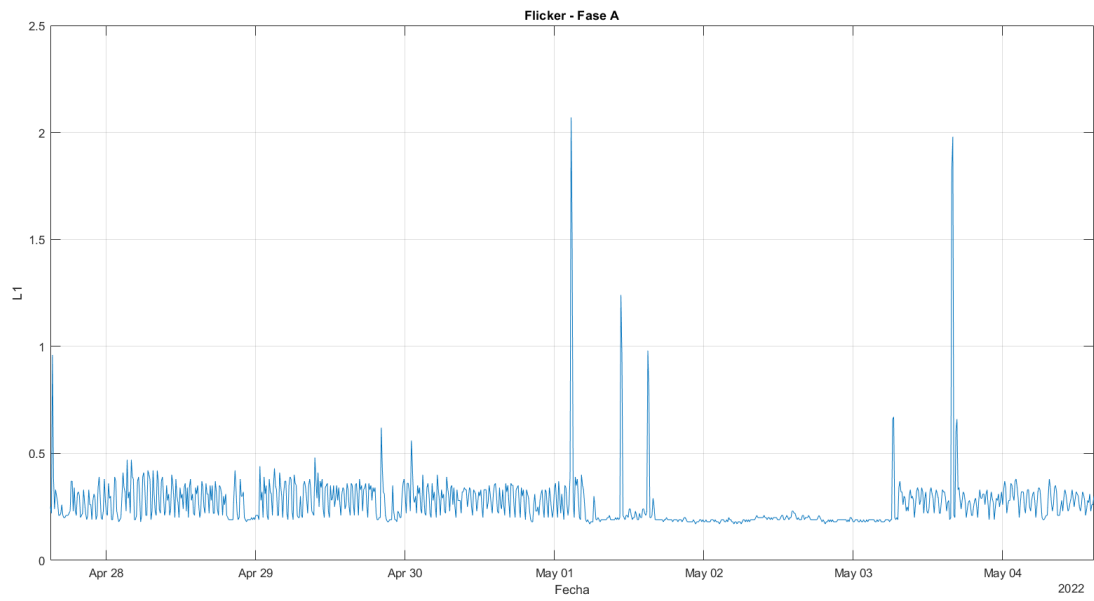


Figura C.9: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

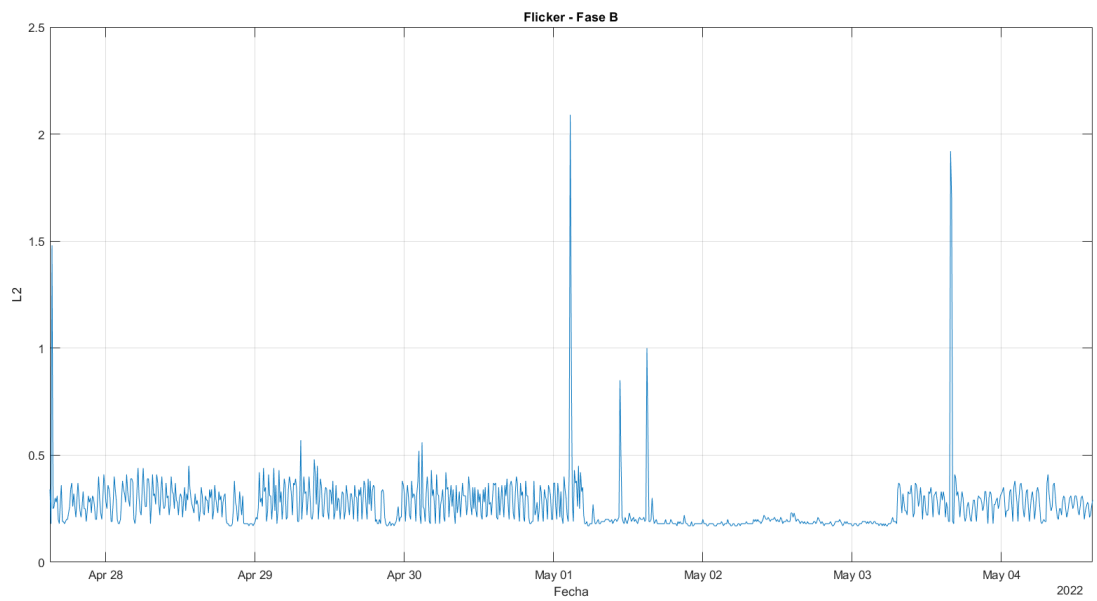


Figura C.10: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

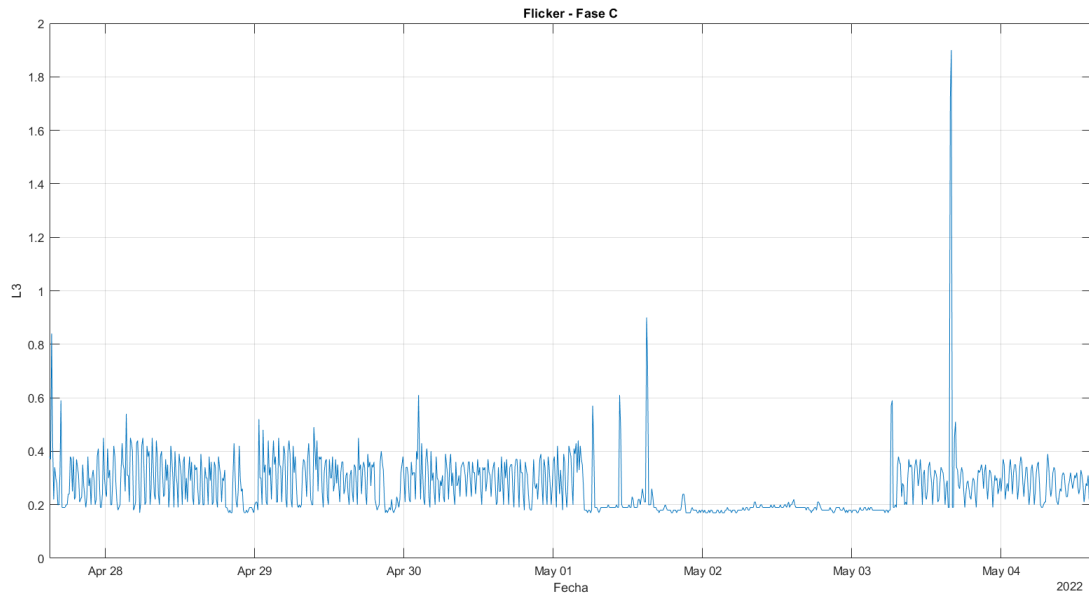


Figura C.11: Flicker - Fase C

Fuente: Autores

Se observa que en la fase B se encuentra el flicker más alto registrado. Sin embargo, en las tres fases existen grandes variaciones de este indicador.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, estas se encuentran en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión armónica individual

En las Tablas C.16, C.17 y C.18, se presenta el resumen mediciones de las componentes armónicas individuales y se las comparan con los límites establecidos en la normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4.

Tabla C.16: Componentes armónicos pares de voltaje

Armónicos individuales de voltaje pares							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	EN 50160	IEC 61000 2-4	Máximo	Máximo	Máximo
2		2%	2%	5%	0%	0%	0%
4		1%	1%	1,5%	0%	0%	0%
6		0,5%	0,5%	0,4%	0,8%	0,5%	0,6%
8		0,5%	0,5%	0,3%	0%	0%	0%
10		0,5%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
12		0,46%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
14		0,43%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
16		0,41%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
18		0,39%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
20		0,38%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
22		0,36%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%
24		0,35%	0,5%	0,25%	0%	0%	0%

Tabla C.17: Componentes armónicos individuales de voltaje impares no múltiplos de 3

Armónicos individuales de Voltaje Impares múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
3		5%	5%	5%	0,30%	0,70%	0,80%
9		1,5%	1,5%	1,5%	0,10%	0,10%	0,10%
15		0,4	0,4	0,5%	0%	0%	0%
21		0,3%	0,3%	0,5%	0%	0%	0%
27		0,2%	0,25%		0%	0%	0%

Tabla C.18: Componentes armónicos individuales de voltaje impares múltiplos de 3

Armónicos individuales de Voltaje Impares no múltiplos de 3							
Orden	Limites				FASE A	FASE B	FASE C
	IEEE 1250	IEC 61000 2-2	IEC 61000 2-4	EN 50160	Máximo	Máximo	Máximo
5	6%			6%	1,4%	1,2%	1,2%
7	5%			5%	0,7%	0,7%	0,7%
11	3,5%			3,5%	0,7%	0,7%	0,7%
13	3%			3%	0,2%	0,2%	0,2%
17	2%			2%	0%	0%	0%
19	1,76%			1,5%	0%	0%	0%
23	1,41%			1,5%	0%	0%	0%
25	1,27%			1,5%	0%	0%	0%

Se observa que todas las componentes armónicas individuales impares se encuentran dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura C.12, se presenta el comportamiento de los armónicos pares, en la Figura C.13, se presenta el comportamiento de los armónicos impares múltiplos de 3 y en la Figura C.14, se presenta el comportamiento de los armónicos impares no múltiplos de 3. Estos valores se muestran para cada fase y fueron registrados durante la medición.

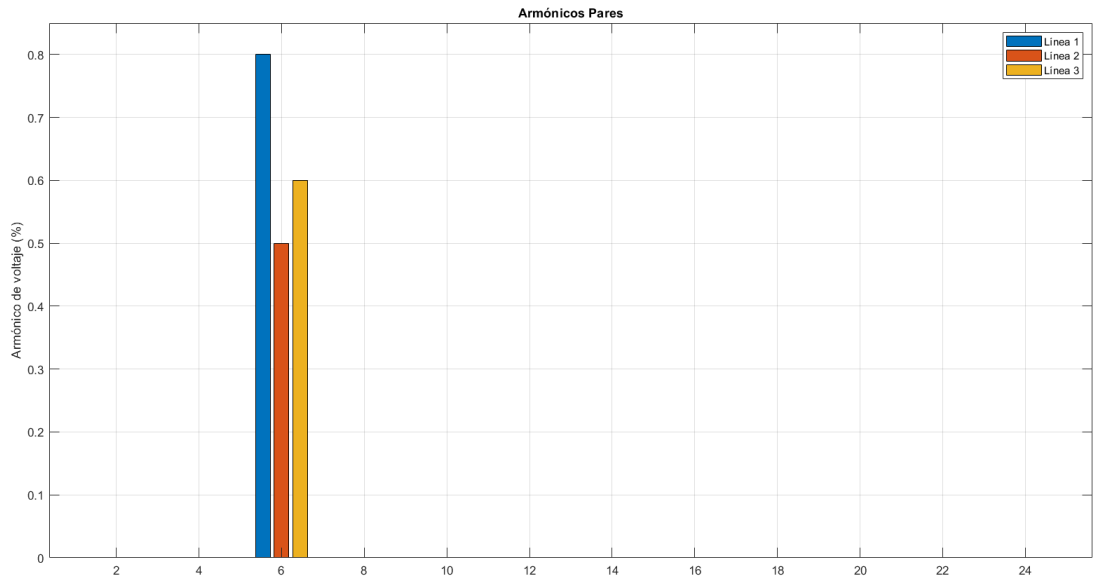


Figura C.12: Armónicos pares

Fuente: Autores

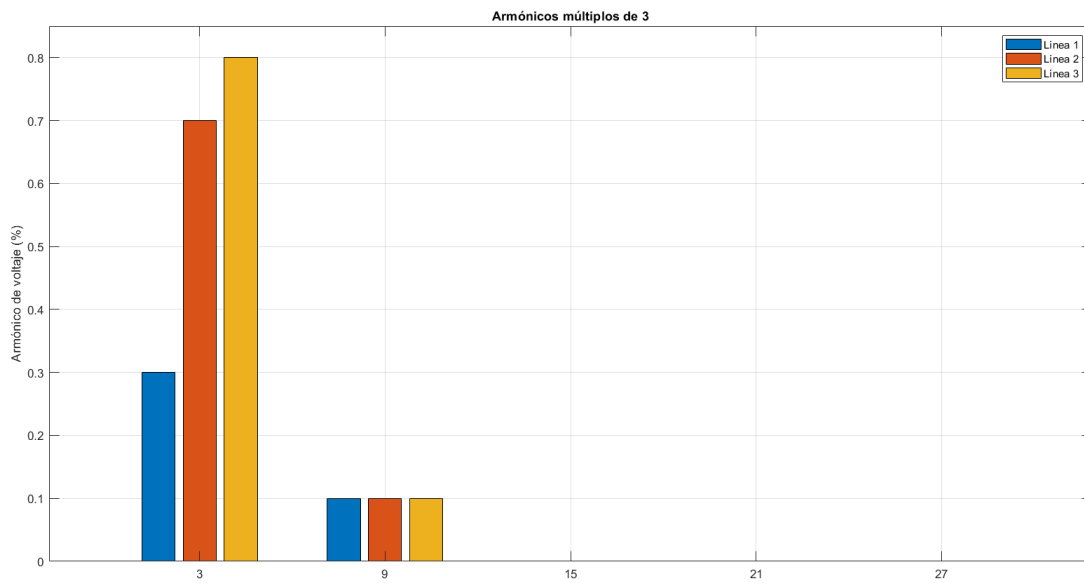


Figura C.13: Armónicos impares múltiplos de 3

Fuente: Autores

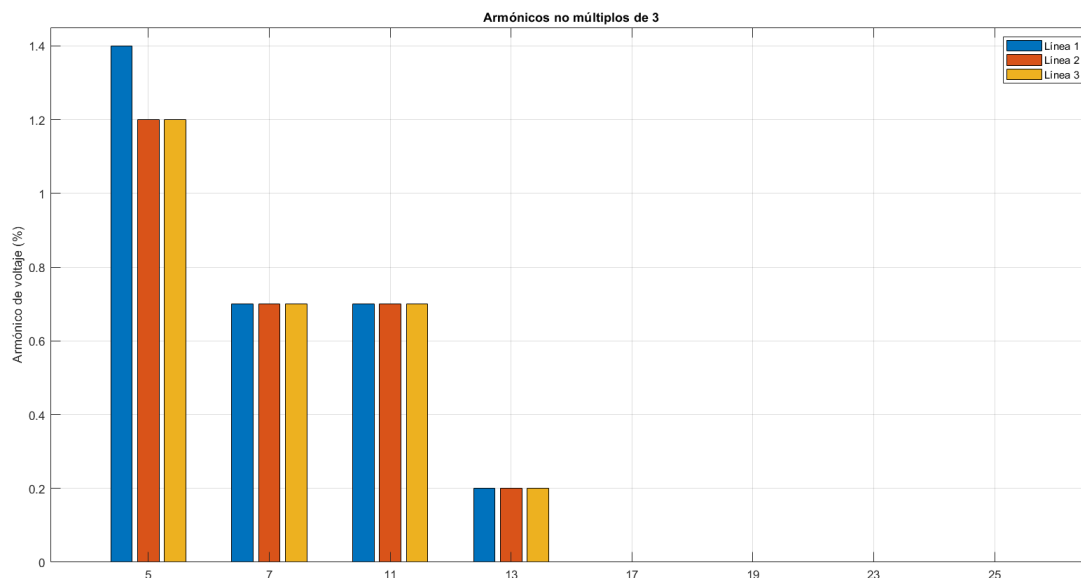


Figura C.14: Armónicos impares

Fuente: Autores

Se observa que la componente armónica 6 se encuentra fuera de los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

Distorsión Armónica Total

En las Tablas C.19, C.20 y C.21, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20, americana IEEE 519 y europea EN50160.

Tabla C.19: Distorsión armónica total - Fase A

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 0,94 %	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,4 %	1,70 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:20	Fecha y hora 02-05-2022 08:40

Tabla C.20: Distorsión armónica total - Fase B

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 0,81%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,30 %	1,40 %
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:20	Fecha y hora 02-05-2022 10:10

Tabla C.21: Distorsión armónica total - Fase C

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE C			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 0,96 %	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	0,60 %	1,60 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 28-04-2022 05:20	Fecha y hora 02-05-2022 10:20

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura C.15, se presenta la distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

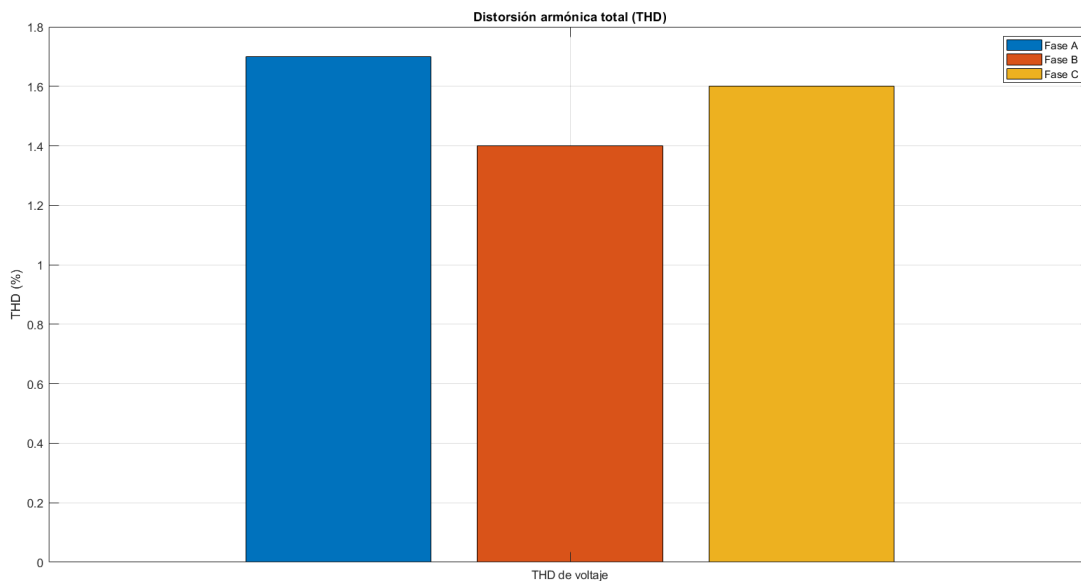


Figura C.15: Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales presentes en cada fase no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

En la Tabla C.22, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en las normativas europeas EN50160, IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-2. En la Tabla C.23, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa americana IEEE 1250.

Tabla C.22: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia (± 1 Hz)				Frecuencia = 59,99 Hz	
-1 Hz	59 Hz	+1 Hz	61 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,95 Hz	60,06 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 23:50	Fecha y hora 28-04-2022 05:20

Tabla C.23: Niveles de frecuencia

FRECUENCIA					
Límite de frecuencia ($\pm 0,5$ Hz)				Frecuencia = 59,99 Hz	
-1 Hz	59,50 Hz	+1 Hz	60,50 Hz	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				59,95 Hz	60,06 Hz
100 % Cumple	0 % No cumple	100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 01-05-2022 23:50	Fecha y hora 28-04-2022 05:20

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas internacionales.

En la Figura C.16, se presenta el comportamiento de la frecuencia por medio de los valores registrados durante la medición.

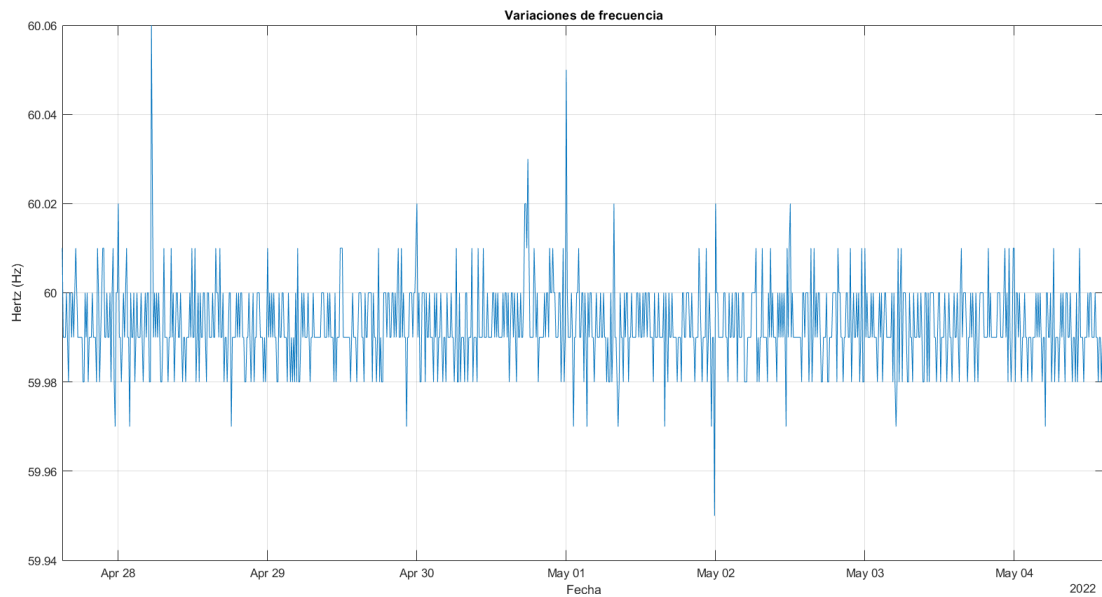


Figura C.16: Niveles de Frecuencia

Fuente: Autores

Se observa que los valores de frecuencia están dentro de los límites establecidos por las normativas internacionales en todo momento.

ANEXO D

Caso IV

Características de sistema: Residencial 1

- **Ubicación de medición:** Tablero de distribución
- **Nivel de tensión:** 120/240 V
- **Topología de medición:** Bifásico
- **Equipo de monitoreo:** PQBox 100
- **Período de medición:** Desde 04/01/2022 hasta 11/01/2022
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos registrados fueron provistos por el Departamento de Calidad de Energía de la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

Nivel de tensión

En la Tabla D.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20. En la Tabla D.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla D.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 119,50 V	
- 8%	110,40	+ 8%	129,60	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				90,02 V	133,17 V
94,35 % Cumple	5,65 % No cumple	99,50 % Cumple	0,50 % No cumple	Fecha y hora 10-01-2022 16:30	Fecha y hora 7-01-2022 20:00

Tabla D.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 128.69 V	
- 10%	108	+ 10%	132	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				90,02 V	133,17 V
95,04 % Cumple	4,96 % No cumple	99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	Fecha y hora 10-01-2022 16:30	Fecha y hora 7-01-2022 20:00

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana son de 5,65% y 4,96% al ser evaluada con regulaciones internacionales. Las tensiones máximas poseen un incumplimiento de 0,50% y 0,10% basado en la normativa nacional y extranjera respectivamente.

En la Tabla D.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla D.4, se expone la evaluación de la muestra con las normas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla D.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 121,19 V	
- 8%	110,40	+ 8%	129,60	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				88,82 V	133,86 V
96,53 % Cumple	3,47 % No cumple	99,31 % Cumple	0,69 % No cumple	Fecha y hora 7-01-2022 20:00	Fecha y hora 10-01-2022 16:30

Tabla D.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 121,19 V	
- 10%	108	+ 10%	132	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				88,82 V	133,86 V
97,42 % Cumple	2,58 % No cumple	99,90 % Cumple	0,10 % No cumple	Fecha y hora 7-01-2022 20:00	Fecha y hora 10-01-2022 16:30

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos por la normativa ecuatoriana son de 3,47% y 2,58% al ser evaluada con regulaciones internacionales. Las tensiones máximas poseen un incumplimiento de 0,69% y 0,10% basado en la normativa nacional y extranjera respectivamente.

En las Figuras D.1 y D.2, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.



Figura D.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores

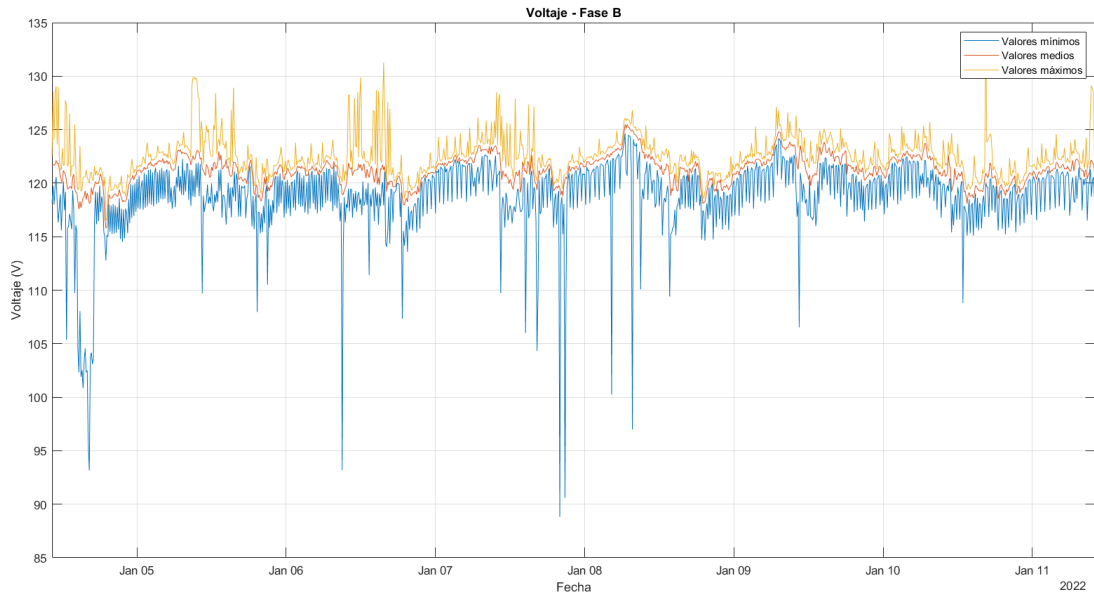


Figura D.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase no son similares, presentándose diferencias entre ellas.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla D.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla D.6, se expone la evaluación de la muestra con la normativa americana IEEE 1250.

Tabla D.5: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,91 \%$	
Muestras mayores al límite (172)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,0013 %	14,29 %
82,94 %	17,06 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	4-01-2022 13:00	10-01-2022 16:30

Tabla D.6: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,91 \%$	
Muestras mayores al límite (96)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,0013 %	14,29 %
90,48 % Cumple	9,52 % No cumple	Fecha y hora 4-01-2022 13:00	Fecha y hora 10-01-2022 16:30

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos es de 17,06% tanto en la normativa nacional como europea y 9,52% al ser evaluada con la regulación americana.

En la Figura D.3, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

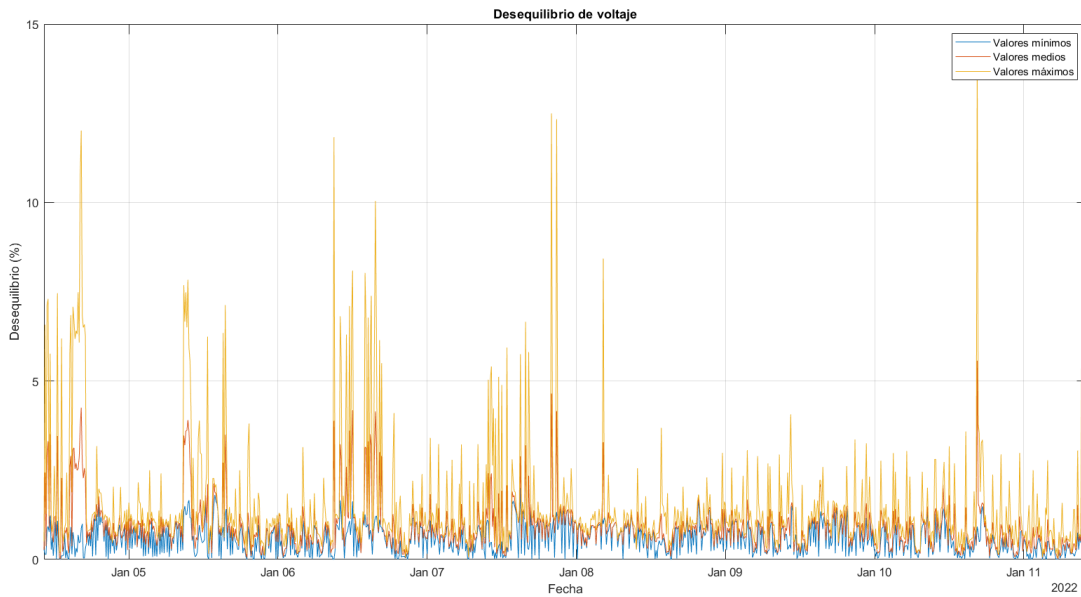


Figura D.3: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la diferencia que existe entre los valores de tensión de cada fase, se observa que el desequilibrio de tensión se encuentra mayormente dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas D.7 y D.8, se presenta un resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas durante la medición.

Tabla D.7: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 4,99 A	
Mínimo	Máximo
0,01 A	83,83 A
Fecha y hora 06-01-2022 01:10	Fecha y hora 10-01-2022 16:30

Tabla D.8: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 4,16 A	
Mínimo	Máximo
0,01 A	80,82 A
Fecha y hora 06-01-2022 08:00	Fecha y hora 07-01-2022 08:00

En las Figuras D.4 y D.5, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

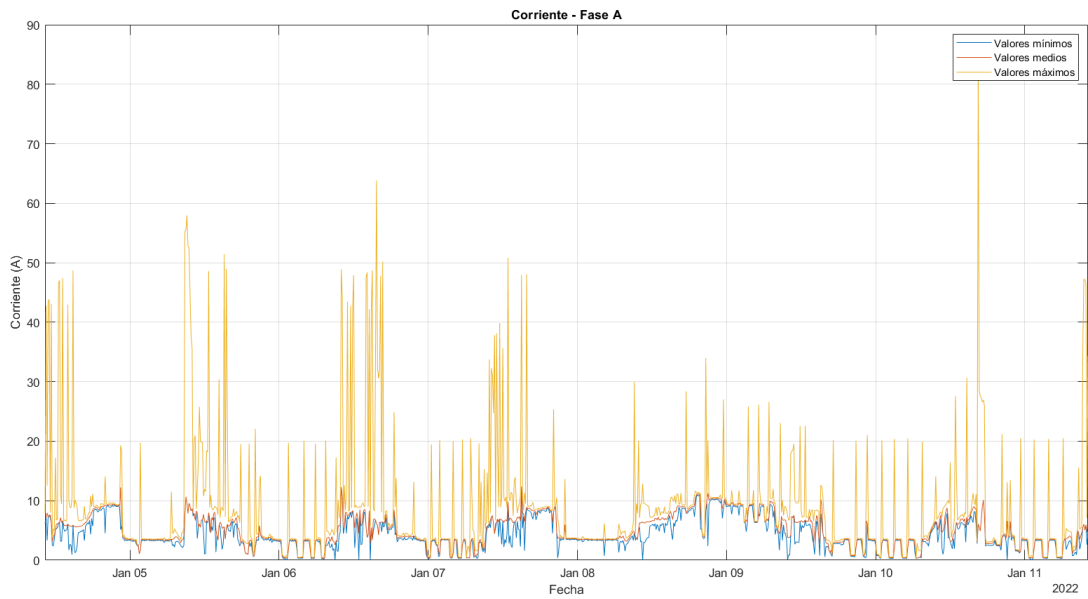


Figura D.4: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

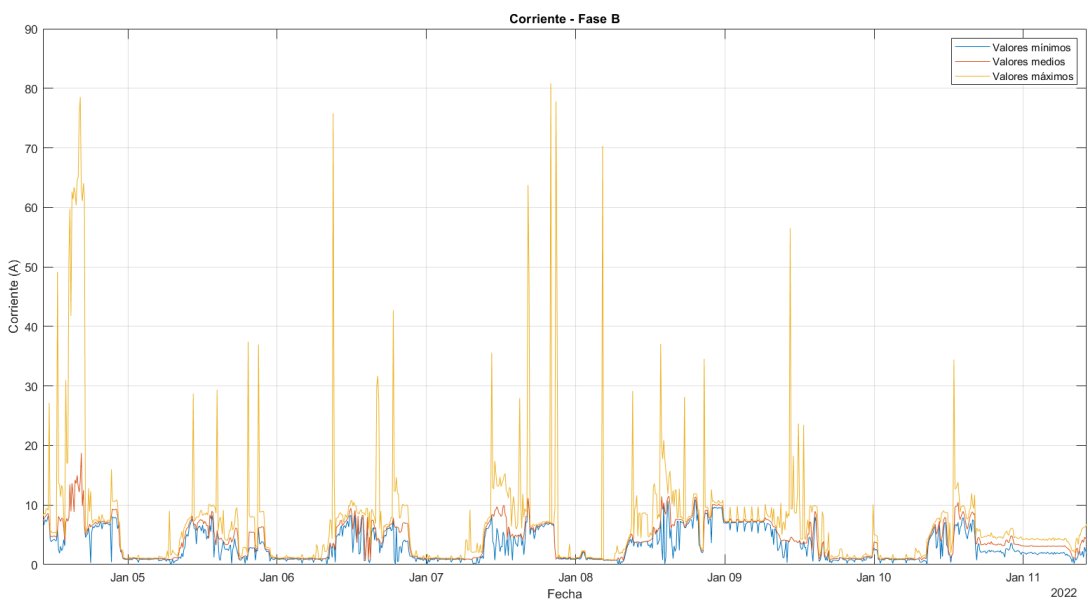


Figura D.5: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se puede observar varias diferencias entre las fases, además se puede presenciar elevaciones de la corriente a partir del medio día y parte de la noche. Por otra parte, los días 09, 10 y madrugadas los valores de corriente disminuyen significativamente.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla D.9, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla D.9: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 28,83 %	
Muestras mayores al límite (714)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,01 %	99,18 %
29,17 %	70,83 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	08-01-2022 08:30	06-01-2022 08:00

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos son del 70,83% tanto en la normativa nacional como internacional.

En la Figura D.6, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

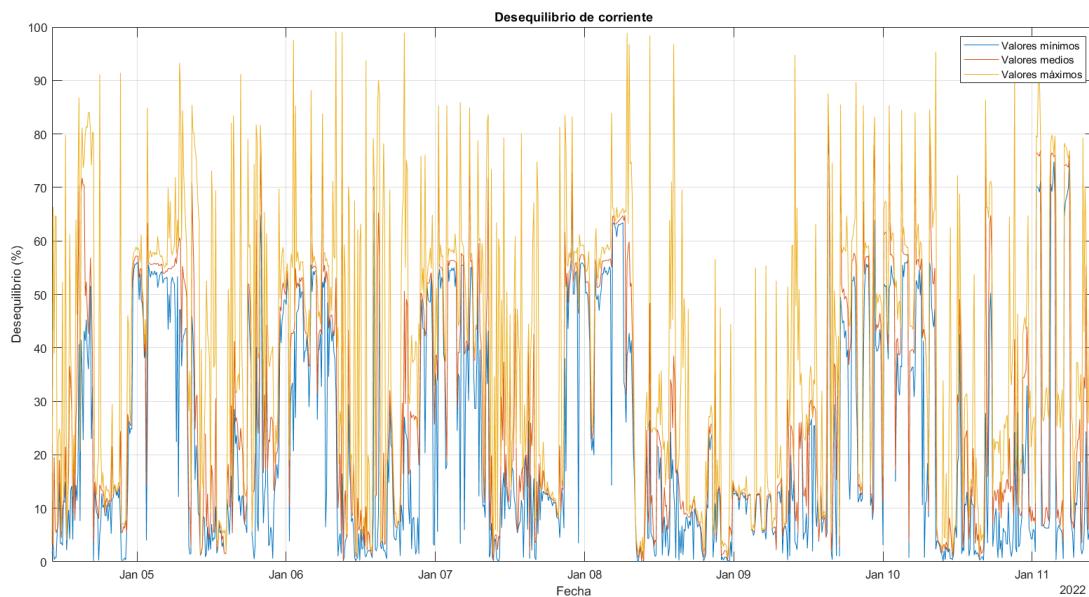


Figura D.6: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

Debido a la gran diferencia entre los valores de corriente registrados durante la medición, el desequilibrio de corriente se encuentra mayormente fuera de los límites establecidos por cada normativa.

Los desbalances presentados en el domicilio, pueden ser ocasionados debido a las cargas utilizadas, es decir

- Desbalance de fases debido a cargas conectadas a una sola fase
- Deficiente instalación en la vivienda
- El sistema fotovoltaico inyecta corriente al transformador debido a la falta de generación de energía

Flicker

En las Tablas D.10 y D.11, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Se observa que en la fase A, las muestras fuera de los límites establecidos son 9,52%. Para la fase B, corresponden al 11,51% tanto en la normativa nacional como internacional.

Tabla D.10: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,62$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
90,48 %	9,52 %	0,07 p.u	9,58 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 06-01-2022 05:40	Fecha y hora 07-01-2022 12:50

Tabla D.11: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,62$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
88,49 %	11,51 %	0,05 p.u	11,80 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 08-01-2022 00:20	Fecha y hora 04-01-2022 16:30

Se observa que en la fase A, las muestras fuera de los límites establecidos son 9,52%. Para la fase B, corresponden al 11,51% tanto en la normativa nacional como en las normativas internacionales.

En las Figuras D.7 y D.8, se presenta el comportamiento de los flicker en cada una de las fases por medio de los valores registrados durante la medición.

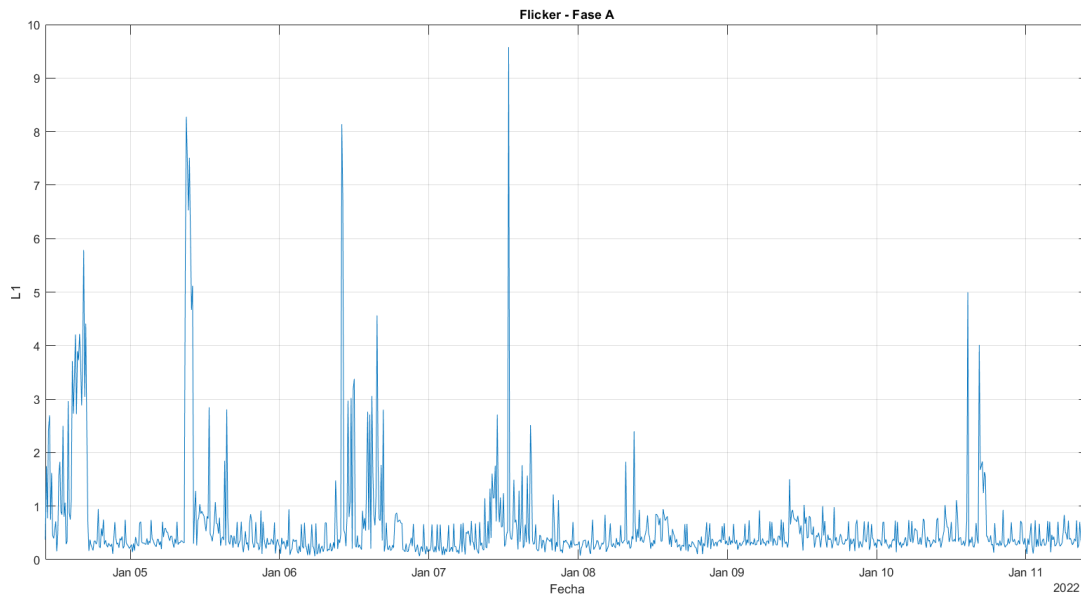


Figura D.7: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

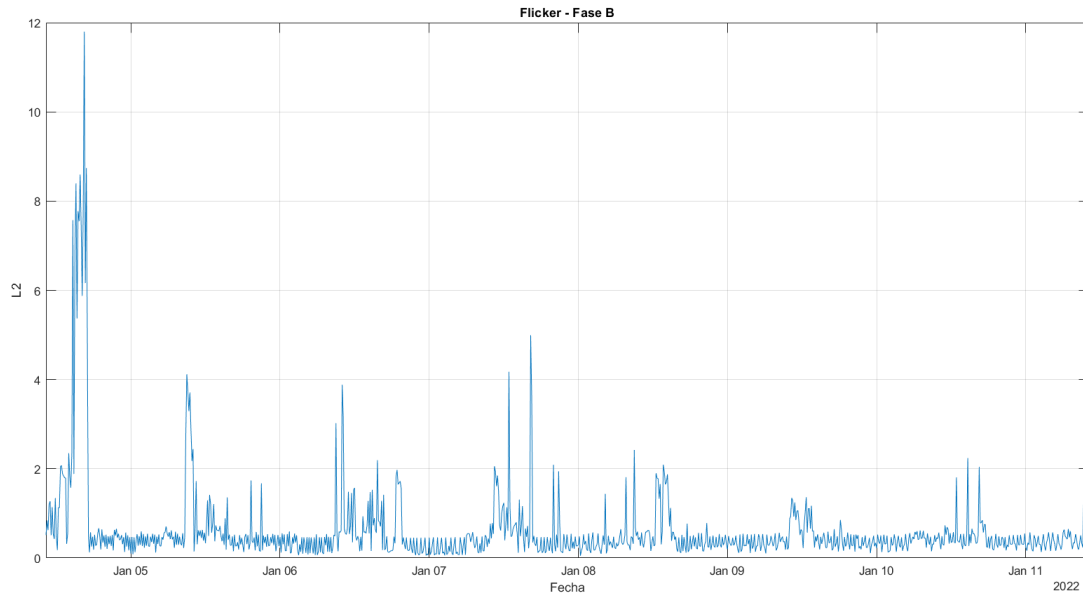


Figura D.8: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

Se observa que en la fase B se encuentra el flicker más alto registrado. En las dos fases existen grandes variaciones de este indicador.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, este tipo de cargas pueden encontrarse en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión Armónica Individual

Este parámetro no será evaluado debido a la no medición de datos de las componentes armónicas individuales en los datos compartidos por la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

Distorsión Armónica Total

En las Tablas D.12 y D.13, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20, americana IEEE 519 y europea EN50160.

Tabla D.12: Distorsión Armónica Total - Fase A

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,56%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,24 %	4,18 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 08-01-2022 11:20	Fecha y hora 08-01-2022 20:00

Tabla D.13: Distorsión Armónica Total - Fase B

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,34%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,13%	4,17%
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 09-01-2022 06:40	Fecha y hora 04-01-2022 16:30

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura D.9, se presenta los valores de distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

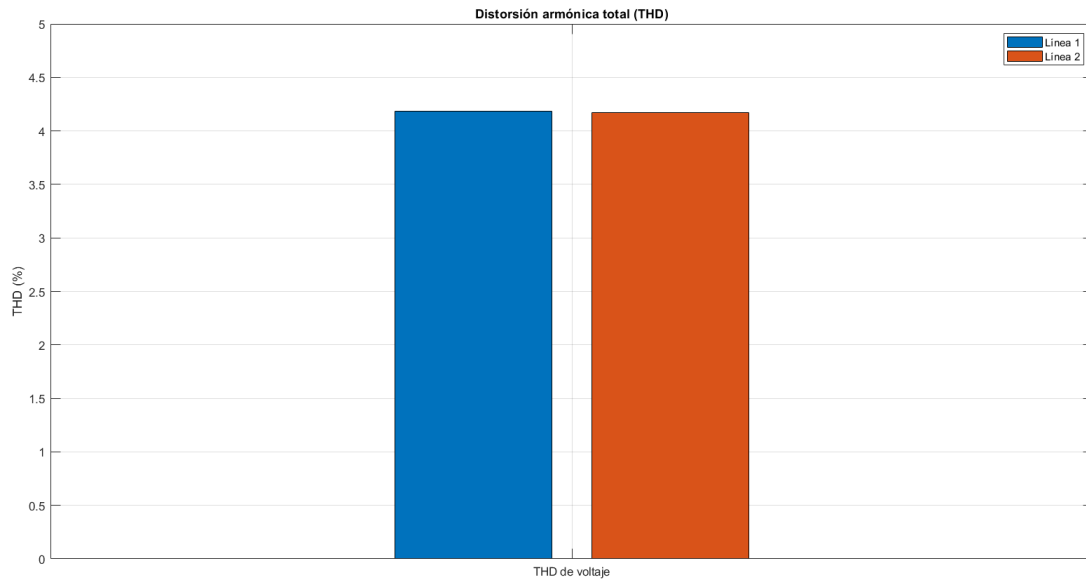


Figura D.9: Distorsión Armónica Total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

Este parámetro no será evaluado debido a la no medición de datos de la frecuencia en los datos compartidos por la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

ANEXO E

Caso V

Características de sistema: Residencial 2

- **Ubicación de medición:** Tablero de distribución
- **Nivel de tensión:** 120/240 V
- **Topología de medición:** Bifásico
- **Equipo de monitoreo:** PQBox 100
- **Período de medición:** Desde 14/05/2021 hasta 21/05/2021
- **Intervalo de muestreo:** 10 minutos

Los datos registrados fueron provistos por el Departamento de Calidad de Energía de la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

Nivel de tensión

En la Tabla E.1, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla E.2, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla E.1: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 118,47 V	
- 8%	110,40	+ 8%	129,60	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				64,03 V	121,56 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 08:50	Fecha y hora 20-05-2021 06:40

Tabla E.2: Niveles de tensión - Fase A

NIVELES DE TENSIÓN - FASE A					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 118,47 V	
- 10%	108	+ 10%	132	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				64,03 V	121,56 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 08:50	Fecha y hora 20-05-2021 06:40

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,40%. Para las tensiones máximas, todas las muestras están dentro las normativas nacionales e internacionales.

En la Tabla E.3, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con el límite establecido en la normativa ecuatoriana ARCERNR 002/20. En la Tabla E.4, se expone la evaluación de la muestra con las normativas: americana IEEE 1250 y europeas EN50160 e IEC 61000 2-4.

Tabla E.3: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 8\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 118,41 V	
- 8%	110,40	+ 8%	129,60	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				64,01 V	121,60 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 08:50	Fecha y hora 20-05-2021 06:50

Tabla E.4: Niveles de tensión - Fase B

NIVELES DE TENSIÓN - FASE B					
Límite nivel de tensión ($\pm 10\%$ V. Nominal)				Vpromedio = 118,41 V	
- 10%	108	+ 10%	132	Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite				64,01 V	121,60 V
99,60 % Cumple	0,40 % No cumple	100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 08:50	Fecha y hora 20-05-2021 06:40

Se observa que para tensiones mínimas, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,40%. Para las tensiones máximas, todas las muestras están dentro las normativas nacionales e internacionales.

En las Figuras E.1 y E.2, se presenta el comportamiento de la tensión de cada fase por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

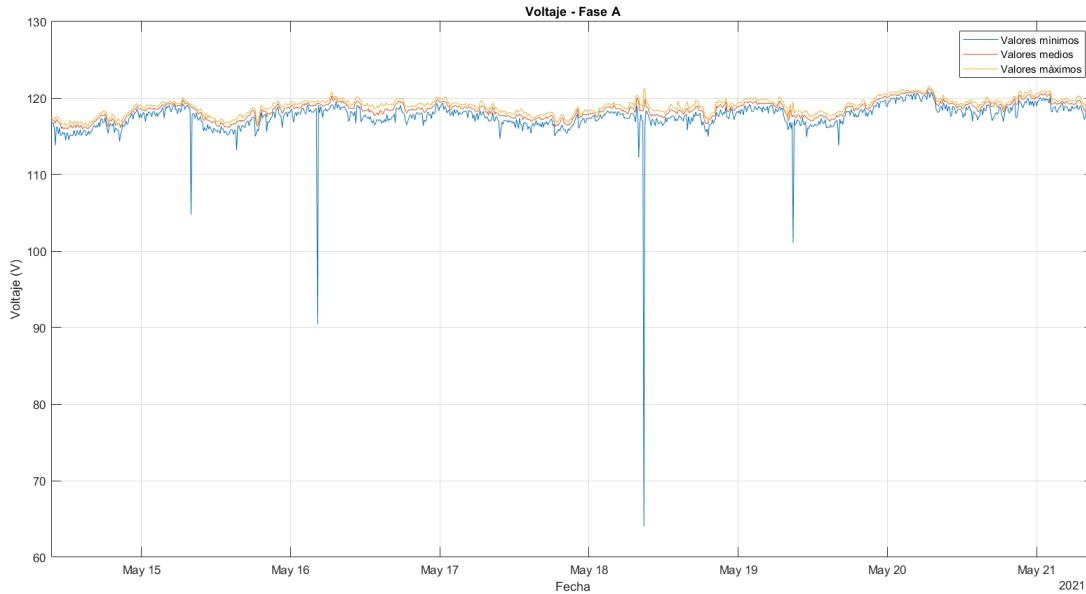


Figura E.1: Niveles de tensión - Fase A

Fuente: Autores

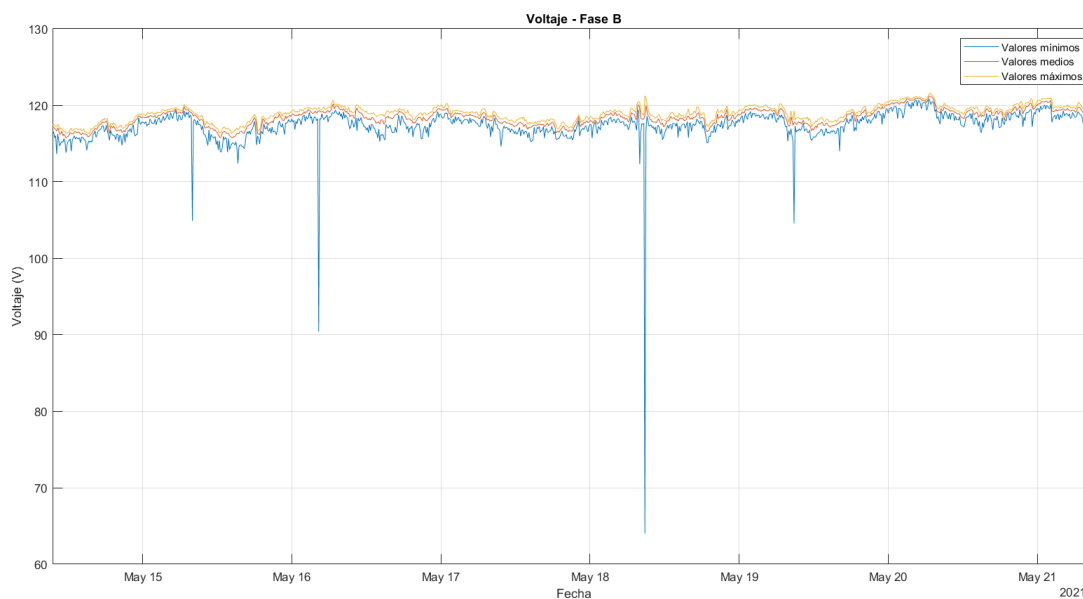


Figura E.2: Niveles de tensión - Fase B

Fuente: Autores

Se observa que las gráficas de cada fase son similares a lo largo de la medición registrada. El valor mínimo de tensión al ser sumamente bajo puede producir fallos en los aparatos eléctricos conectados.

Desequilibrio de tensión

En la Tabla E.5, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y europeas EN50160, IEC 61000 2-2 e IEC 61000 2-4. En la Tabla E.6, se expone la evaluación de la muestra con las normativa americana IEEE 1250.

Tabla E.5: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (2%)		$ V^-/V^+ = 0,07 \%$	
Muestras mayores al límite (0)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,00 %	1,69 %
100 %	0 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	15-05-2021 06:40	19-05-2021 08:50

Tabla E.6: Desequilibrio de tensión

DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE			
Límite de desequilibrio de tensión (3%)		$ V^-/V^+ = 0,07 \%$	
Muestras mayores al límite (0)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,00 %	1,69 %
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 15-05-2021 06:40	Fecha y hora 19-05-2021 08:50

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos tanto en la normativa nacional como internacional.

En la Figura E.3, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de tensión por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

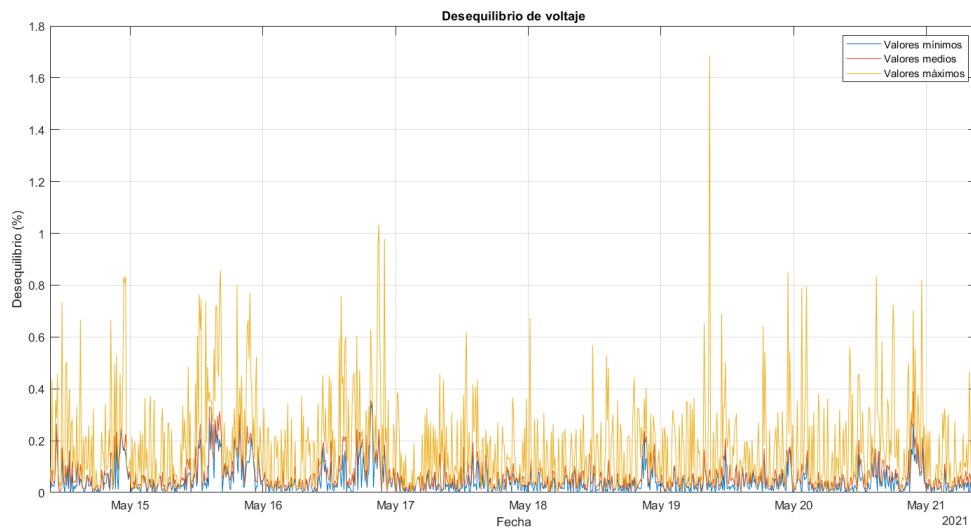


Figura E.3: Desequilibrio de tensión

Fuente: Autores

Debido a la similitud que existe entre los valores de tensión de cada fase, se puede observar que el desequilibrio de tensión se encuentra dentro del límite establecido por cada norma.

Nivel de corriente

En las Tablas E.7 y E.8, se presenta un resumen de las mediciones de corriente por cada fase registradas en la medición realizada.

Tabla E.7: Niveles de corriente - Fase A

NIVELES DE CORRIENTE - FASE A	
Ipromedio = 1,01 A	
Mínimo	Máximo
0,003 A	7,161 A
Fecha y hora	Fecha y hora
16-05-2021 08:00	19-05-2021 12:20

Tabla E.8: Niveles de corriente - Fase B

NIVELES DE CORRIENTE - FASE B	
Ipromedio = 30,09 A	
Mínimo	Máximo
0 A	41,87 A
Fecha y hora	Fecha y hora
16-05-2021 07:00	16-05-2021 18:50

En las Figuras E.4 y E.5, se presenta el comportamiento de la corriente por cada fase mediante los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

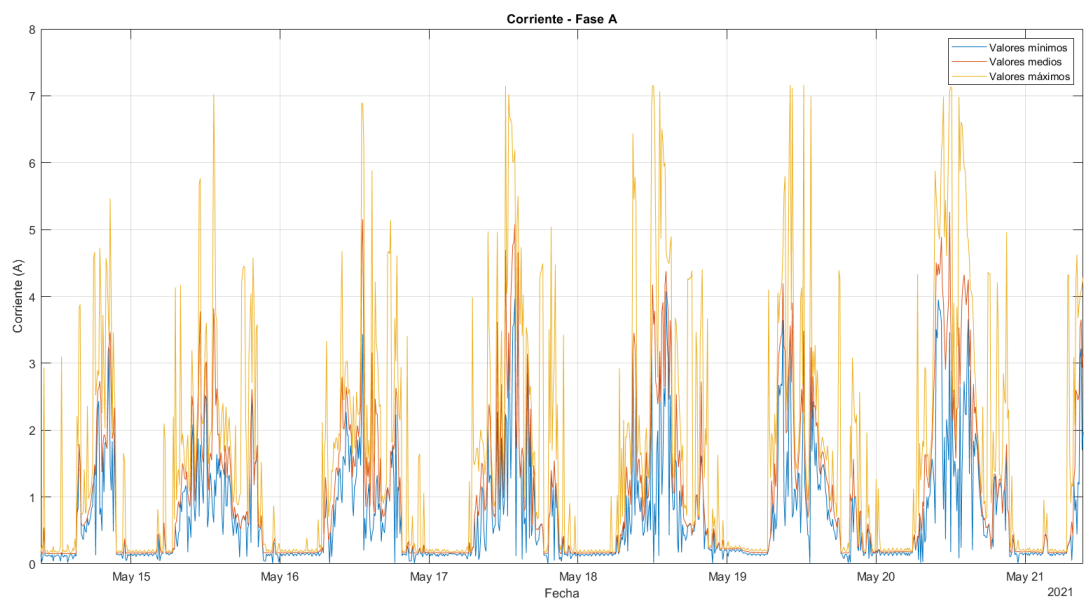


Figura E.4: Niveles de corriente - Fase A

Fuente: Autores

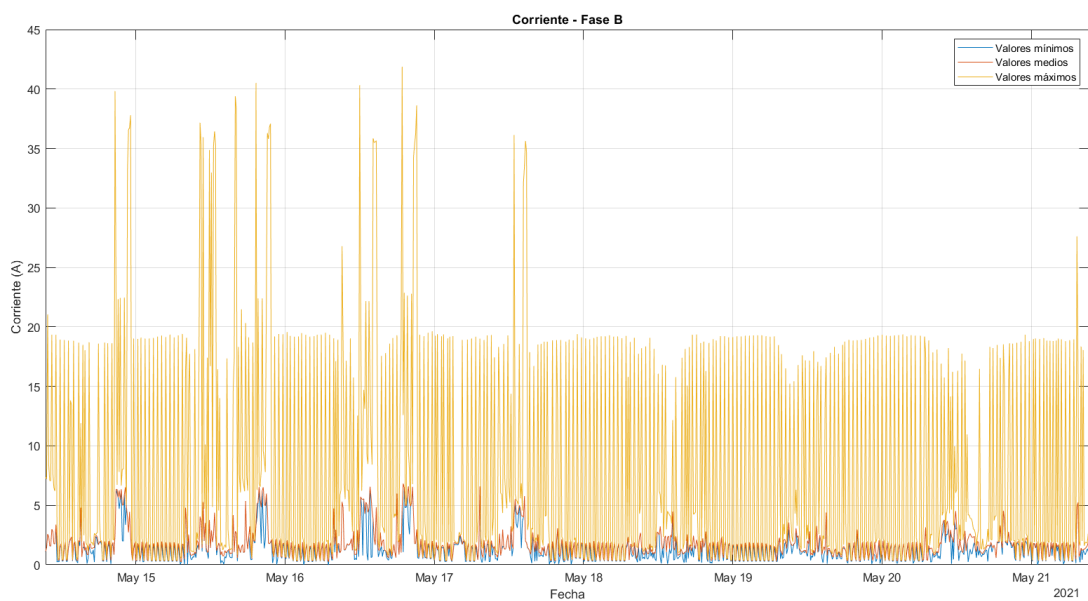


Figura E.5: Niveles de corriente - Fase B

Fuente: Autores

En las gráficas de corriente se puede observar grandes diferencias entre los valores máximos de las fases, además se puede presenciar elevaciones de la corriente a partir del medio día y parte de la noche.

Desequilibrio de corriente

En la Tabla E.9, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20 y americana IEEE 519.

Tabla E.9: Desequilibrio de corriente

DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE			
Límite de desequilibrio de corriente (20%)		Promedio desequilibrio = 46,58 %	
Muestras mayores al límite (917)		Mínimo	Máximo
Cumplimiento con el límite		0,05 %	100 %
9,03 %	90,97 %	Fecha y hora	Fecha y hora
Cumple	No cumple	17-05-2021 13:50	16-05-2021 07:00

Se observa que las muestras fuera de los límites establecidos son 90,97% tanto en las normativa nacional como internacional.

En la Figura E.6, se presenta el comportamiento de los desequilibrios de corriente por medio de los valores mínimos, medios y máximos registrados durante la medición.

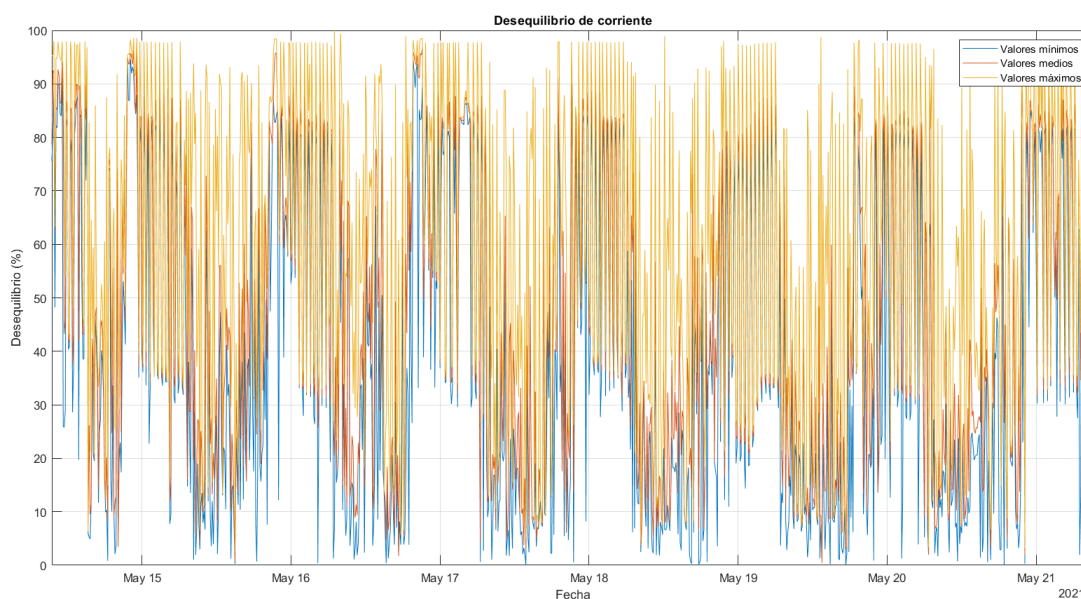


Figura E.6: Desequilibrio de corriente

Fuente: Autores

Debido a la gran diferencia entre los valores de corriente registrados durante la medición, el desequilibrio de corriente se encuentra mayormente fuera de los límites establecidos por cada normativa.

Los desbalances presentados en el domicilio, pueden ser ocasionados debido a las cargas utilizadas, es decir:

- Desbalance de fases debido a cargas conectadas a una sola fase
- Deficiente instalación en la vivienda
- El sistema fotovoltaico inyecta corriente al transformador debido a la falta de generación de energía

Flicker

En las Tablas E.10 y E.11, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNNR 002/20, americana IEEE 1250 y europea EN50160.

Tabla E.10: Nivel de flicker - Fase A

FLICKER - FASE A			
Límite flicker		$P_{st} = 0,21$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,70 %	0,30 %	0,04 p.u	5,71 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 20-05-2021 04:30	Fecha y hora 18-05-2021 09:00

Tabla E.11: Nivel de flicker - Fase B

FLICKER - FASE B			
Límite flicker		$P_{st} = 0,23$ p.u	
≥ 1 p.u.		Mínimo	Máximo
99,70 %	0,30 %	0,04 p.u	5,76 p.u
Cumple	No cumple	Fecha y hora 20-05-2021 04:30	Fecha y hora 18-05-2021 09:00

Se observa que en la fase A, las muestras fuera de los límites establecidos son únicamente 0,30% tanto en la normativa nacional como internacional.

En las Figuras E.7 y E.8 se presenta las curvas de flicker en cada una de las fases.

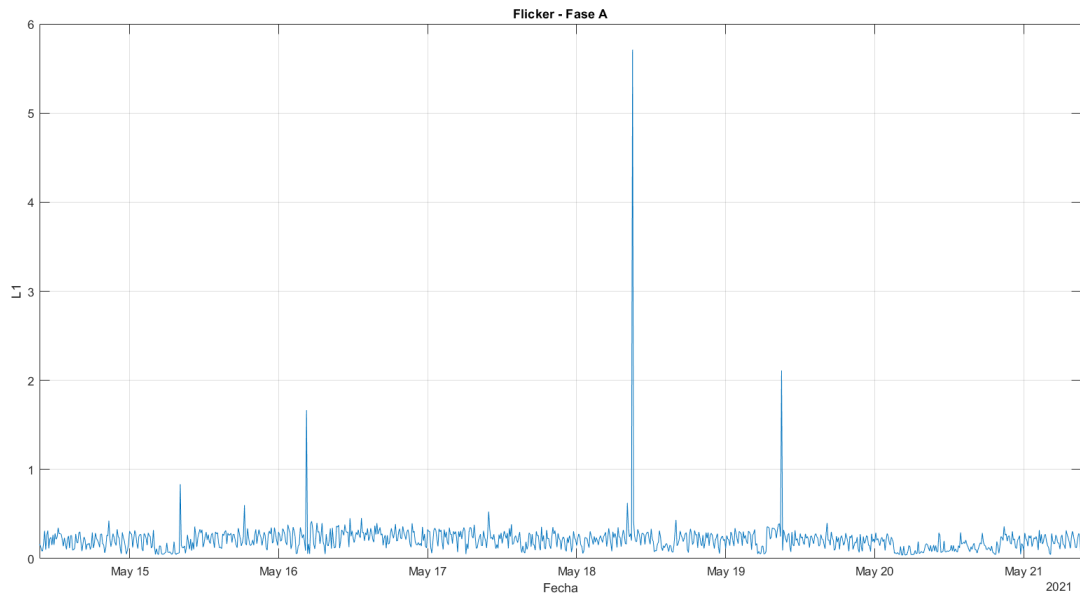


Figura E.7: Flicker - Fase A

Fuente: Autores

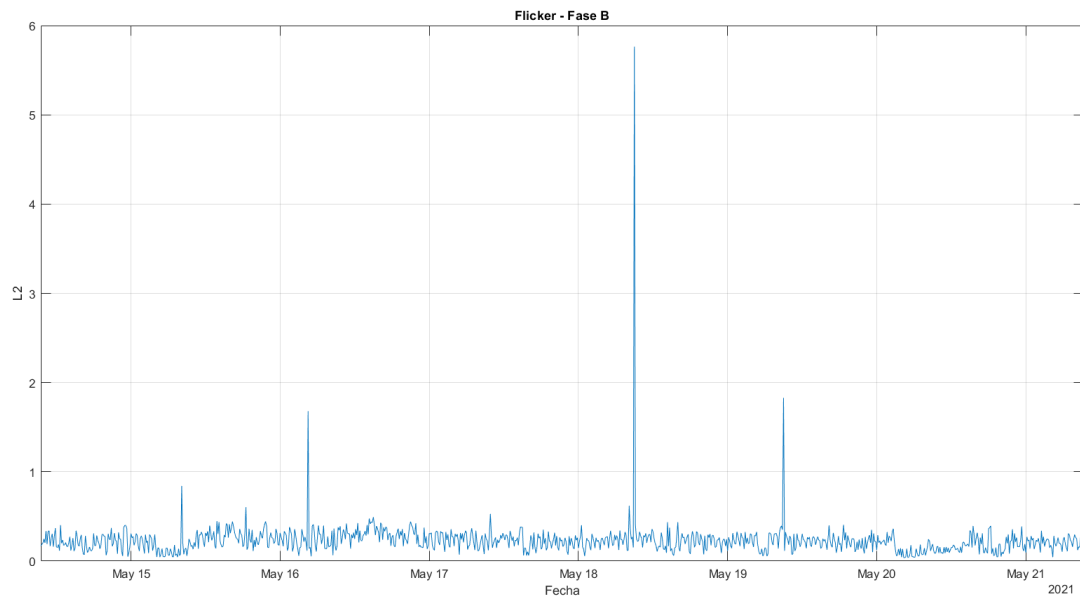


Figura E.8: Flicker - Fase B

Fuente: Autores

Se observa que en la fase B se encuentra el flicker más alto registrado. Sin embargo, las variaciones de este indicador son similares en las 2 fases.

Distorsión Armónica

Las cargas no lineales son comúnmente las que producen corrientes armónicas, este tipo de cargas pueden encontrarse en un medio industrial (motores) como doméstico (lámparas fluorescentes).

Los armónicos suelen ser responsables de sobrecalentamiento de transformadores y líneas de distribución, originan corrientes y pérdidas elevadas en el neutro de algunas instalaciones, disparos por sobrecorriente de algunas protecciones, disparo de relés diferenciales, etc.

Distorsión Armónica Individual

Este parámetro no será evaluado debido a la no medición de datos de las componentes armónicas individuales en los datos compartidos por la Empresa Eléctrica CENTROSUR.

Distorsión Armónica Total

En la Tablas E.12 y E.13, se presenta el resumen de mediciones y se las compara con los límites establecidos en las normativas: ecuatoriana ARCERNR 002/20, americana IEEE 519 y europea EN50160.

Tabla E.12: Distorsión armónica total

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE A			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,56%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,01 %	2,34 %
100 % Cumple	0% No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 02:30	Fecha y hora 20-05-2021 20:30

Tabla E.13: Distorsión armónica total

DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL - FASE B			
Límite	Muestras mayores al límite	THD _v = 1,58%	
THD 8%	0	Mínimo	Máximo
≤ 8%	≥ 8%	1,02 %	2,34 %
100 % Cumple	0 % No cumple	Fecha y hora 18-05-2021 02:30	Fecha y hora 20-05-2021 20:40

Se observa que todas las muestras están dentro de los límites establecidos en las normativas ecuatoriana, americana y europea.

En la Figura E.9, se presenta los valores de distorsión armónica total de voltaje de cada fase por medio del valor máximo registrado durante la medición.

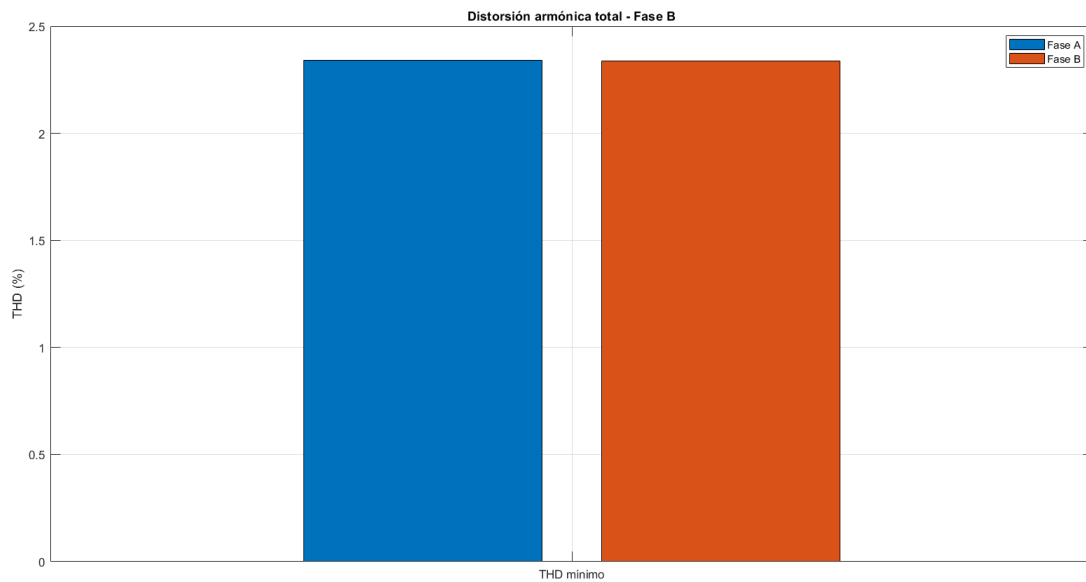


Figura E.9: Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores

Se observa que las distorsiones armónicas totales no exceden los límites establecidos por la normativa ecuatoriana, americana y europea.

Frecuencia

Este parámetro no será evaluado debido a la no medición de datos de la frecuencia en los datos compartidos por la Empresa Eléctrica CENTROSUR.