



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TITULACIÓN DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Síntesis y validación de metodologías y algoritmos para la determinación de parámetros de calidad de energía eléctrica

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTOR: Ganazhapa Jiménez, Byron Oswaldo

DIRECTOR: Calderón Córdova, Carlos Alberto, Ing.

LOJA – ECUADOR
2014

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Carlos Alberto Calderón Córdova.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

De mi consideración:

Que el presente trabajo de fin de titulación: Síntesis y validación de metodologías y algoritmos para la determinación de parámetros de calidad de energía eléctrica, realizado por el profesional en formación: Ganazhapa Jiménez Byron Oswaldo; ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por lo cual se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre de 2014

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Ganazhapa Jiménez Byron Oswaldo declaro ser autor del presente trabajo de fin de titulación: Síntesis y validación de metodologías y algoritmos para la determinación de parámetros de calidad de energía eléctrica, de la titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo el Ing. Carlos Alberto Calderón Córdova director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f

Autor: Ganazhapa Jiménez Byron Oswaldo

Cedula: 1104139462

DEDICATORIA

A Dios, el que me ha dado fortaleza para continuar hacia adelante y no desmayar en los problemas que asechaban, enseñarme a enfrentar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni decaer en el intento.

A mi padre y madre, por brindarme el apoyo suficiente para sobresalir ante todo obstáculo, por brindarme suficiente afecto y amor. Agradezco infinitamente por haberme dado el suficiente apoyo en aquellos momentos difíciles para no desmoralizar y desmayar. Gracias, los guardo en lo más profundo de mi corazón.

A mis hermanas; Mónica, Martha, Karla y Estefanía, por estar junto a mi lado y por concederme toda una vida de felicidad. Las quiero mucho.

A mis sobrinas; Juliana y Daniela, por hacerme feliz cada día y por hacerme recordar aquellos momentos de mi vida infantil.

A todos mis amigos, quienes fueron parte de mi formación profesional, y por estar junto a mi lado en aquellos momentos difíciles de supervivencia en exámenes y proyectos.

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas que llegaron a formar parte de mi formación personal y profesional. Pero sin duda los más importantes son mis padres, por enseñarme valores, principios, ser una persona de menos a más, y, por ayudarme a culminar mis logros más altos.

A mis amigos, quienes hemos compartido buenos y malos momentos, por ayudarme a culminar todos esos trabajos universitarios, y por estar junto a mi lado hasta el final de esos días como estudiantes.

De igual manera quiero extender este agradecimiento a cada uno de los docentes de la Universidad Técnica Particular de Loja, quienes han sido parte de un proceso de formación profesional, principalmente al Ing. Carlos Calderón Córdova, por brindarme todo su tiempo para ayudarme a culminar este proyecto.

Y agradezco a Dios, por ser una inspiración y una guía para superar obstáculos presentes en la vida, por guiarme en el camino de la honestidad y humildad.

¡Gracias a todos!

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS.....	5
CAPÍTULO I	6
1. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA (CEE).....	6
1.1. Introducción.....	7
1.2. Importancia de la calidad de energía eléctrica.....	7
1.3. Problemas de calidad de energía eléctrica	8
1.3.1. Origen.	8
1.3.2. Clasificación.....	9
1.3.2.1. Interrupción bajo/sobre voltaje.....	9
1.3.2.2. Desbalance de voltaje.....	10
1.3.2.3. Armónicos.....	11
1.3.2.4. Transitorios.....	11
1.3.2.5. Fluctuaciones de tensión (Flicker).	12
1.4. Normativas de calidad de energía eléctrica	13
1.4.1. Norma IEC 61000-4-30.	14
1.4.2. Norma EN-50160.....	15
1.4.3. Estándar IEEE 1159-1995.....	17
1.5. Calidad de energía eléctrica en el Ecuador	18
1.5.1. Calidad del producto.....	18
1.5.2. Calidad del servicio técnico.....	18
1.5.3. Calidad del servicio comercial.....	19
CAPÍTULO II	20

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD	20
2.1. Introducción.....	21
2.2. Fundamentos teóricos	22
2.2.1. Valor efectivo de una forma de onda periódica.	22
2.2.2. Potencia instantánea y potencia promedio.	23
2.2.3. Coeficientes y series de Fourier.....	24
2.2.4. Distorsión armónica total (THD).	25
2.2.5. Teorema de valor medio para integrales.	25
2.3. Análisis matemático de las variables eléctricas	26
2.3.1. Voltaje y corriente.....	27
2.3.2. Potencia promedio.....	28
2.3.3. Potencia aparente.	28
2.3.4. Potencia reactiva.	29
2.3.5. Factor de potencia.....	29
2.3.6. Distorsión armónica total.	29
CAPÍTULO III	31
3. IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	¡Error! Marcador no definido.
3.1. Introducción.....	32
3.2. Diseño del hardware	32
3.2.1. Diagrama de bloques.	32
3.2.2. Hardware de acondicionamiento de señales.....	33
3.2.2.1. <i>Circuito de acondicionamiento de señal de voltaje.</i>	34
3.2.2.2. <i>Circuito de acondicionamiento de señal de corriente.</i>	34
3.2.3. Circuito de lazo seguidor de fase.....	35
3.3. Diseño del software	36
3.3.1. Entorno Arduino.....	36
3.3.1.1. <i>Algoritmo para el cálculo de THD.</i>	36
3.3.1.2. <i>Algoritmo para el cálculo de parámetros de calidad de energía.</i>	39
3.3.2. Entorno LabVIEW.....	42
3.3.2.1. <i>Registro y visualización de parámetros en LabVIEW.</i>	43
CAPÍTULO IV	48
4. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	48
4.1. Introducción.....	49
4.2. Análisis de los resultados experimentales.	49

4.2.1.	Voltaje de fase.....	50
4.2.1.1.	Primera prueba experimental.....	50
4.2.1.2.	Segunda prueba experimental.....	55
4.2.1.3.	Tercera prueba experimental.....	59
4.2.2.	Corriente de fase.....	63
4.2.2.1.	Primera prueba experimental.....	63
4.2.2.2.	Segunda prueba experimental.....	67
4.2.2.3.	Tercera prueba experimental.....	71
4.2.3.	Potencia real de fase.....	75
4.2.3.1.	Primera prueba experimental.....	75
4.2.3.2.	Segunda prueba experimental.....	79
4.2.3.3.	Tercera prueba experimental.....	83
4.2.4.	Potencia aparente de fase.	87
4.2.4.1.	Primera prueba experimental.....	87
4.2.4.2.	Segunda prueba experimental.....	91
4.2.4.3.	Tercera prueba experimental.....	95
4.2.5.	Potencia reactiva de fase.....	99
4.2.5.1.	Primera prueba experimental.....	99
4.2.5.2.	Segunda prueba experimental.....	103
4.2.5.3.	Tercera prueba experimental.....	107
4.2.6.	Factor de potencia de fase.....	111
4.2.6.1.	Primera prueba experimental.....	111
4.2.6.2.	Segunda prueba experimental.....	115
4.2.6.3.	Tercera prueba experimental.....	119
4.2.7.	Distorsión armónica total de voltaje (THDv) de fase.	123
4.2.7.1.	Primera prueba experimental.....	123
4.2.7.2.	Segunda prueba experimental.....	127
4.2.7.3.	Tercera prueba experimental.....	131
4.2.8.	Distorsión armónica total de corriente (THDi) de fase.....	135
4.2.8.1.	Primera prueba experimental.....	135
4.2.8.2.	Segunda prueba experimental.....	139
4.2.8.3.	Tercera prueba experimental.....	143
CONCLUSIONES.....		147
RECOMENDACIONES		150
REFERENCIAS		151

ANEXOS	1544
ANEXO A	1555
ANEXO B	1577
ANEXO C	1699
ANEXO D	1766
ANEXO E	1833
ANEXO F	1899
ANEXO G	1933
ANEXO H	1988

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Interrupciones.	10
Figura 1.2. Desequilibrio de tensiones.....	10
Figura 1.3. Corriente armónica.	11
Figura 1.4. Transitorios impulsivos.	12
Figura 1.5. Transitorios oscilatorios.	12
Figura 1.6. Fluctuaciones de tensión (Flicker).	13
Figura 2.1. Circuitos para la definición de valores eficaces.	22
Figura 2.2. Valor eficaz o RMS de una señal de voltaje.....	27
Figura 3.1. Diagrama de bloques del hardware.....	33
Figura 3.2. Circuito de acondicionamiento de la señal de voltaje.	34
Figura 3.3. Circuito de acondicionamiento de la señal de corriente.	35
Figura 3.4. Circuito de bucle de enganche de fase.	36
Figura 3.5. Diagrama de flujo del Módulo de procesamiento frecuencial.	37
Figura 3.6. Diagrama de flujo del módulo de procesamiento de parámetros de energía.....	40
Figura 3.7. Pantalla Multímetro: voltajes y corrientes.....	44
Figura 3.8. Pantalla Multímetro: potencia y energía.....	44
Figura 3.9. Pantalla Tendencia: voltajes y corrientes.....	44
Figura 3.10. Pantalla Tendencia: potencia y energía.....	44
Figura 3.11. Pantalla gráfica de barras para visualización de armónicos.....	44
Figura 3.12. Diagrama del bloques de la recepción y desentramado de variables eléctricas.	45
Figura 3.13. Función DataSocket Read.....	45
Figura 3.14. Función Replace Substring.....	46
Figura 3.15. Función Match Pattern.....	46
Figura 3.16. Función Fract/Exp String To Number.....	46
Figura 3.17. Función Plot Waveform.	47
Figura 3.18. Función Format Into String.	47
Figura 4.1. Instalación de los equipos analizadores.....	50
Figura 4.2. Histórico de voltaje A (L1) en el primer ensayo.	52
Figura 4.3. Histórico de voltaje B (L2) en el primer ensayo.	53
Figura 4.4. Histórico de voltaje C (L3) en el primer ensayo.	54
Figura 4.5. Histórico de voltaje A (L1) en el segundo ensayo.....	56
Figura 4.6. Histórico de voltaje B (L2) en el segundo ensayo.....	57
Figura 4.7. Histórico de voltaje C (L3) en el segundo ensayo.....	58
Figura 4.8. Histórico de voltaje A (L1) en el tercer ensayo.	60
Figura 4.9. Histórico de voltaje B (L2) en el tercer ensayo.	61
Figura 4.10. Histórico de voltaje C (L3) en el tercer ensayo.	62
Figura 4.11. Histórico de corrientes A (L1) en el primer ensayo.....	64
Figura 4.12. Histórico de corrientes B (L2) en el primer ensayo.....	65
Figura 4.13. Histórico de corrientes C (L3) en el primer ensayo.....	66
Figura 4.14. Histórico de corrientes A (L1) en el segundo ensayo.	68
Figura 4.15. Histórico de corrientes B (L2) en el segundo ensayo.	69
Figura 4.16. Histórico de corrientes C (L3) en el segundo ensayo.	70

Figura 4.17. Histórico de corrientes A (L1) en el tercer ensayo.....	72
Figura 4.18. Histórico de corrientes B (L2) en el tercer ensayo.....	73
Figura 4.19. Histórico de corrientes C (L3) en el tercer ensayo.....	74
Figura 4.20. Histórico de potencias reales A (L1) en el primer ensayo.	76
Figura 4.21. Histórico de potencias reales B (L2) en el primer ensayo.	77
Figura 4.22. Histórico de potencias reales C (L3) en el primer ensayo.	78
Figura 4.23. Histórico de potencias reales A (L1) en el segundo ensayo.....	80
Figura 4.24. Histórico de potencias reales B (L2) en el segundo ensayo.....	81
Figura 4.25. Histórico de potencias reales C (L3) en el segundo ensayo.	82
Figura 4.26. Histórico de potencias reales A (L1) en el tercer ensayo.	84
Figura 4.27. Histórico de potencias reales B (L2) en el tercer ensayo.	85
Figura 4.28. Histórico de potencias reales C (L3) en el tercer ensayo.	86
Figura 4.29. Histórico de potencias aparentes A (L1) en el primer ensayo.	88
Figura 4.30. Histórico de potencias aparentes B (L2) en el primer ensayo.....	89
Figura 4.31. Histórico de potencias aparentes C (L3) en el primer ensayo.....	90
Figura 4.32. Histórico de potencias aparentes A (L1) en el segundo ensayo.	92
Figura 4.33. Histórico de potencias aparentes B (L2) en el segundo ensayo.	93
Figura 4.34. Histórico de potencias aparentes C (L2) en el segundo ensayo.	94
Figura 4.35. Histórico de potencias aparentes A (L1) en el tercer ensayo.	96
Figura 4.36. Histórico de potencias aparentes B (L2) en el tercer ensayo.....	97
Figura 4.37. Histórico de potencias aparentes C (L3) en el tercer ensayo.....	98
Figura 4.38. Histórico de potencias reactivas A (L1) en el primer ensayo.....	100
Figura 4.39. Histórico de potencias reactivas B (L2) en el primer ensayo.....	101
Figura 4.40. Histórico de potencias reactivas C (L3) en el primer ensayo.	102
Figura 4.41. Histórico de potencias reactivas A (L1) en el segundo ensayo.....	104
Figura 4.42. Histórico de potencias reactivas B (L2) en el segundo ensayo.....	105
Figura 4.43. Histórico de potencias reactivas C (L2) en el segundo ensayo.....	106
Figura 4.44. Histórico de potencias reactivas A (L1) en el tercer ensayo.....	108
Figura 4.45. Histórico de potencias reactivas B (L2) en el tercer ensayo.....	109
Figura 4.46. Histórico de potencias reactivas C (L3) en el tercer ensayo.	110
Figura 4.47. Histórico de factores de potencia A (L1) en el primer ensayo.....	112
Figura 4.48. Histórico de factores de potencia B (L2) en el primer ensayo.....	113
Figura 4.49. Histórico de factores de potencia C (L3) en el primer ensayo.....	114
Figura 4.50. Histórico de factores de potencia A (L1) en el segundo ensayo.	116
Figura 4.51. Histórico de factores de potencia B (L2) en el segundo ensayo.	117
Figura 4.52. Histórico de factores de potencia C (L3) en el segundo ensayo.	118
Figura 4.53. Histórico de factores de potencia A (L1) en el tercer ensayo.	120
Figura 4.54. Histórico de factores de potencia B (L2) en el tercer ensayo.	121
Figura 4.55. Histórico de factores de potencia C (L3) en el tercer ensayo.....	122
Figura 4.56. Histórico de distorsión armónica total de voltajes A (L1) en el primer ensayo.	124
Figura 4.57. Histórico de distorsión armónica total de voltajes B (L2) en el primer ensayo.	125
Figura 4.58. Histórico de distorsión armónica total de voltajes C (L3) en el primer ensayo.	126
Figura 4.59. Histórico de distorsión armónica total de voltajes A (L1) en el segundo ensayo.	128

Figura 4.60. Histórico de distorsión armónica total de voltajes B (L2) en el segundo ensayo.	129
Figura 4.61. Histórico de distorsión armónica total de voltajes C (L3) en el segundo ensayo.	130
Figura 4.62. Histórico de distorsión armónica total de voltajes A (L1) en el tercer ensayo.	132
Figura 4.63. Histórico de distorsión armónica total de voltajes B (L2) en el tercer ensayo.	133
Figura 4.64. Histórico de distorsión armónica total de voltajes C (L3) en el tercer ensayo.	134
Figura 4.65. Histórico de distorsión armónica total de corriente A (L1) en el primer ensayo.	136
Figura 4.66. Histórico de distorsión armónica total de corriente B (L2) en el primer ensayo.	137
Figura 4.67. Histórico de distorsión armónica total de corriente C (L3) en el primer ensayo.	138
Figura 4.68. Histórico de distorsión armónica total de corriente A (L1) en el segundo ensayo.	140
Figura 4.69. Histórico de distorsión armónica total de corriente B (L2) en el segundo ensayo.	141
Figura 4.70. Histórico de distorsión armónica total de corriente C (L3) en el segundo ensayo.	142
Figura 4.71. Histórico de distorsión armónica total de corriente A (L1) en el tercer ensayo.	144
Figura 4.72. Histórico de distorsión armónica total de corriente B (L2) en el tercer ensayo.	145
Figura 4.73. Histórico de distorsión armónica total de corriente C (L3) en el tercer ensayo.	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tolerancia para las Tensiones de acuerdo a la Norma ANSI.....	13
Tabla 1.2. Parámetros de calidad eléctrica según IEC 61000-4-30.....	15
Tabla 1.3. Características de la alimentación en baja tensión según EN-50160.	16
Tabla 1.4. Límites de las categorías de fenómenos electromagnéticos según IEEE 1159-1995.	17
Tabla 2.1. Evaluación de la Integral de Reimann.....	26
Tabla 3.1. Interfaz gráfica de usuario para visualización de parámetros de calidad de energía.....	44
Tabla 4.1. Resumen de voltajes de fase obtenidos en el primer ensayo.	51
Tabla 4.2. Resumen de voltajes obtenidos en el segundo ensayo.	55
Tabla 4.3. Resumen de voltajes obtenidos en el tercer ensayo.	59
Tabla 4.4. Resumen de corrientes obtenidas en el primer ensayo.....	63
Tabla 4.5. Resumen de corrientes obtenidas en el segundo ensayo.	67
Tabla 4.6. Resumen de corrientes obtenidas en el tercer ensayo.....	71
Tabla 4.7. Resumen de potencias reales obtenidas en el primer ensayo.	75
Tabla 4.8. Resumen de potencias reales obtenidas en el tercer ensayo.	79
Tabla 4.9. Resumen de potencias reales obtenidas en el tercer ensayo.	83
Tabla 4.10. Resumen de potencias aparentes obtenidas en el primer ensayo.....	87
Tabla 4.11. Resumen de potencias aparentes obtenidas en el segundo ensayo.	91
Tabla 4.12. Resumen de potencias aparentes obtenidas en el tercer ensayo.....	95
Tabla 4.13. Resumen de potencias reactivas obtenidas en el primer ensayo.	99
Tabla 4.14. Resumen de potencias reactivas obtenidas en el segundo ensayo.....	103
Tabla 4.15. Resumen de potencias reactivas obtenidas en el tercer ensayo.	107
Tabla 4.16. Resumen de factores de potencia obtenidas en el primer ensayo.....	111
Tabla 4.17. Resumen de factores de potencia obtenidas en el segundo ensayo.	115
Tabla 4.18. Resumen de factores de potencia obtenidas en el tercer ensayo.....	119
Tabla 4.19. Resumen de variable de distorsión armónica total de voltaje (THDv's) obtenidas en el primer ensayo.	123
Tabla 4.20. Resumen de variable de distorsión armónica total de voltaje (THDv's) obtenidas en el segundo ensayo.	127
Tabla 4.21. Resumen de variable de distorsión armónica total de voltaje (THDv's) obtenidas en el tercer ensayo.	131
Tabla 4.22. Resumen de variable de distorsión armónica total de corriente (THDí's) obtenidas en el primer ensayo.	135
Tabla 4.23. Resumen de variable de distorsión armónica total de corriente (THDí's) obtenidas en el segundo ensayo.	139
Tabla 4.24. Resumen de variable de distorsión armónica total de corriente (THDí's) obtenidas en el tercer ensayo.	143

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza una síntesis y validación de metodologías y algoritmos para la determinación de parámetros de calidad de energía eléctrica aplicados a una red trifásica, con capacidad de transmisión de datos mediante conexión Ethernet para el registro y visualización de parámetros eléctricos. Para el desarrollo del mismo, se propone cumplir cuatro etapas fundamentales: Primero, definir la metodología para la determinación de un parámetro eléctrico desde el punto de vista analítico. Como segunda etapa, se propone sintetizar la metodología planteada en un código fuente basado en un lenguaje de programación compatible con plataformas de desarrollo Open Source. Como tercera etapa, se propone diseñar los bloques de acondicionamiento y digitalización de las señales de voltaje y corriente adquiridas. Y como cuarta etapa, se propone realizar una validación del sistema completo (hardware, firmware y software) con un instrumento de referencia.

Palabras claves— calidad de energía eléctrica, distorsión armónica total, factor de potencia, triángulo de potencias, open source, adquisición de datos.

ABSTRACT

In this project is performed the design and validation of an analyzer of power quality of a three-phase, with the capacity of data transmission through Ethernet connection for recording and display of electrical parameters. For its development, it aims to fulfill four basics steps: first, to define the methodology for determining an electric parameter from the analytic point of view. As a second step, it is proposed to synthesize the methodology proposed in source code based on a programming language that supports Open Source development platforms. As a third step, is proposed to design the blocks of conditioning and digitizing the voltage and current signals acquired. And fourth step, it is proposed to perform a validation of the complete system (hardware, firmware and software) with a reference instrument.

Keywords— power quality, total harmonics distortion, power factor, triangle of powers, open source, data acquisition.

INTRODUCCIÓN

Se define como calidad de energía eléctrica a las variaciones permitidas de la forma de onda senoidal de voltajes y corrientes, y de frecuencia constante en una línea de distribución de energía.

La calidad de la energía eléctrica constituye un factor determinante para el consumo de energía en los sectores industriales y de servicios, la falta de este genera problemas como pérdidas económicas en los bienes de producción, repercutiendo en el aumento de gastos de operación y mantenimiento, por tanto es necesario disponer de un sistema de análisis de calidad de energía con el objetivo de que la industria conozca el estado actual de su sistema de distribución de energía.

La evaluación de una red eléctrica requiere de un reglamento, normalización y metodología que logre mejorar el nivel de calidad de energía otorgados por organismos de normalización y estándares como son: The International Electrotechnical Commission (IEC) en su norma IEC 601000-4-30, el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) en su norma EN-50160, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) en su estándar IEEE 1159-1995 y como organismo nacional de control y vigilancia el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) con la Regulación 004/01.

Para las buenas prácticas de calidad de energía eléctrica y eficiencia energética, es importante implementar equipos analizadores de calidad para el monitoreo y medida de parámetros de calidad en redes eléctricas basados en normas internacionales mencionadas con anterioridad.

Los equipos analizadores de calidad de energía de mercado poseen un costo nominal alto como para que la industrias inviertan en este tipo de equipos para monitorear los puntos críticos de su sistema de distribución de energía, así también se abstrae que estos puntos críticos se encuentran dispersos en las instalaciones del campus industrial, para lo cual se requeriría centralizar la información de interés. Es por estas razones principales que el presente trabajo tiene como objetivos diseñar un analizador de calidad de energía eléctrica basado en plataformas libres de desarrollo y adicional a ello con capacidad de transmisión de datos y registro remoto de información.

El primer capítulo describe la importancia de la calidad de energía eléctrica, factores que influyen en la eficiencia energética, y, normas nacionales e internacionales que establecen requisitos que deben cumplir los sistemas de gestión de energía.

En el segundo capítulo se detalla el estudio de los fundamentos teóricos y análisis matemático para la implementación del proyecto.

En el tercer capítulo se realiza la implementación de las metodologías para la determinación de parámetros de calidad tanto en hardware, software y firmware en la plataforma Arduino, y el sistema de monitoreo remoto desarrollado en LabVIEW.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presenta las pruebas y resultados experimentales del proceso de validación del analizador de calidad de energía eléctrica con respecto al instrumento de referencia Fluke 434.

OBJETIVOS

Objetivo General

Sintetizar metodologías y validar algoritmos para un analizador de calidad de energía eléctrica que permita monitorear y registrar parámetros de calidad eléctrica de una red trifásica, que posea capacidad de transmisión de datos mediante comunicación Ethernet, y, que sea de bajo coste.

Objetivos Específicos

- Definir las metodologías y algoritmos para la determinación de parámetros de calidad de energía eléctrica.
- Implementar los algoritmos para la determinación de parámetros de calidad de energía, en plataformas de desarrollo Open Source.
- Diseñar e implementar los módulos de acondicionamiento de señales de voltaje y corriente, según los rangos a medir.
- Validación del instrumento analizador de calidad de energía mediante un instrumento de referencia.

CAPÍTULO I

1. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA (CEE)

1.1. Introducción

La energía eléctrica es uno de los desarrollos tecnológicos más importantes que alcanzó la humanidad, siendo el principal propulsor para el comienzo de una nueva era de desarrollo tecnológico, y que seguirá siendo la base para alcanzar muchas otras cumbres científicas en el bienestar humano, que nunca antes se había imaginado.

El consumo de energía eléctrica crece de forma considerable en la actualidad debido al desarrollo tecnológico y la demanda de consumo de estas tecnologías, que sin duda, nos ha convertido en consumidores totalmente inherentes. Sin ella, difícilmente podemos imaginar los niveles de progreso y confort que el mundo ha alcanzado.

A consecuencia del uso masivo de: equipamiento electrónico, sistemas de iluminación basados en Lámparas Fluorescentes Compactas (LPC), y, sistemas de iluminación basadas en tecnología LED, la calidad de energía eléctrica se ve afectada por el comportamiento no lineal que poseen estas cargas, forzando de esta manera, a distorsiones de las señales, generación de transitorios que afectan tanto a la empresa distribuidora como a las empresas consumidoras de energía.

Como solución a los problemas de calidad en una red eléctrica, es fundamental tomar conciencia de la necesidad de hacer uso más responsable de la energía eléctrica para satisfacer nuestras necesidades y demandas. Por ello, el buen uso de la energía eléctrica permite al sector empresarial ser más productivo y competitivos. El ahorro y la correcta utilización de la energía eléctrica conllevan a una alternativa confiable para reducir costos, mejorar la producción y competitividad.

En este capítulo se describe el estado del arte de la calidad de energía de una red eléctrica, describimos las causas y efectos, parámetros y variables de interés, normativa nacional e internacional que describen los índices de calidad de energía eléctrica recomendados.

1.2. Importancia de la calidad de energía eléctrica

En la actualidad el término calidad de energía eléctrica tiene un grado de indefinición, debido a la diversidad de usos y aplicaciones de la energía eléctrica. Según estándares internacionales y de normalización, definen a la calidad de energía en términos generales. Por ejemplo el estándar IEC 61000-4-30 la define como “las características de la electricidad en un punto dado sobre un sistema eléctrico, evaluados con respecto a un conjunto de parámetros técnicos de referencia”, aunque las mencionadas características deben

obtenerse mediante procedimientos de medida normalizados, con el objetivo de obtener resultados fiables, repetibles y compatibles a un conjunto de parámetros de referencia, mientras que el estándar IEEE 1159-1995 define a la calidad de energía como “una gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica”.

Por lo tanto, en términos generales, la calidad de energía eléctrica es un término que se refiere a las variaciones permitidas de la forma de onda senoidal de voltajes y corrientes en líneas de distribución de energía. Así calidad de energía eléctrica es frecuentemente usada para expresar calidad de voltaje, calidad de corriente, confiabilidad del servicio, calidad de suministro eléctrico, entre otros. [5].

En la actualidad el estudio de calidad ha adquirido mucha importancia y tal vez la razón principal es la búsqueda del aumento de la eficiencia energética basada en el anterior concepto, y así converger en una interrelación entre calidad, eficiencia y productividad.

Entonces, la importancia de la calidad de energía eléctrica es el resultado de una atención continua, lo cual conlleva a obtener beneficios para las empresas distribuidoras y consumidoras, entre los principales se cita los siguientes:

- Aumento de la vida útil de los equipos eléctricos.
- Mayor eficiencia y funcionalidad en los equipos eléctricos.
- Menor riesgos de fallas, lo cual aumenta la productividad, disminuye gastos y tiempos muertos invertidos en reparación.
- Disminución de gastos de mantenimiento.
- Disminución de riesgos de demandas y multas [1]

Cada uno de estos beneficios tiene la facultad de garantizar confiabilidad y seguridad en el sector consumidor, el cual puede ser del tipo residencial, industrial y comercial.

1.3. Problemas de calidad de energía eléctrica

En términos de calidad de energía eléctrica, podemos decir que existe un problema cuando ocurre cualquier desviación de tensión, corriente o frecuencia que provoque la mala operación de los equipos generando pérdidas financieras para el usuario consumidor.

1.3.1. Origen.

Múltiples factores influyen para que den origen al problema de calidad de energía eléctrica, estos factores son:

- Instalación de sistemas eléctricos y electrónicos altamente sensibles.
- Instalación de equipos sensibles en instalaciones no adecuadas u hostiles.
- Instalación de sistemas de protección inadecuados o inexistentes.
- Diseño inadecuado de las instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra.

En la mayoría de los casos, el origen del problema no surge de la funcionalidad o rendimiento de los equipos eléctricos y electrónicos, sino de otros tipos de eventos. Tales factores podemos mencionar:

- La naturaleza y origen de los eventos de potencia.
- Interferencias electromagnéticas externas.
- Efectos ocasionados por eventos externos en malas condiciones de operación, productividad o procesos.

Todas las anomalías se generan en fuentes internas o externas, que viajan por la instalación desde el origen hacia toda ella [3].

1.3.2. Clasificación.

Los problemas de calidad de energía se producen debido a los distintos tipos de perturbaciones eléctricas, la mayoría de las perturbaciones depende de la amplitud y/o frecuencia. Basado en la duración de la ocurrencia de las perturbaciones, los eventos pueden dividirse en perturbaciones de corto, mediano y largo plazo [5]. Las perturbaciones causan degradación de calidad de energía eléctrica y su clasificación incluye principalmente los siguientes eventos:

1.3.2.1. Interrupción bajo/sobre voltaje.

Son muy comunes estos tipos de perturbaciones, una interrupción ocurre cuando la tensión o la corriente de la carga disminuyen a menos de 0,1 p.u¹ por un período de tiempo que no excede un minuto, pueden ser el resultado de fallas en el sistema, equipos averiados o debidas al mal funcionamiento de los sistemas de control. Las interrupciones se caracterizan por su duración ya que la magnitud de la tensión es siempre inferior al 10% de su valor nominal [8]. Los eventos bajo voltaje y sobre voltaje son caídas y elevaciones del nivel de tensión con respecto a la tensión nominal, a un nivel inferior al 90% y superior al 110% por una duración mayor a un minuto [8]. A veces son permisibles a pocos porcentajes, pero cuando pasan los límites, se trata como perturbaciones [5].

¹ p.u = Valor por unidad, representa el porcentaje de la tensión base, lo que equivale a decir que p.u. y % son equivalentes en relación a la base seleccionada

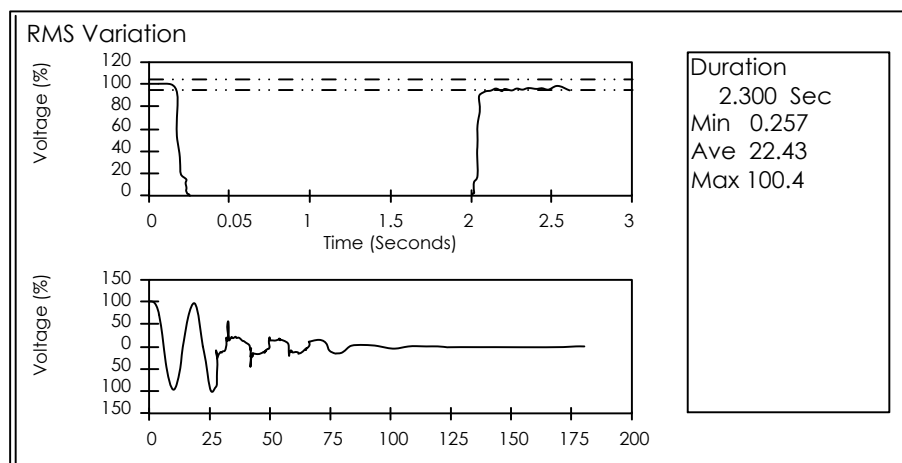


Figura 1.1. Interrupciones.

Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995.

1.3.2.2. Desbalance de voltaje.

El desbalance de voltaje en un sistema eléctrico ocurre cuando las tensiones entre las tres líneas no son iguales y puede ser definido como la desviación máxima respecto al valor promedio de las tensiones de línea, dividida entre el promedio de las tensiones de línea, es un parámetro expresado en porcentaje. También puede ser definido usando componentes simétricas, como la relación de la componente de secuencia cero o la componente de secuencia negativa entre la componente de secuencia positiva, expresada en porcentaje [8].

Las fuentes más comunes del desequilibrio de tensiones son las cargas monofásicas conectadas en circuitos trifásicos, los transformadores conectados en delta abierto, fallas de aislamiento en conductores no detectadas. Se recomienda que el desequilibrio de tensiones sea menor al 2% [8].

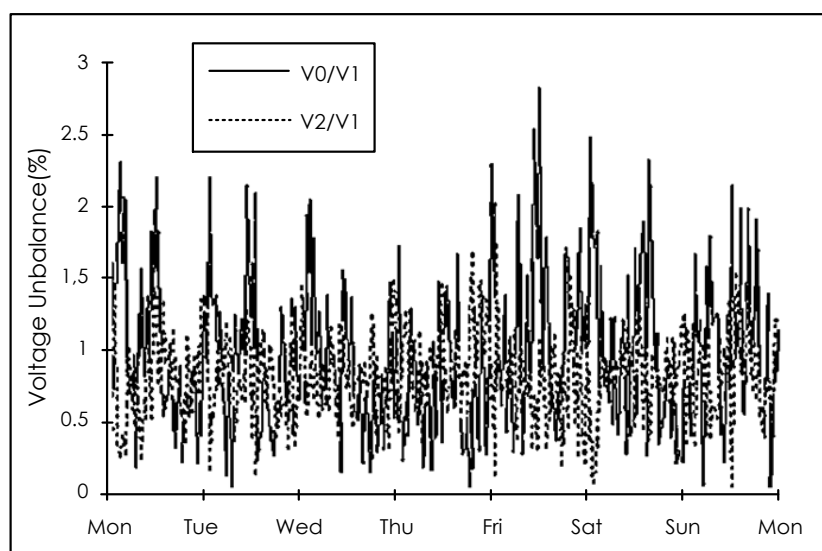


Figura 1.2. Desequilibrio de tensiones.

Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995.

1.3.2.3. Armónicos.

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales cuya frecuencia es un múltiplo integral de la frecuencia fundamental del sistema, para nuestro caso es de 60 Hz [8]. Existen varias razones para la generación de armónicos como cargas no lineales, dispositivos semiconductores, ordenadores, controladores etc. Los armónicos se clasifican como armónicos enteros, sub-armónicos e inter-armónicos [5].

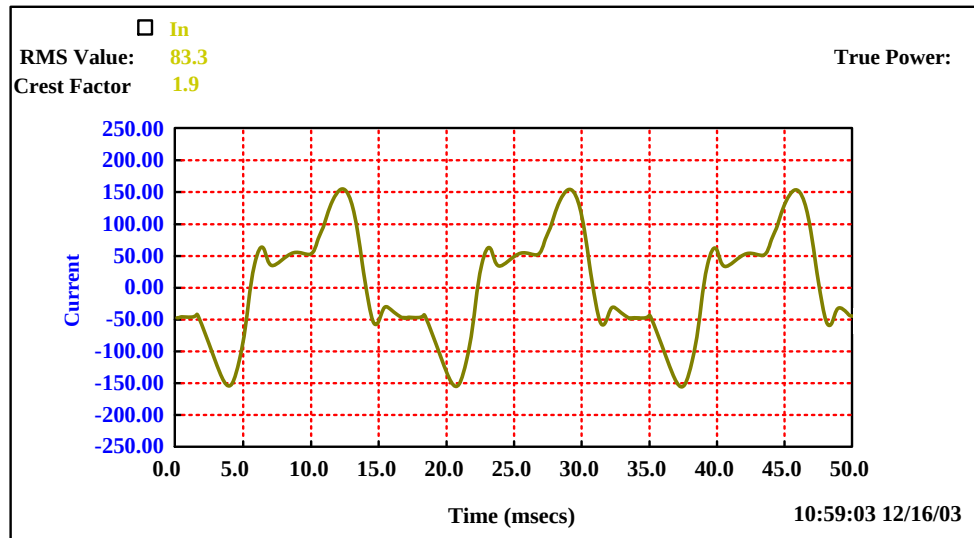


Figura 1.3. Corriente armónica.

Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995.

1.3.2.4. Transitorios.

Es un cambio súbito y unidireccional (positivo o negativo) en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos, y, de frecuencia diferente a la frecuencia del sistema de potencia [8].

Son de moderada y elevada magnitud pero de corta duración, medida en microsegundos. Normalmente están caracterizados por sus tiempos de ascenso (1 a 10 μ s) y descenso (20 a 150 μ s) y por su contenido espectral [8].

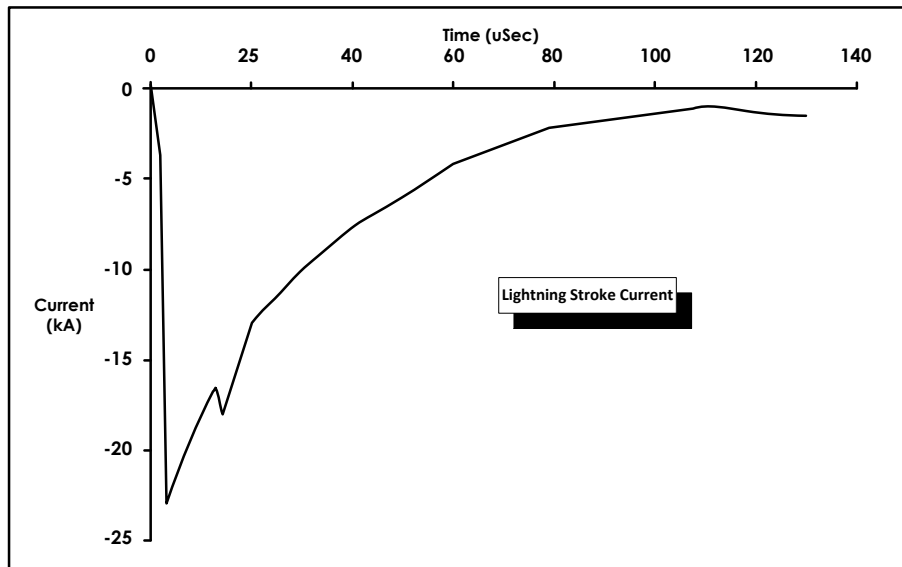


Figura 1.4. Transitorios impulsivos.

Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995.

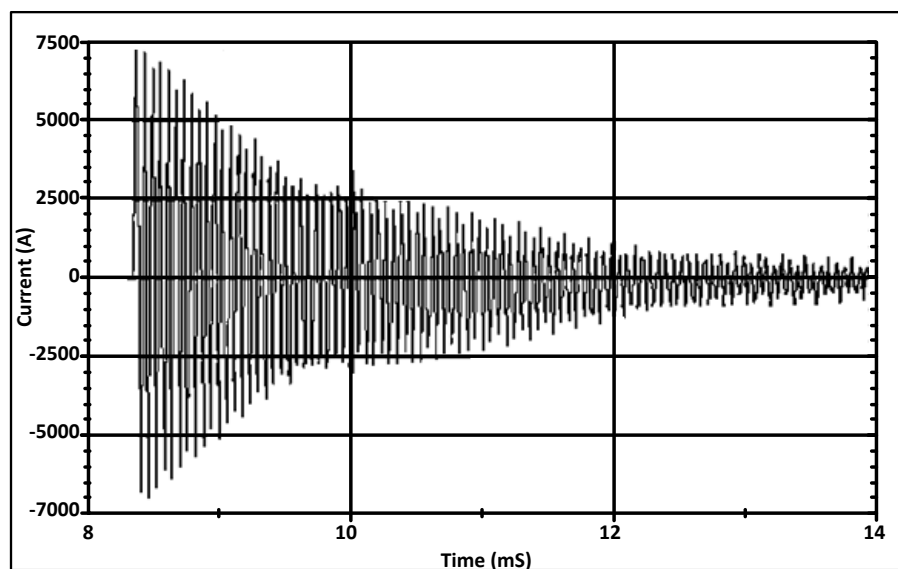


Figura 1.5. Transitorios oscilatorios.

Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995.

1.3.2.5. Fluctuaciones de tensión (Flicker).

Las fluctuaciones de tensión son variaciones sistemáticas de la envolvente de la tensión, o, una serie de cambios aleatorios de la tensión cuya magnitud no excede normalmente los rangos de tensión especificados por la American National Standards Institute (ANSI) en su norma ANSI C84.1 [8].

Tabla 1.1. Tolerancia para las Tensiones de acuerdo a la Norma ANSI.

Valor Nominal (Vac)	Rango Deseable (Vac)	Rango Aceptable (Vac)
120	126-114	127-110
208	218-197	220-191
240	252-228	254-220
277	291-263	293-254
480	504-456	508-440
2400	2525-2340	2540-2280
4160	4370-4050	4400-3950
4800	5040-4680	5080-4560
13800	14490-13460	14520-13110
34500	36230-33640	36510-32780

Fuente: Tomado de Norma ANSI C84.1.

Las cargas que muestran variaciones rápidas y continuas de la magnitud de la corriente pueden causar variaciones de tensión que son frecuentemente denominadas “flicker” [8].

El término flicker se deriva del impacto de las fluctuaciones de tensión en las lámparas al ser percibidas por el ojo humano como titilaciones [8].

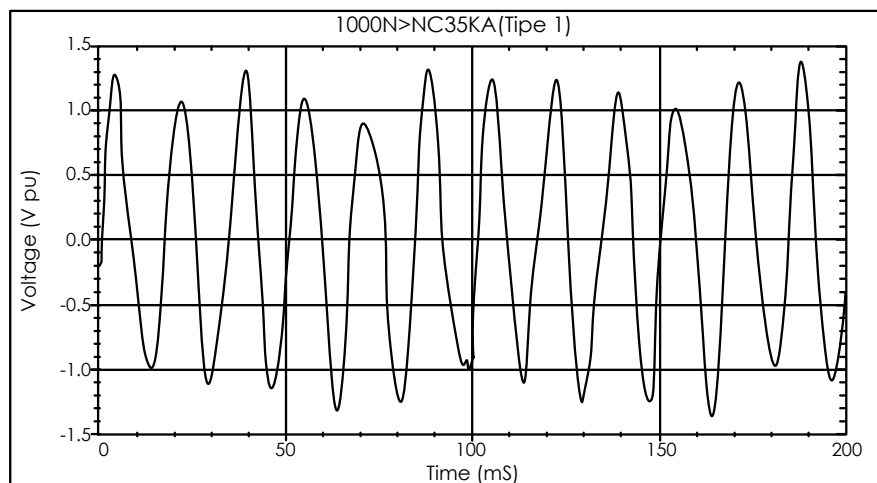


Figura 1.6. Fluctuaciones de tensión (Flicker).

Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995.

1.4. Normativas de calidad de energía eléctrica

Las normas y estándares aplicables a la calidad de energía eléctrica han sido proporcionadas por diferentes organismos técnicos como IEEE, ANSI, IEC, CENELEC, etc.

1.4.1. Norma IEC 61000-4-30.

La IEC 61000-4-30, tiene por objetivo principal la descripción de los métodos de medición de un gran número de parámetros de calidad de energía para hacer posible la obtención de información y resultados confiables, reproducibles y comparables, más allá del instrumento específico compatible con las prestaciones requeridas y de las condiciones ambientales. Además se focaliza en la metodología de mediciones in-situ [11].

Los parámetros de calidad de energía eléctrica a los que hace referencia son de naturaleza conductiva, correspondiente a la tensión y corriente de los sistemas eléctricos [11]:

- Frecuencia fundamental de red
- Magnitud RMS de tensión y corriente
- Interrupciones, sobretensiones y subtensiones
- Desbalance de tensión
- Flicker de tensión (Pst^2 y Plt^3)
- Transitorios de tensión
- Armónicos de tensión y corriente
- Inter-armónicos de tensión y corriente
- Índices de distorsión armónica total de tensión y corriente
- Tensiones de señalización
- Cambios rápidos de estabilidad de tensión.

La IEC 61000-4-30, expone especificaciones de performance sobre las mediciones y resultados obtenidos, pero no es una especificación de diseño del instrumento. Tampoco fija los umbrales de calidad de las magnitudes a medir. Distingue dos categorías de instrumento que denomina Clase A y Clase B [11].

- **Clase A:** Es el requerimiento de medida más exigente y se debe utilizar cuando sean necesarias medidas precisas. Por ejemplo, en aplicaciones de tipo contractual, para verificar el cumplimiento de normas, para dirimir disputas, etc.
- **Clase B:** El nivel de exigencia en la medida es menor. Resulta adecuado para realizar diagnosis o hacer un seguimiento de la calidad eléctrica en una instalación, etc.

² Pst. Índice de severidad de flicker de corto plazo, representa la variación de amplitud del voltaje en una duración de 10 minutos.

³ Plt. Índice de severidad de flicker de largo plazo, representa la variación de amplitud del voltaje del promedio cubico de 12 valores Pst continuos. Su medida equivale un intervalo de 2 horas. Tanto el Pst y el Plt son unidades de medida sin dimensiones.

En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de los criterios de medida establecidos por la norma IEC 61000-4-30.

Tabla 1.2. Parámetros de calidad eléctrica según IEC 61000-4-30.

Parámetro	Medida	Clase A		Clase B
		Intervalo	Exactitud	Procedimiento y exactitudes
Frecuencia	Hz	10 s	$\pm 10\text{mHz}$	A especificar por el fabricante
Tensión de alimentación	Vrms	10 ciclos	$\pm 0.1\%$	A especificar por el fabricante
Flicker	Plt	IEC 61000-4-15		A especificar por el fabricante
Huecos, sobretensiones, interrupciones	Vrms, t, T	Vrms ½ ciclo (10 ms)	$\pm 0.2\%$	Vrms ½ ciclo
Desequilibrio	%desequilibrio	Método de las componentes simétricas		A especificar por el fabricante
Armónicos e Interarmónicos	THD, Armónicos, Interarmónicos	IEC 61000-4-7		A especificar por el fabricante
Transmisión de señales	Vrms	Medida de interarmónicos (para $f > 3\text{kHz}$ ver IEC 61000-3-8)		A especificar por el fabricante
Flagging (advertencia de posible medida incorrecta por efecto de un hueco, sobretensión, o interrupción)	Aviso en Pantalla	Requerido en las medidas de frecuencia, tensión, flicker, desequilibrio, armónicos e interarmónicos		No requerido
Sincronización horaria		A través de reloj externo, por GPS, etc.		A especificar por el fabricante

Fuente: <http://www.isotest.es/web/Soporte/Formacion/REGLAMENTOS/Normas%20PQ.pdf>.

1.4.2. Norma EN-50160.

Esta norma describe, en el punto de entrega al cliente, las características principales de la tensión suministrada por una red general de distribución en baja tensión (hasta 1 kV) y en media tensión (desde 1 kV hasta 35 kV) en condiciones normales de explotación [12].

El objeto de esta norma es definir y describir los valores y límites de frecuencia, amplitud, forma de onda y simetría [12].

En la Tabla 1.2 se observa un resumen detallado de los valores límites en una alimentación de suministro eléctrico.

Tabla 1.3. Características de la alimentación en baja tensión según EN-50160.

Perturbación	Medida	Límites	Intervalos de evaluación	Porcentaje de medidas dentro de límites durante el intervalo
Frecuencia	Promedio de la frecuencia de cada ciclo durante 10 s	$\pm 1\%$	al año	99,5%
		+4%/-6%		100,0%
Variaciones de la tensión	Promedio del V_{AC} de cada ciclo durante 10 min	$\pm 10\%$	cada semana	99,5%
		+10%/-15%		100,0%
Variaciones rápidas de tensión	Número de eventos tipo escalón de tensión de hasta el 10% de U_N ⁴	Escalones del 5% de U_N son normales. Escalones del 10% de U_N pueden producirse varias veces al día		
Severidad del parpadeo	Plt (2 horas)	<1	cada semana	95%
Huecos de tensión	Número de eventos (con $U < 0,9U_N$)	De 10 a 1.000. La mayoría duran menos de 1 s y tienen una profundidad inferior al 60% de U_N	al año	
Interrupciones breves de la tensión	Número de eventos (con $U < 0,01U_N$ y $t < 3$ min)	De 10 a 1.000. El 70% de las interrupciones duran menos de 1 s	al año	
Interrupciones largas de la tensión	Número de eventos (con $U < 0,01U_N$ y $t > 3$ min)	De 10 a 50	al año	
Sobretensiones (50 Hz)	Número de eventos (con $U > 1,1U_N$ y $t > 10$ ms)	Generalmente no sobrepasan los 1,5 kV _{AC}		
Sobretensiones transitorias	Número de eventos (con $U > 1,1U_N$ y $t < 10$ ms)	Generalmente no sobrepasan los 6 kV de cresta		
Desequilibrio de la tensión	Promedio de la U_{inv}/U_{dir} de cada ciclo durante 10 min	<2%	cada semana	95%
Tensiones armónicas	Para cada armónico i, promedio de la U_i/U_N en cada ciclo durante 10 min		cada semana	95%
	Promedio del THD de la tensión referido a U_N en cada ciclo durante 10 min	<8%	cada semana	95%
Tensiones interarmónicas	Por estudiar			
Transmisión de señales	Tensión eficaz de la señal transmitida promediado en 3 s		cada día	99%

Fuente: <http://www.isotest.es/web/Soporte/Formacion/REGLAMENTOS/Normas%20PQ.pdf>

⁴ U_N = Valor de tensión nominal.

1.4.3. Estándar IEEE 1159-1995.

El estándar IEEE 1159-1995 define siete categorías distintas de fenómenos electromagnéticos en las redes eléctricas: transitorios, variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, desequilibrio de la tensión, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia [14].

Tabla 1.4. Límites de las categorías de fenómenos electromagnéticos según IEEE 1159-1995.

No.	Categorías	Contenido espectral tropical	Duración típica	Magnitud de tensión típico
1.0	Transitorios			
1.1	Impulsos			
1.1.1	Nanosegundos	5 ns de elevación	<50 ns	
1.1.2	Microsegundos	1 µs de elevación	50 ns-1 ms	
1.1.3	Milisegundos	0.1 ms de elevación	>1 ms	
1.2	Oscilatorios			
1.2.1	Baja frecuencia	<5 kHz	0.3 -50 ms	0-4 p.u
1.2.2	Frecuencia media	5-500 kHz	20 µs	0-8 p.u
1.2.3	Alta frecuencia	0.5-500 MHz	5 µs	0-4 p.u
2.0	Variaciones de corta duración			
2.1	Instantánea			
2.1.1	Hueco		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 p.u
2.1.2	Swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 p.u
2.2	Momentánea			
2.2.1	Interrupción		0.5 ciclos – 3s	< 0.1 p.u
2.2.2	Hueco		30 ciclos – 3s	0.1 – 0.9 p.u
2.2.3	Swell		30 ciclos – 3s	1.1 – 1.4 p.u
2.3	Temporal			
2.3.1	Interrupción		3s – 1min	< 0.1 p.u
2.3.2	Hueco		3s – 1min	0.1 – 0.9 p.u
2.3.3	Swell		3s – 1min	1.1 – 1.2 p.u
3.0	Variaciones de larga duración			
3.1	Interrupción sostenida		> 1 min	< 0.0 p.u
3.2	Bajada de tensión		> 1 min	0.8 – 0.9 p.u
3.3	Sobretensión		> 1 min	1.1 – 1.2 p.u
4.0	Desbalance de voltaje		Estado estable	0.5-2%
5.0	Distorsión de forma de onda			
5.1	Componente de directa		Estado estable	0-0.1%
5.2	Contenido armónico	0-100 kHz	Estado estable	0-20%
5.3	Interarmónicos	0-6 kHz	Estado estable	0-2%
5.4	Muesca de voltaje		Estado estable	
5.5	Ruido		Estado estable	0-1%
6.0	Fluctuaciones de voltaje	<25 Hz	Intermitente	0.1-7%
7.0	Variaciones en la frecuencia		<10 s	

Fuente: http://gcep.stanford.edu/pdfs/iq9bO_1lb0rRuH_ve0A2jA/Santoso-20071101-GCEP.pdf

1.5. Calidad de energía eléctrica en el Ecuador

Para garantizar a los consumidores un suministro eléctrico continuo y confiable, fue necesario dictar reglamentos relacionados con los estándares mínimos de calidad y procedimientos técnicos de medición y evaluación a los que deben someterse las empresas distribuidoras del servicio eléctrico, los mismos que fueron aprobados y emitidos por el CONELEC, nos referimos a la Regulación 004/01 [6], [9].

Por lo tanto el CONELEC con esta regulación, controla y vigila a las empresas eléctricas distribuidoras de energía en el Ecuador, que comprende los siguientes apartados de calidad:

1.5.1. Calidad del producto.

La calidad del producto técnico, las magnitudes que se controlarán son el nivel de voltaje, las perturbaciones y el factor de potencia, siendo el distribuidor el responsable de efectuar las mediciones correspondientes, el procedimiento de los datos levantados, la determinación de las compensaciones que pudieran corresponder a los consumidores afectados y su pago a los mismos. Toda la información deberá estar a disposición del CONELEC al momento que se le requiera [9].

1.5.2. Calidad del servicio técnico.

La calidad del servicio técnico prestado se evaluará sobre la base de la frecuencia y la duración total de interrupción [9].

Durante la Subetapa 1⁵ se efectuarán controles en función a Índices Globales para el distribuidor, discriminando por empresa y por alimentador de media tensión. El levantamiento de información y cálculo se efectuará de forma tal que los indicadores determinados representen en la mejor forma posible la calidad y el tiempo total de las interrupciones que efectúen a los consumidores. Para los consumidores con suministros en media tensión o en alta tensión, se determinarán índices individuales [9].

En la Subetapa 2⁶ los indicadores se calcularán a nivel de consumidor, de forma tal de determinar la cantidad de interrupciones y la duración total de cada una de ellas que afecten a cada consumidor [9].

⁵ Subetapa 1: A fin de exigir a los distribuidores adecuarse a las exigencias de calidad del servicio, este control tiene una duración de 24 meses.

⁶ Subetapa 2: tendrá su inicio a la finalización de la Subetapa 1, con una duración indefinida.

El periodo de control será anual, por tanto, los distribuidores presentarán informes anuales al CONELEC, especificando las interrupciones y los índices de control resultantes; sin embargo, los cálculos de los índices de calidad se efectuarán para cada mes del año considerado y para el año completo [9].

1.5.3. Calidad del servicio comercial.

Las empresas eléctricas de distribución tienen la obligación de proveer, además del suministro de la energía eléctrica, un conjunto de servicios comerciales relacionados, necesarios para mantener un nivel adecuado de satisfacción a los consumidores [9].

La calidad del servicio comercial al consumidor debe ser cumplida por el distribuidor, respetando los siguientes parámetros:

- **Niveles individuales de calidad comercial:** Son aquellos vinculados con las prestaciones garantizadas a cada consumidor.
- **Niveles globales de calidad comercial:** Se corresponden con metas de calidad para todo el distribuidor [9].

En base al análisis bibliográfico realizado, en el siguiente capítulo se determinará los parámetros de calidad de energía en los cuales se centrará el presente proyecto, así como también se plantearán las metodologías y ecuaciones matemáticas que permitan cuantificar los parámetros de calidad de energía eléctrica, para luego ser sintetizadas en algoritmos automáticos de cálculo.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD

2.1. Introducción

La calidad de energía eléctrica se enfoca en realizar tareas de adquisición de variables, procesamiento de datos y análisis de los parámetros obtenidos para así obtener criterios de calidad sobre una instalación eléctrica, y de acuerdo a estos resultados, emitir procedimientos para la prevención, identificación y solución de problemas.

De acuerdo al análisis realizado en el capítulo anterior respecto a calidad de energía eléctrica, tipos de perturbaciones en redes eléctricas y normativas de calidad de energía eléctrica. Se establece realizar el dimensionamiento de ecuaciones matemáticas que permitan cuantificar parámetros eléctricos y sustentar el desarrollo de los módulos firmware y software, que forman parte del analizador de calidad de energía eléctrica propuesto en el presente proyecto.

En el presente proyecto se abordará las siguientes magnitudes, consideradas como principales:

- Voltaje eficaz por fase.
- Corriente eficaz por fase.
- Potencia activa por fase.
- Potencia aparente por fase.
- Potencia reactiva por fase.
- Factor de potencia por fase.
- Distorsión armónica total de voltaje (THDv) por fase.
- Distorsión armónica total de corriente (THDi) por fase.

En base a las magnitudes objetivo, citadas anteriormente, en el presente capítulo se realiza el análisis matemático para los cálculos correspondientes.

Para el cálculo matemático de THD de voltaje y corriente, y en base a investigación bibliográfica se decidió realizar el análisis hasta el 7mo armónico; la razón principal es que en redes eléctricas, las amplitudes armónicas más significativas son aquellas generadas por cargas no lineales, estos armónicos más significativos son los de orden impar, especialmente los de 3er, 5to y 7mo orden, la causa de ello es la carga de base electrónica como son: equipos electrodomésticos, computadores, accionamientos, controladores de motores, y, transformadores.

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Valor efectivo de una forma de onda periódica.

El nivel de voltaje eficaz de un punto de interés en un sistema eléctrico es de 120 V como referencia; pero desde luego, no es el valor promedio de la señal, tampoco el valor instantáneo ni el valor máximo de su comportamiento senoidal, el cual es de la forma $v = V_m \text{sen}(\omega_o t)$ [16].

El valor efectivo de un voltaje de una fuente o un punto de medición en la red doméstica, es una medida de su efectividad de entregar potencia a un resistor de carga [16]. El concepto de valor efectivo se deriva de la conveniencia de contar con un voltaje (o corriente) senoidal que entregue a un resistor de carga la misma potencia promedio que un voltaje (o corriente) equivalente en DC [16]. Para determinar el V_{ef} (o I_{ef}) en DC que entregue la misma potencia promedio a un resistor que la que entregaría una fuente que varía periódicamente, como se muestra en la figura 2.1, está determinada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) R dt \quad \text{Ec. (2.1)}$$

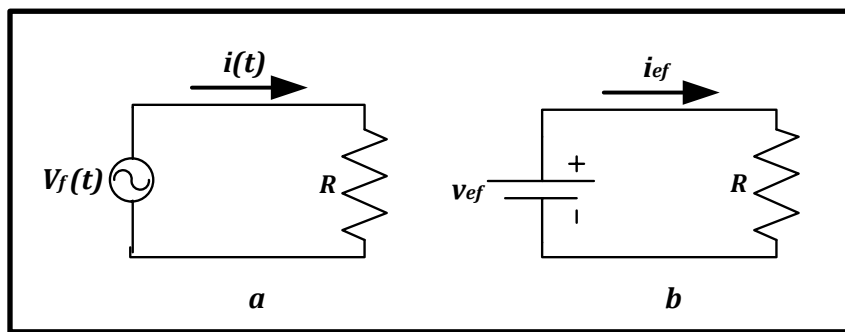


Figura 2.1. Circuitos para la definición de valores eficaces.

Fuente: Tomado del libro Circuitos Eléctricos de Dorf Svoboda.

El periodo de integración está definida dentro de un tiempo T de la señal. En la figura 2.1b se define que la potencia entregada por una corriente directa es:

$$P = I_{ef}^2 R \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde el valor de I_{ef} se define como una variable estable tan efectiva al momento de entregar potencia como la corriente que varía periódicamente en una carga [16].

$$I_{ef}^2 R = \frac{R}{T} \int_0^T i^2(t) dt$$

$$I_{ef} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right)^{1/2} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Por lo tanto la corriente efectiva (I_{ef}) en una carga, es el valor medio cuadrático (I_{RMS}) de la corriente.

Por definición, el valor efectivo de una corriente es la corriente estable (CD) que transfiere la misma potencia promedio que la corriente variable determinada [16].

$$I_{ef} = I_{RMS} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cos^2(\omega_0 t) dt \right)^{1/2} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Desde luego, el valor efectivo del voltaje en un circuito se la obtiene de una forma similar a la corriente.

$$V_{ef} = V_{RMS} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T V_m^2 \cos^2(\omega_0 t) dt \right)^{1/2} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

2.2.2. Potencia instantánea y potencia promedio.

Considerando el elemento resistivo del circuito que se muestra en la figura 2.1a, obsérvese que el voltaje y la corriente en el elemento se ajustan a la convención pasiva [16].

La potencia instantánea entregada a este elemento es el producto del voltaje $v(t)$ y la corriente $i(t)$, de tal modo que:

$$p(t) = v(t) i(t) \quad \text{Ec. (2.6)}$$

El valor promedio de una función periódica es la integral de la función en un periodo compuesto, dividida por el periodo [16]. Por lo tanto la potencia promedio se define como el valor medio de la potencia instantánea y está dada por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad \text{Ec. (2.7)}$$

2.2.3. Coeficientes y series de Fourier.

Se define la tensión armónica como “una tensión senoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación en el sistema” [21].

Una forma de onda senoidal está compuesta por la suma de ondas senoidales (armónicos), teniendo en cuenta que la frecuencia correspondiente de cada armónico es un múltiplo de la frecuencia fundamental (en el caso de la red eléctrica, la frecuencia es 60 Hz) [20].

$$v(t) = V_0 + V_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + V_2 \text{sen}(2\omega_0 t + \phi_2) + \dots + V_k \text{sen}(k\omega_0 t + \phi_k)$$
$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \text{sen}(k\omega_0 t)) \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Para esta expresión V_0 constituye la amplitud de las componentes de corriente continua (valor medio de la función $v(t)$) [20]. Para la forma de onda en CA, V_0 es cero.

Las componentes a_k y b_k , son los coeficientes de la serie, son las componentes rectangulares del k-ésimo armónico. El correspondiente k-ésimo vector armónico es:

$$V_k \angle \phi_k = a_k + j b_k \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Con una magnitud

$$V_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Y ángulo de fase

$$\phi_k = \tan^{-1} \left(\frac{b_k}{a_k} \right) \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Para una función dada $v(t)$, el coeficiente constante V_0 es

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = 0$$

Verificando los coeficientes de la serie

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad \text{Ec. (2.12)}$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \text{sen}(k\omega_0 t) dt \quad \text{Ec. (2.13)}$$

2.2.4. Distorsión armónica total (THD).

Distorsión armónica total (THD), es la relación de la sumatoria de potencias de los componentes armónicos con la potencia de la frecuencia fundamental [21].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_k (V_k)^2}}{V_1} * 100, \quad k = 2, 3, \dots, N. \quad \text{Ec. (2.14)}$$

El interés de encontrar cada distorsión armónica (HD) de una forma de onda, es utilizar la expresión siguiente

$$HD = \frac{V_k}{V_1} * 100 \quad \text{Ec. (2.15)}$$

En la red eléctrica, la frecuencia fundamental es de 60 Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,... orden natural de los números [21]. El segundo armónico tiene una frecuencia de 120 Hz, el tercer armónico posee una frecuencia de 180 Hz y así sucesivamente.

También se define como la relación que hay entre la frecuencia del armónico (f_k) y la frecuencia fundamental (f_1) [21].

$$k = \frac{f_k}{f_1} \quad \text{Ec. (2.16)}$$

Donde k es el orden del armónico.

- 3^a armónico $3 * 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$
- 5^a armónico $5 * 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$
- 7^a armónico $7 * 60 \text{ Hz} = 420 \text{ Hz}$

2.2.5. Teorema de valor medio para integrales.

En una señal senoidal de $v(t)$ o $i(t)$, es sencillo el cálculo del promedio de un conjunto de muestras dadas [18].

La función $v(t)$ definida en un intervalo de $0 \leq t \leq T$, compuesta en n sub-intervalos iguales, donde cada sub-intervalo posee una longitud $\Delta t = \frac{T-0}{N}$. Si t_n es un punto cualquiera del n -ésimo sub-intervalo, entonces el valor aritmético o medio de los valores de la función $v(t)$, viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_n = \frac{1}{N} [v(t_1) + v(t_2) + v(t_3) + \dots + v(t_N)]$$

$$V_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v(t_n) \quad \text{Ec. (2.17)}$$

Multiplicada y dividida por $(T - 0)$

$$\begin{aligned} V_n &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v(t_n) \frac{T - 0}{T - 0} \\ V_n &= \frac{1}{T - 0} \sum_{n=1}^N v(t_n) \frac{T - 0}{N} \\ V_n &= \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N v(t_n) \Delta t \end{aligned} \quad \text{Ec. (2.18)}$$

Donde esta expresión es una suma de Reimann⁷ para una función $v(t)$ en un intervalo $0 \leq t \leq T$.

Usando las formulas anteriores se puede calcular el valor medio de cualquier señal que tenga una forma de onda senoidal definida.

Tabla 2.1. Evaluación de la Integral de Reimann

$v(t)$	$v(t_n)$
$v^2(t)$	$v^2(t_n)$
$\int_0^T v^2(t) dt$	$\sum_{n=1}^N v^2(t_n) \Delta t$
$\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt$	$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(t_n)$

Fuente: Elaborado por el autor.

2.3. Análisis matemático de las variables eléctricas

A partir de los valores instantáneos de voltaje $v(t)$ y corriente $i(t)$ adquiridos del sistema eléctrico, se deducirá las expresiones matemáticas para cuantificar cada una de las variables eléctricas del sistema analizador de calidad de energía a implementar.

⁷ Reimann. La suma de Riemann es un método de integración numérica que sirve para calcular el valor de una integral definida, es decir, el área bajo una curva. Este método se lo utiliza cuando no es posible utilizar el teorema fundamental del cálculo.

2.3.1. Voltaje y corriente.

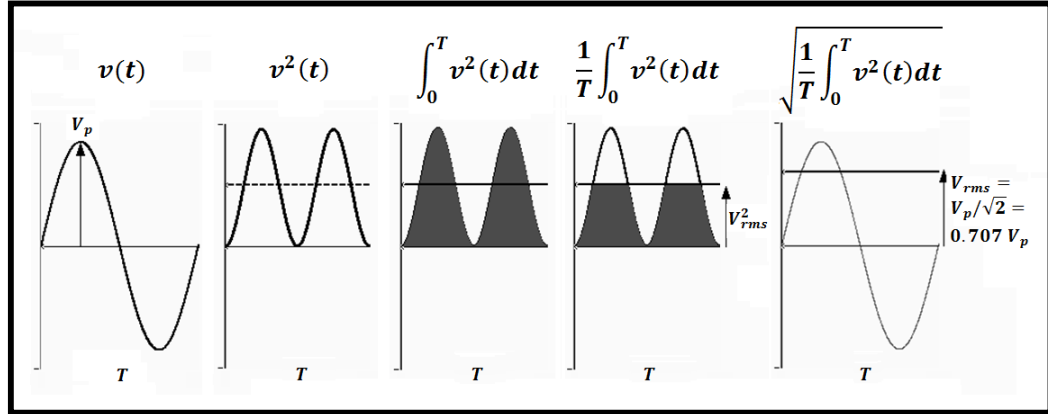


Figura 2.2. Valor eficaz o RMS de una señal de voltaje

Fuente: Elaborado por el autor.

Para el análisis del valor medio cuadrático de una señal $v(t)$ o $i(t)$, es importante que el promedio de una señal senoidal no sea cero, por lo que se considera los valores cuadrados de cada muestra en los intervalos correspondientes para ignorar el valor de cero. Para deducir su expresión se utilizará la ecuación 2.17.

$$\begin{aligned}
 V_{mean}^2 &= \frac{v^2(t_1) + v^2(t_2) + v^2(t_3) + \dots + v^2(t_N)}{N} \\
 V_{mean}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(t_n) \frac{T-0}{T-0} \\
 V_{mean}^2 &= \frac{1}{T-0} \sum_{n=1}^N v^2(t_n) \frac{T-0}{N} \\
 V_{mean}^2 &= \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N v^2(t_n) \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{Ec. (2.19)}$$

Según la ecuación 2.5 el cuadrado del valor medio es igual a la integral del cuadrado de la señal instantánea en un periodo de $0 \leq t \leq T$.

$$\begin{aligned}
 V_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \\
 \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^N v^2(t_n) \Delta t} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}
 \end{aligned}$$

Donde $\Delta t = \frac{T}{N}$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(t_n)} \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Desde luego, el cálculo del valor RMS de la corriente se obtiene con ayuda del mismo método.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i^2(t_n)} \quad \text{Ec. (2.21)}$$

2.3.2. Potencia promedio.

Para el cálculo de la potencia promedio o real, de dos señales periódicas se encuentra definida mediante la ecuación 2.7.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

Aplicando el mismo teorema de valor medio para integrales, la potencia promedio es obtenida de la siguiente forma:

$$P_{mean} = \frac{1}{N} [p(t_1) + p(t_2) + p(t_3) + \dots + p(t_N)]$$
$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p(t_n) \quad \text{Ec. (2.22)}$$

Por lo tanto la potencia real es el promedio de la potencia instantánea en un intervalo $0 \leq t \leq T$.

2.3.3. Potencia aparente.

La potencia compleja de un circuito de corriente alterna, es la suma vectorial de la potencia real (o potencia disipada por dicho circuito en calor o trabajo) y la potencia reactiva (o potencia utilizada para la formación de campos eléctricos y magnéticos de los componentes de dicho circuito).

Esto significa que la potencia aparente es la representación total de todo el circuito, por lo tanto está definida como:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \text{Ec. (2.23)}$$

$$S = \frac{I^* \cdot V}{2} \quad \text{Ec. (2.24)}$$

$$|S| = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad \text{Ec. (2.25)}$$

2.3.4. Potencia reactiva.

Es la potencia disipada por las cargas reactivas (bobinas y capacitores) en la red eléctrica alterna. Según el triángulo de potencias expresada en la ecuación 2.23, la potencia reactiva se define como:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad \text{Ec. (2.26)}$$

2.3.5. Factor de potencia.

El factor de potencia por desfase (o cos phi) de un circuito de corriente alterna es la relación entre la potencia real P , y la potencia aparente S .

$$f.d.p = \frac{P}{|S|} \quad \text{Ec. (2.27)}$$

$$f.d.p = \frac{V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cos(\phi_V - \phi_I)}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad \text{Ec. (2.28)}$$

$$f.d.p = \cos(\Phi) \quad \text{Ec. (2.29)}$$

2.3.6. Distorsión armónica total.

Una sumatoria de un conjunto de ondas senoidales fácilmente se la descompone usando la Transformada Discreta de Fourier (DFT) a partir de la ecuación 2.8.

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t))$$

Al evaluar los coeficientes a_k y b_k de la serie, mediante el teorema de valor medio para integrales, obtenemos dos expresiones en una sumatoria para la función $v(t)$ en el intervalo $0 \leq t \leq T$, para el armónico de orden k .

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(k\omega_0 t) dt = \frac{2}{T} \sum_{n=1}^N v(t_n) \cos(k\omega_0 t_n) \Delta t$$

Valor medio para el coeficiente a_k para N muestras

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N v(t_n) \cos(k\omega_0 t_n)$$

Por lo tanto para cada coeficiente a_k y b_k queda definida mediante la sumatoria de una función $v(t_n)$ en el orden del armónico correspondiente:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N v(t_n) \cos(k\omega_o t_n) \quad \text{Ec. (2.30)}$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N v(t_n) \sen(k\omega_o t_n) \quad \text{Ec. (2.31)}$$

Donde la amplitud de cada armónico está definida mediante la ecuación 2.10:

$$V_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

En conclusión, para la determinación de la distorsión armónica total, se utiliza la ecuación 2.14.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_k (V_k)^2}}{V_1} * 100, \quad k = 2, 3, \dots, N.$$

En el presente proyecto se contempla el cálculo de THD de las ondas de voltaje y corriente, tomando en cuenta los armónicos hasta $N = 7$.

CAPÍTULO III

3. IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

3.1. Introducción

Respecto al capítulo anterior, se describió los fundamentos teóricos y el análisis matemático para cada variable eléctrica establecida, se trata de metodologías necesarias para el desarrollo del proyecto.

El presente capítulo documenta la integración de los diferentes módulos que conforman el analizador, estos componentes van desde hardware, software y firmware.

Como un resumen del diseño realizado, el sistema consta de un módulo de adquisición de señales de voltaje y corriente para una red trifásica, el cual está constituido por transformadores de voltaje y corriente con sus respectivos circuitos de acondicionamiento. Además el diseño cuenta con módulos de sincronización de señales basados en circuitos PLL (Phase Locked Loop) encargados de generar señales de reloj con frecuencias enganchadas a las señales analógicas de entrada con el objeto de sincronizar señales y calcular los valores de THD de cada señal adquirida. Finalmente, y con el objetivo de monitorear gráficamente y registrar los datos, el diseño contempla con una aplicación de escritorio de visualización y registro de datos, desarrollada en el entorno de programación LabVIEW.

3.2. Diseño del hardware

Con el objetivo de cuantificar las variables eléctricas, el dispositivo contempla los componentes que realizan la adquisición y acondicionamiento de señales, componentes encargados del procesamiento de datos y transmisión de parámetros, y, por último se necesita del componente destinado a la visualización y registro de los parámetros obtenidos.

3.2.1. Diagrama de bloques.

El diagrama de bloques del sistema propuesto, se muestra en la figura 3.1. La descripción de cada módulo del diagrama de bloques, se detalla a continuación:

- 1) **Lazo seguidor de Fase PLL** (basado en OpAmps): Realiza la generación de señales de reloj a la misma frecuencia y fase de 90 grados de cada señal analógica, con el propósito de analizar la fuente de entrada, frecuencia de salida, voltajes y la distorsión armónica total (THD). El proceso del cálculo de THD es dependiente del sistema PLL.
- 2) **Procesamiento frecuencial** (basado en Arduino UNO): Realiza la lectura de las mediciones de los sensores, calcula las variables THD y frecuencia mediante las

señales generadas por cada sistema PLL de cada señal de analógica y realiza la transmisión de datos por puerto serial a la tarjeta Arduino MEGA 2560 (calidad de energía).

- 3) **Procesamiento de parámetros de energía** (basado en Arduino MEGA 2560): Realiza la lectura de las mediciones de los sensores, calcula las variables de voltaje y corriente RMS, potencias (activa, reactiva y aparente), y el factor de potencia de cada señal analógica, recibe los datos enviados por el Arduino UNO para enviar toda la información de las dos tarjetas a la tarjeta Arduino Ethernet Shield.
- 4) **Comunicación** (basado en Arduino Ethernet Shield): Permite enviar a través de un puerto Ethernet, en una sola trama, los parámetros determinados por los módulos de procesamiento frecuencial y procesamiento de parámetros de energía, a intervalos periódicos.

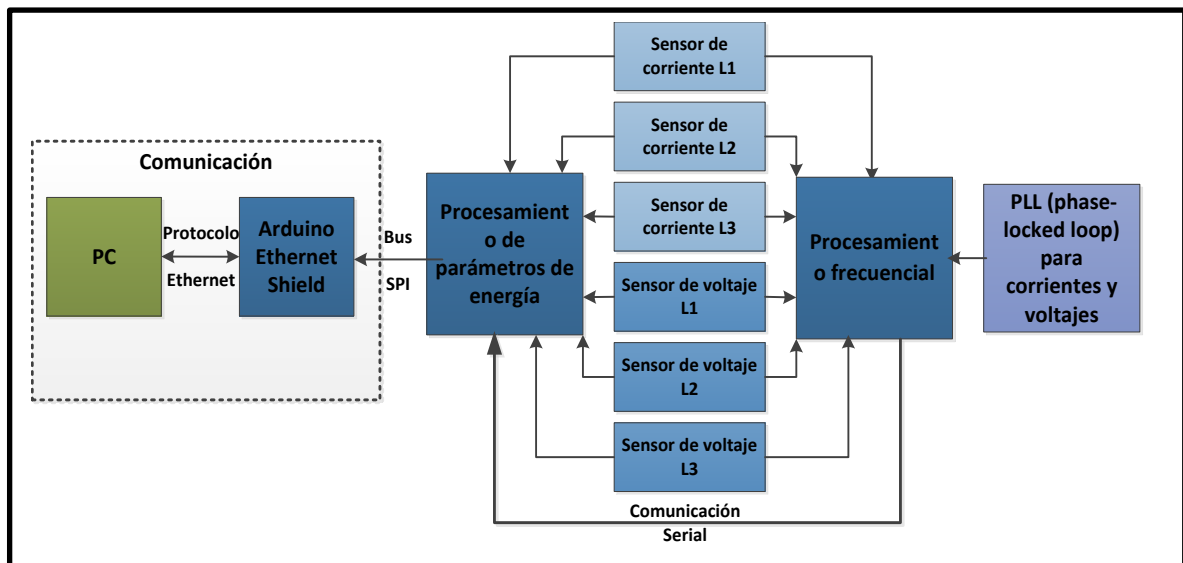


Figura 3.1. Diagrama de bloques del hardware.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.2.2. Hardware de acondicionamiento de señales.

Las señales adquiridas por los sensores se necesitan acondicionar a los niveles de voltaje aceptados por los módulos de procesamiento de datos para ello se necesita de circuitos analógicos de reducción de amplitud y desplazamiento de nivel de la señal original.

Este acondicionamiento debe aprovechar eficientemente el rango del sensor, de tal manera que el margen de la señal acondicionada debe coincidir con el rango de entrada del convertidor analógico a digital de los módulos de procesamiento.

3.2.2.1. Circuito de acondicionamiento de señal de voltaje.

El acondicionamiento de la señal de voltaje para las entradas del convertidor análogo-digital de los módulos de procesamiento, emplea un transformador reductor de voltaje, cuya relación de transformación es de 0.125, es decir una señal de salida de 21.21 V_P (15 Vrms) corresponde a una señal de entrada de 170 V_P (120 Vrms) de entrada, esta señal reducida de salida pasa por un divisor de voltaje para obtener un voltaje de 2.25 V_P, es así que el circuito completo tiene la siguiente equivalencia entre los voltajes de entrada y salida ($170V_{P_in} \Rightarrow 2.25V_{P_out}$) ó ($120V_{RMS_in} \Rightarrow 1.59V_{RMS_out}$). Sin embargo, el rango dinámico de la entrada al convertidor A/D de los módulos de procesamiento es unipolar, es decir solo acepta voltajes positivos entre 0V y 5V, por lo tanto se emplea otro divisor de voltaje para cambiar la referencia a 2.5V, con lo cual generamos un offset de desplazamiento de la señal atenuada, quedando una señal resultante que oscila entre 0.25 y 4.75 V.

La razón por la que se suma un componente de 2.5 V_{DC} es porque se necesita leer una onda senoidal cuya oscilación sea mayor que 0 V y menor que 5 V, ello se cumple si el valor medio de la señal es de 2.5 V_{DC}.

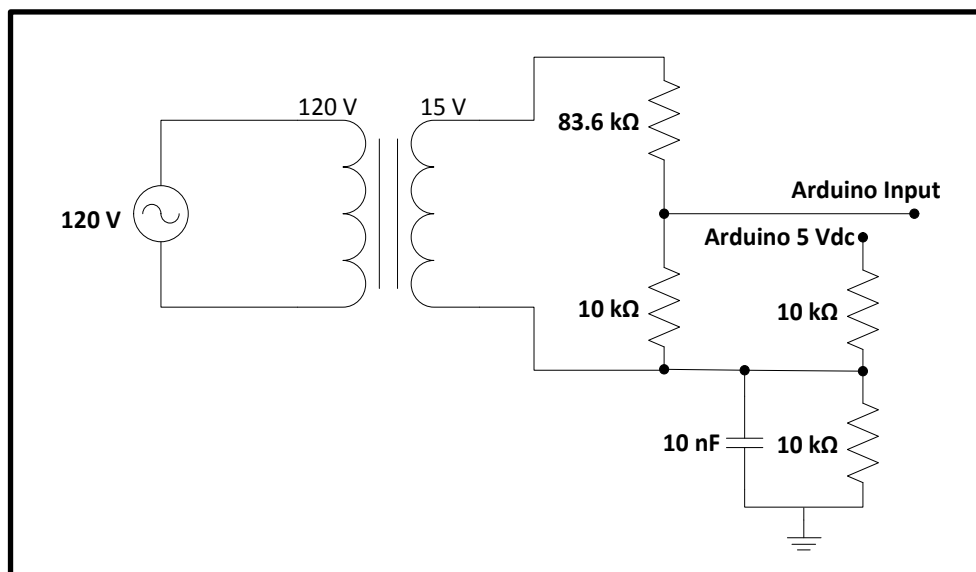


Figura 3.2. Circuito de acondicionamiento de la señal de voltaje.

Fuente: Diseño del autor.

3.2.2.2. Circuito de acondicionamiento de señal de corriente.

El circuito de acondicionamiento de la señal de corriente, adquirida por medio de una pinza amperimétrica, para adecuarla al rango de las entradas del convertidor análogo-digital de los módulos de procesamiento, está basado en un circuito reductor de amplitud en cascada con un circuito elevador de offset. Para adquirir la señal se usa una pinza

amperimétrica, cuya relación de transformación es de 3.7037×10^{-4} , la salida de dicho transformador es una señal de corriente por lo que es necesario transformarla a una señal de voltaje mediante la configuración de una resistencia shunt⁸. Al igual que el circuito de acondicionamiento de voltaje, también es necesario desplazar el valor medio de la señal senoidal de tal manera que el rango de niveles de voltaje resultantes sean compatibles con las características de los canales de entrada del conversor analógico-digital que forma parte de los módulos de procesamiento de señales.

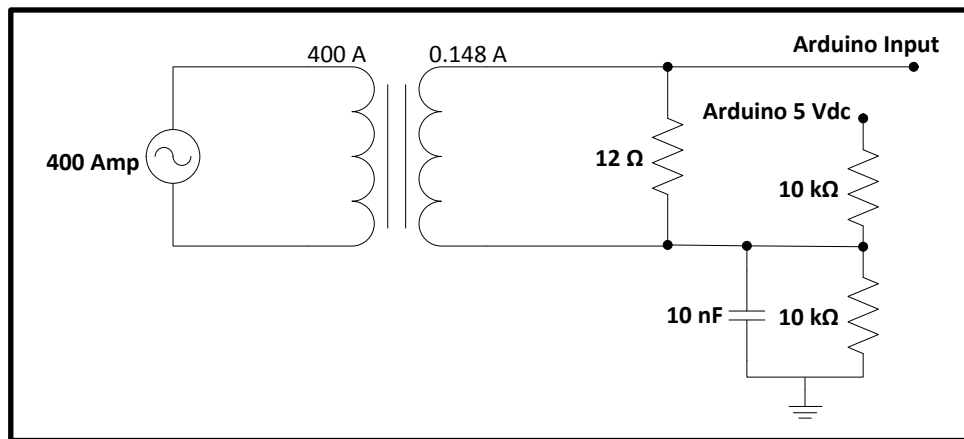


Figura 3.3. Circuito de acondicionamiento de la señal de corriente.

Fuente: Diseño del autor.

3.2.3. Circuito de lazo seguidor de fase.

Para el procesamiento frecuencial de las señales analógicas adquiridas y acondicionadas, se emplea el circuito de lazo seguidor de fase, donde la frecuencia o fase de la señal de salida es controlada por la frecuencia de la señal de entrada analógica. Su estructura básica está implementada con un detector de fase, oscilador de frecuencia y retroalimentación.

El propósito de este circuito es generar señales de reloj de entrada para una función de interrupción, temporizador y contador (Timer/Counter1) del módulo de procesamiento frecuencial para la captura exacta de 128 muestras por una onda completa de cada señal analógica, y así poder realizar con exactitud los cálculos de THD de cada señal adquirida.

⁸ Shunt: Es una carga resistiva a través de la cual se deriva una corriente eléctrica. Es aquella colocada en paralelo al circuito principal de medición para determinar la intensidad de la corriente eléctrica que fluye en la carga.

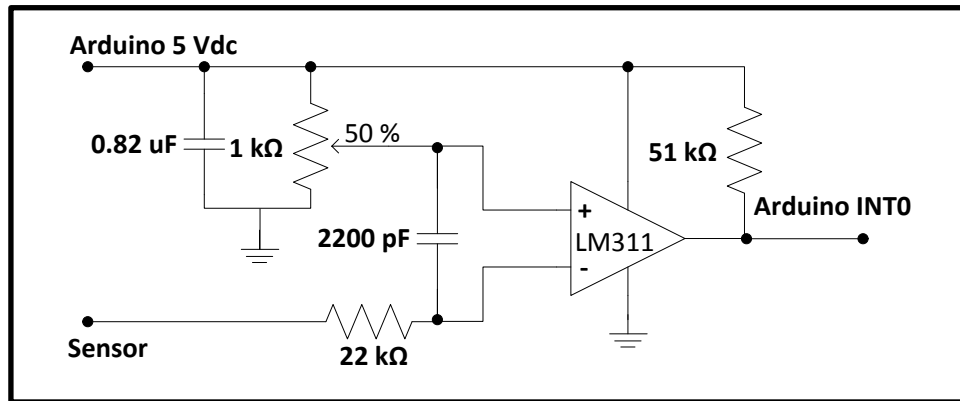


Figura 3.4. Circuito de bucle de enganche de fase.

Fuente: Diseño del autor.

3.3. Diseño del software

El diseño de algoritmos de adquisición y procesamiento de datos se desarrolló en el entorno Arduino, y el monitoreo de datos se desarrolló en la plataforma de LabVIEW por la facilidad del manejo de sus recursos y por poseer características que cumplan con los requerimientos del software en lo que respecta a interfaz de usuario y conectividad, ya que el módulo de comunicación transmite la información obtenida, por medio de protocolo Ethernet.

3.3.1. Entorno Arduino.

El microcontrolador de las tarjetas Arduino se programa mediante el entorno de programación en texto, también denominado Arduino el cual está basado en los lenguajes Wiring y Processing [2].

El software de Arduino consiste en un entorno integrado de desarrollo (IDE) y las librerías centrales. El IDE está escrito en Java y basado en el entorno de Processing. Las librerías centrales están escritas en C y C++, y, compiladas con AVR-GCC y AVR-Libc. El código fuente para Arduino está alojado en GitHub [2].

3.3.1.1. Algoritmo para el cálculo de THD.

Los algoritmos del módulo de procesamiento frecuencial fueron sintetizados en el entorno de programación de Arduino, estos se encargan de realizar el cálculo de los parámetros THD para voltajes y corrientes, así como también se encargan de calcular la frecuencia de cada señal correspondiente a una red trifásica. Este procesamiento frecuencial se lo realiza en base a la Transformada discreta de Fourier, para ello se utiliza la

librería de Transformada rápida de Fourier (FFT) aplicada a procesamiento de señales en tiempo discreto.

3.3.1.1.1. Diagrama de flujo.

En la figura 3.5 se muestra el diagrama de flujo de la programación desarrollada en el módulo de procesamiento frecuencial.

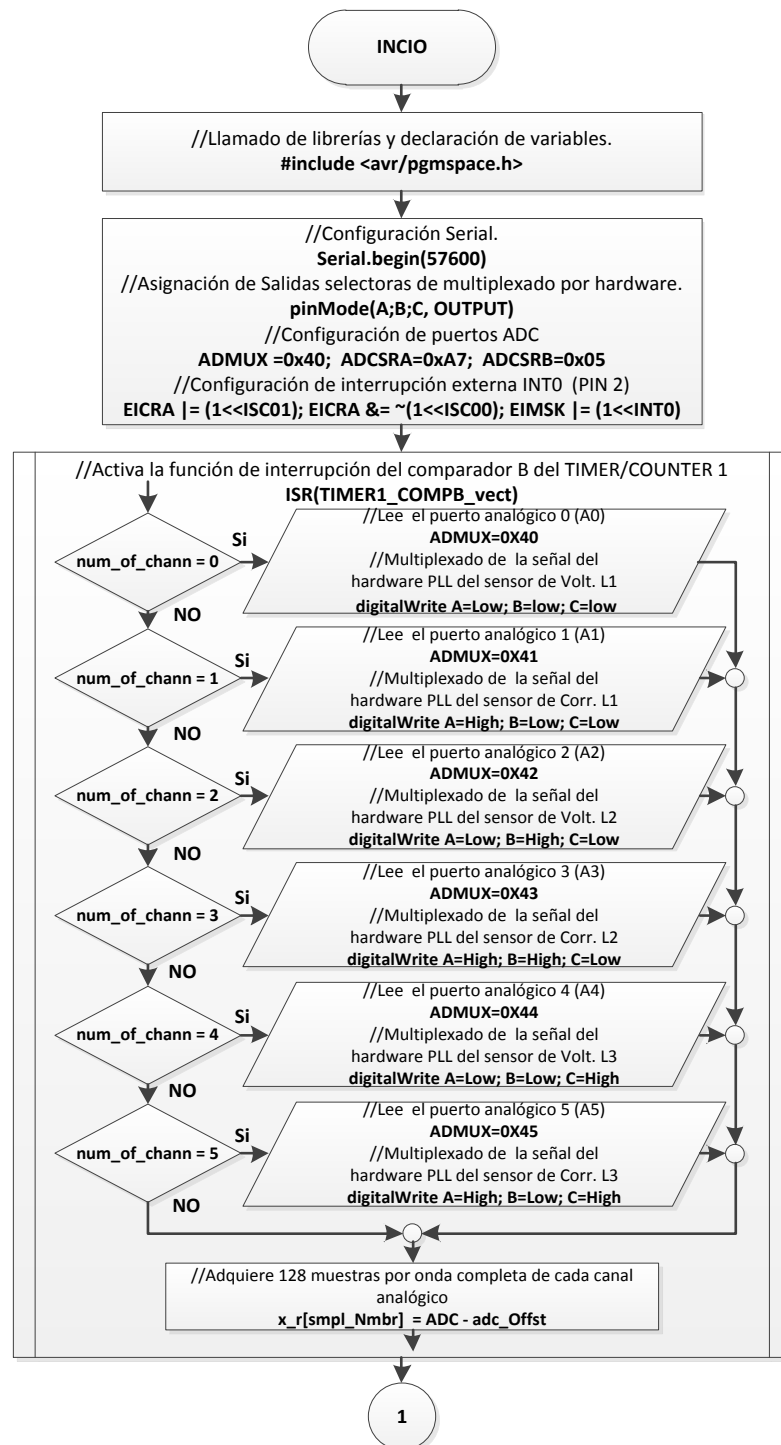


Figura 3.5. Diagrama de flujo del Módulo de procesamiento frecuencial.

Fuente: Elaborado por el autor.

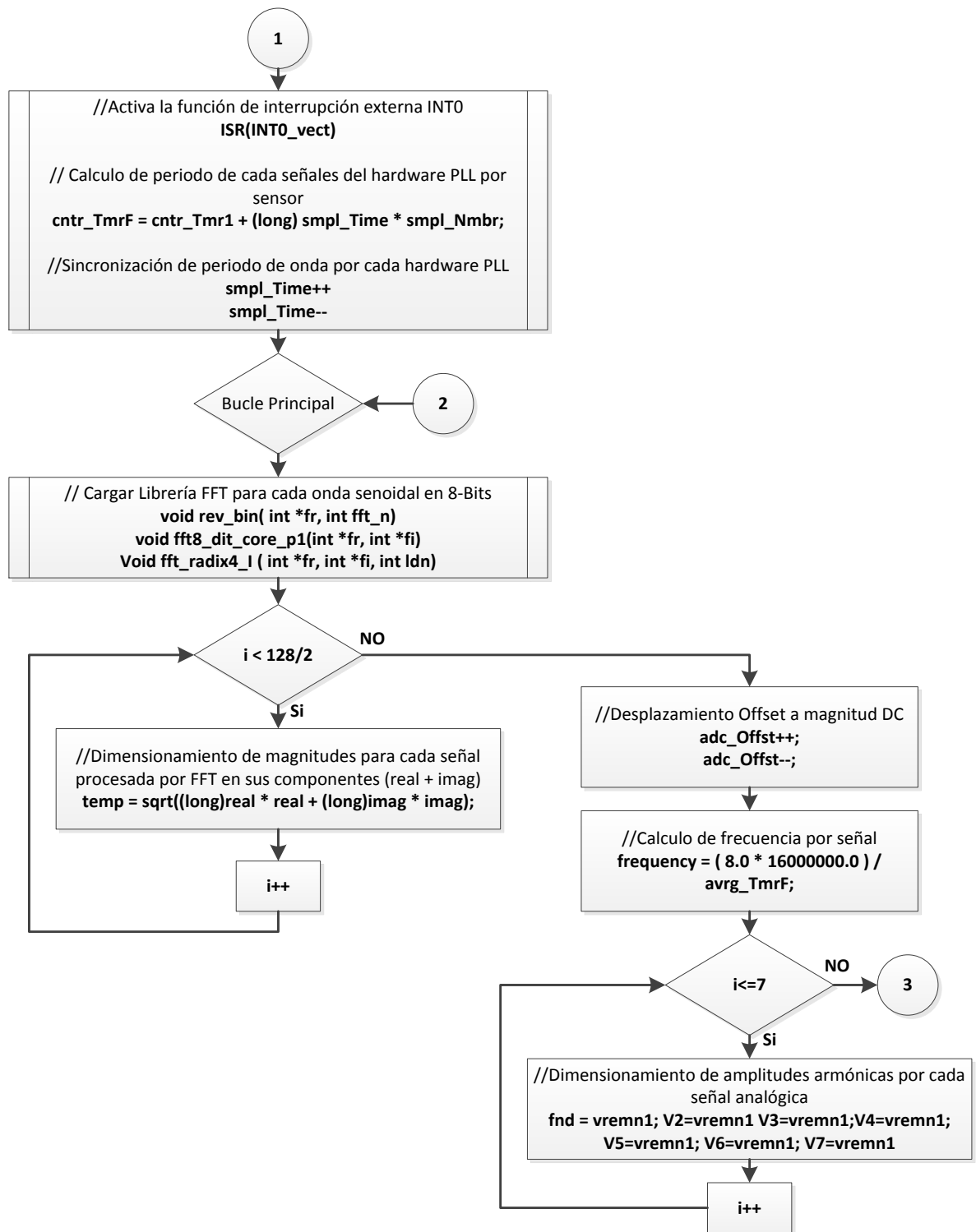


Figura 3.5. Diagrama de flujo del Módulo de procesamiento frecuencial. Continuación...

Fuente: Elaborado por el autor.

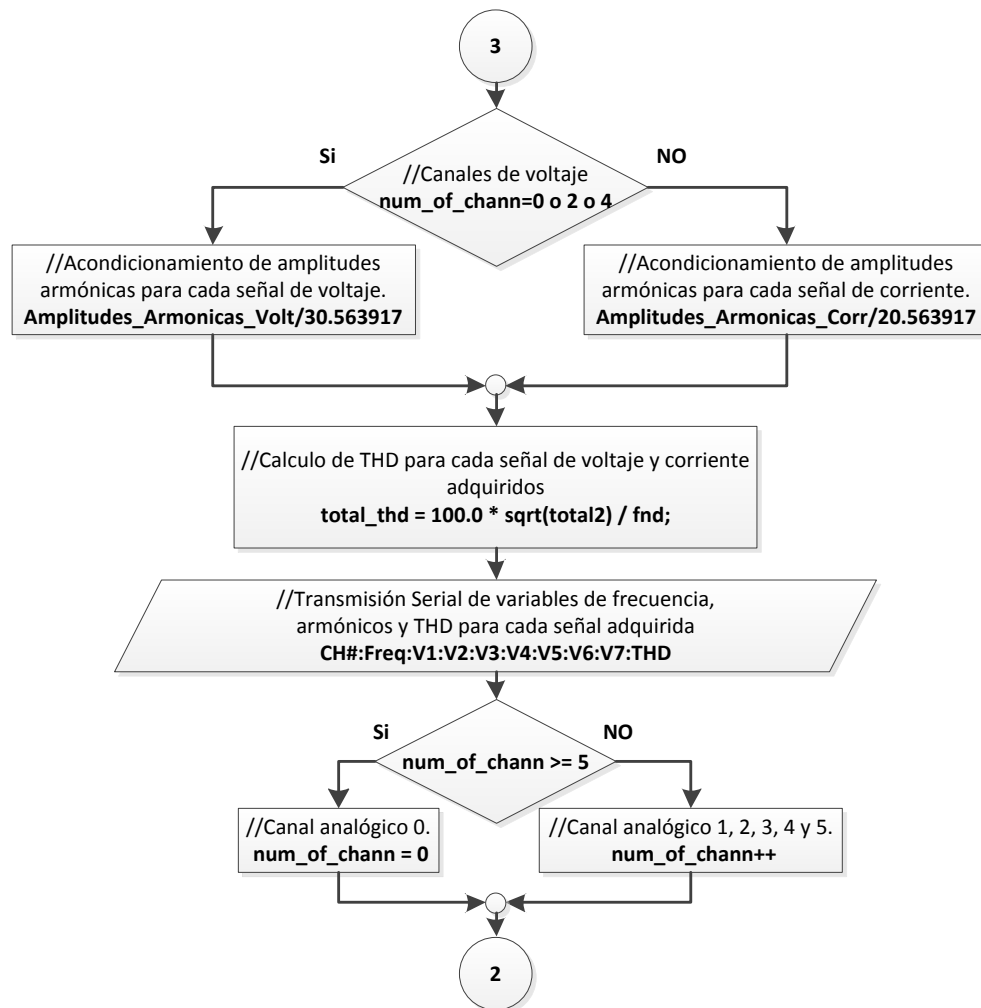


Figura 3.5. Diagrama de flujo del Módulo de procesamiento frecuencial. Continuación...

Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.1.2. Algoritmo para el cálculo de parámetros de calidad de energía.

Los algoritmos sintetizados en el módulo de procesamiento de parámetros de energía, realiza las siguientes tareas:

- Acondicionamiento digital para las señales de voltaje, en un rango de ± 170 V.
- Acondicionamiento digital para las señales de corriente, en un rango de ± 565 A.
- Discretización de señales a una frecuencia de muestreo de 9600 muestras/seg.
- Calculo de voltajes y corrientes RMS, potencia real, potencia aparente y potencia reactiva, y, factor de potencia.
- Recepción de tramas de datos del módulo de procesamiento frecuencial.
- Transmisión de datos de todos los parámetros de calidad de energía, por medio del módulo de comunicación Ethernet, hacia la aplicación de escritorio para su visualización y registro.

3.3.1.2.1. Configuración del Módulo Arduino Ethernet.

Para realizar la tarea de transmisión de datos a la red de datos, el módulo de procesamiento de parámetros de energía debe estar conectada al módulo de comunicación Arduino Ethernet, con el objetivo de que dicha información pueda ser solicitada, por medio de un navegador web, por un dispositivo cliente conectado a la red de datos.

La configuración del comportamiento del módulo Ethernet, para la evaluación del presente prototipo, es en modo Servidor, de tal manera que permita a un cliente consultar los datos, solamente con la ayuda de un navegador web, el cual permite visualizar la información mediante código HTML a través del protocolo HTTP.

Los parámetros de configuración del servidor son:

- Dirección IP: 192.168.11.1
- Máscara de Subred: 255.255.255.0
- Dirección MAC: 0xDE.0xAD.0xBE.0xEF.0xFE.0xED
- Puerto local: 80

3.3.1.2.2. Diagrama de flujo.

En la figura 3.6 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a los algoritmos implementados en el módulo de procesamiento de parámetros de energía.

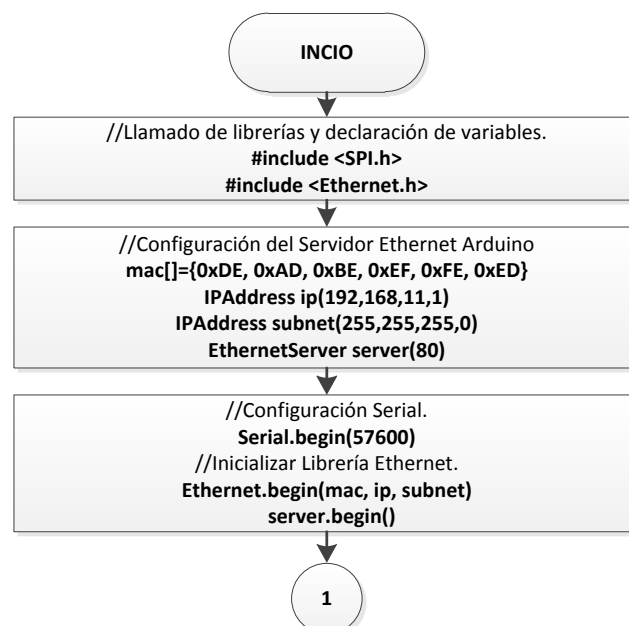


Figura 3.6. Diagrama de flujo del módulo de procesamiento de parámetros de energía.

Fuente: Elaborado por el autor.

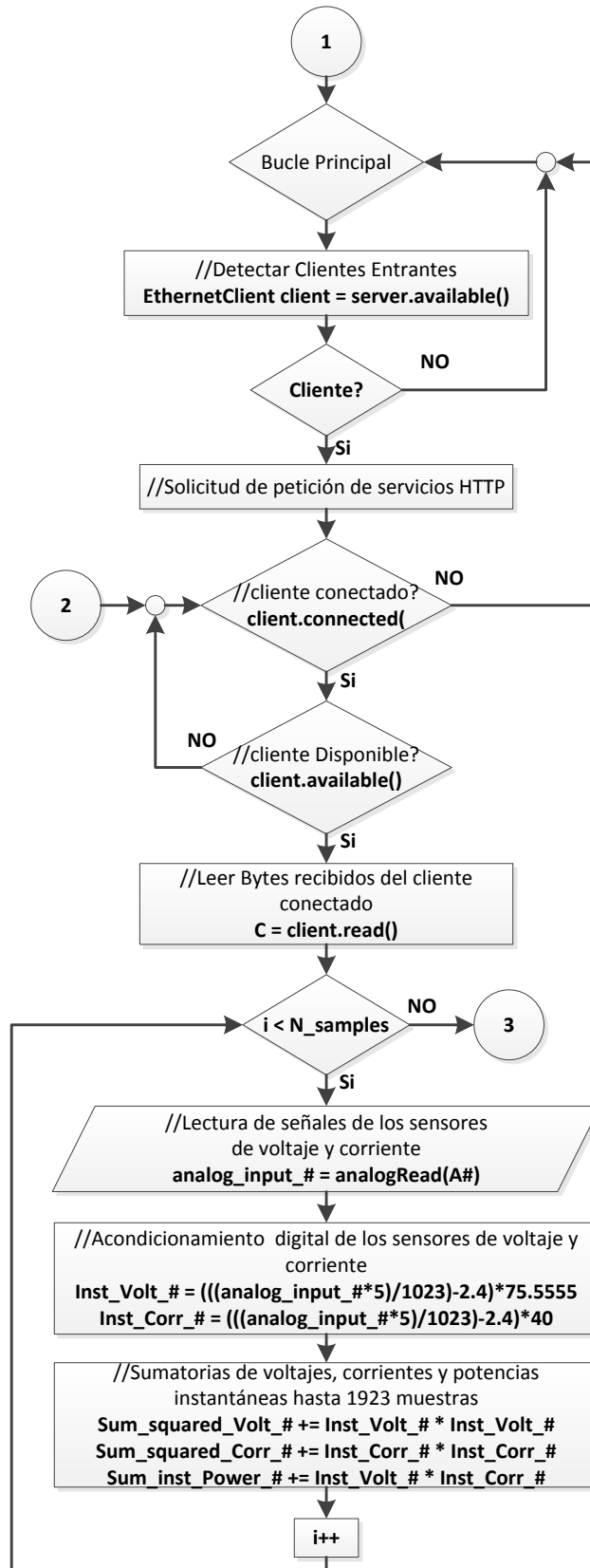


Figura 3.6. Diagrama de flujo del módulo de procesamiento de parámetros de energía. Continuación...

Fuente: Elaborado por el autor.

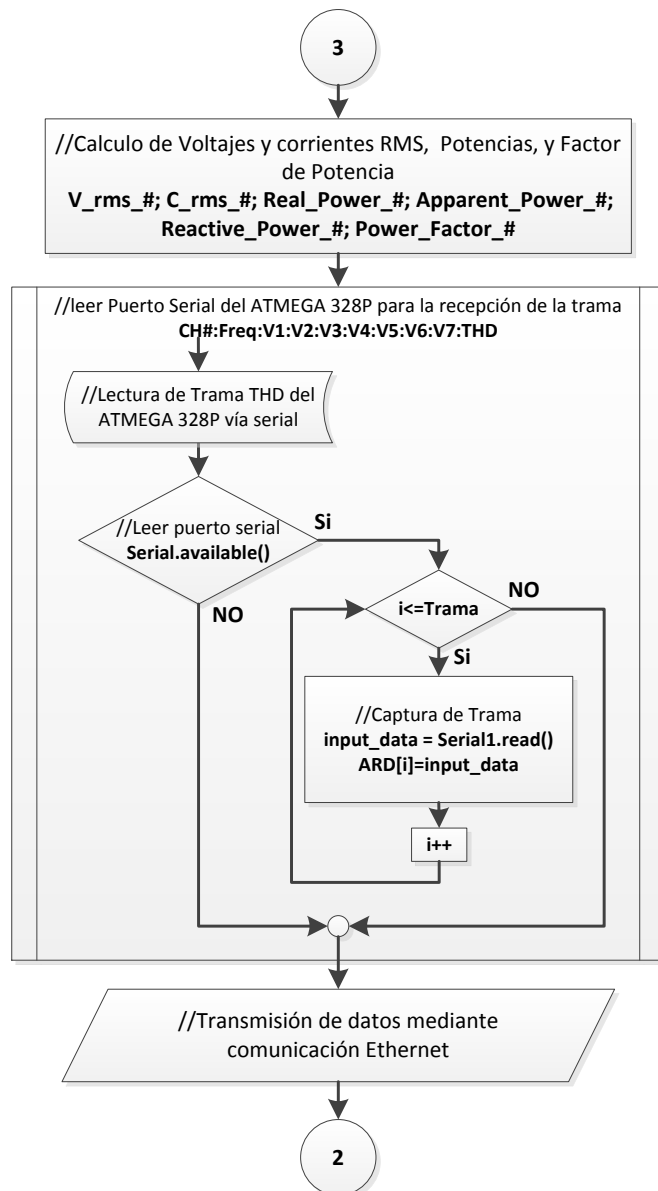


Figura 3.6. Diagrama de flujo del módulo de procesamiento de parámetros de energía. Continuación...

Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.2. Entorno LabVIEW.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. LabVIEW permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software. Se puede diseñar especificando su sistema funcional, diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería. A la vez, es compatible con herramientas de desarrollo similar y puede integrarse con otras aplicaciones, como por ejemplo Matlab. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con hardware, específicamente con

tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes) [22].

LabVIEW tiene su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, es también muy utilizado en procesamiento digital de señales, procesamiento en tiempo real, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otros [22].

3.3.2.1. Registro y visualización de parámetros en LabVIEW.

Para la visualización y registro de la información correspondiente al monitoreo de parámetros de calidad de energía eléctrica, se desarrolló una aplicación de escritorio, que permita realizar las siguientes tareas:

- Leer la dirección de red o la URL del módulo de comunicación Arduino Ethernet, con el objetivo de extraer la información del código fuente HTML de la página web, esta lectura se la realiza con ayuda de las funciones de DataSocket integradas en LabVIEW.
- Desentramar la información fuente de la página web y extraer los valores de cada uno de los parámetros de calidad de energía en formato string.
- Convertir los valores correspondientes a los parámetros de calidad de energía, de tipo carácter a tipo numérico.
- Tabular los parámetros de voltaje, corriente, potencias, factor de potencia y frecuencia por cada una de las fases.
- Graficar el comportamiento en función del tiempo, de los parámetros de voltaje, corriente, potencias y armónicos por cada una de las fases.

3.3.2.1.1. Panel frontal.

El panel frontal es la interfaz gráfica de usuario del sistema de monitoreo de parámetros de calidad de energía, en el presente panel frontal de la aplicación de escritorio desarrollada en LabVIEW, se muestran las diversas pantallas para la visualización y registro de los parámetros monitoreados.

Tabla 3.1. Interfaz gráfica de usuario para visualización de parámetros de calidad de energía.

	A (L1)	B (L2)	C (L3)
Vrms	123.560	122.830	122.630
Arms	181.940	217.760	210.970
Hz	60.550	60.560	60.400
	AB	BC	CA
Vrms	213.380	212.575	213.207

Figura 3.7. Pantalla Multímetro: voltajes y corrientes.

	A (L1)	B (L2)	C (L3)	Total
kW	21.320	25.050	24.470	70.840
kVA	21.400	25.710	24.770	71.880
kVAR	1.890	5.790	3.870	11.550
PF	0.996	0.974	0.988	0.986

Figura 3.8. Pantalla Multímetro: potencia y energía.

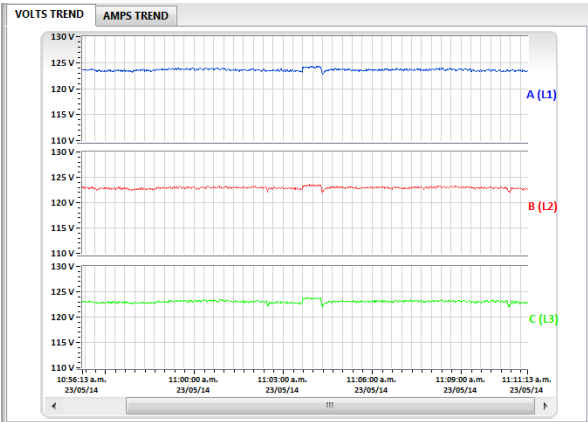


Figura 3.9. Pantalla Tendencia: voltajes y corrientes.

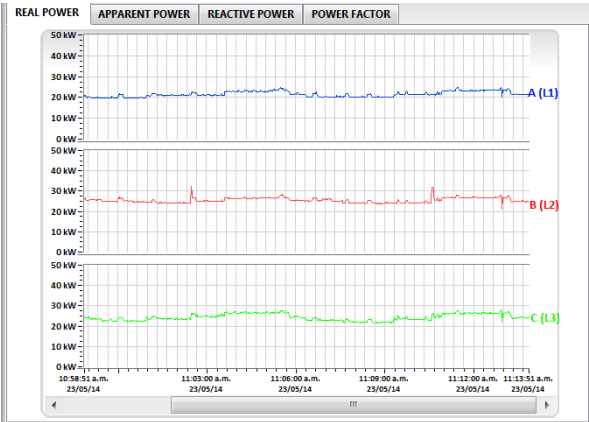


Figura 3.10. Pantalla Tendencia: potencia y energía.

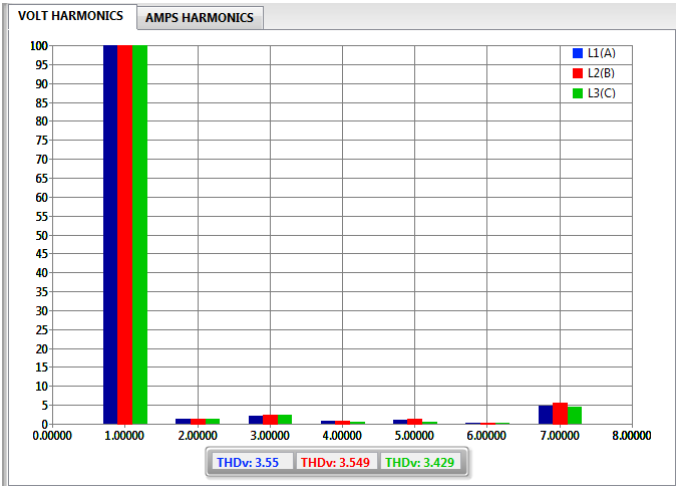


Figura 3.11. Pantalla gráfica de barras para visualización de armónicos.

Fuente: Diseño del autor.

3.3.2.1.2. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques es el código fuente del sistema de monitoreo de parámetros de calidad de energía. En el presente diagrama de bloques se describe el proceso de recepción de tramas de datos del servidor Arduino y del desentramado de información, con el fin de visualizar y registrar los parámetros en los respectivos indicadores numéricos y gráficos de la interfaz gráfica de usuario.

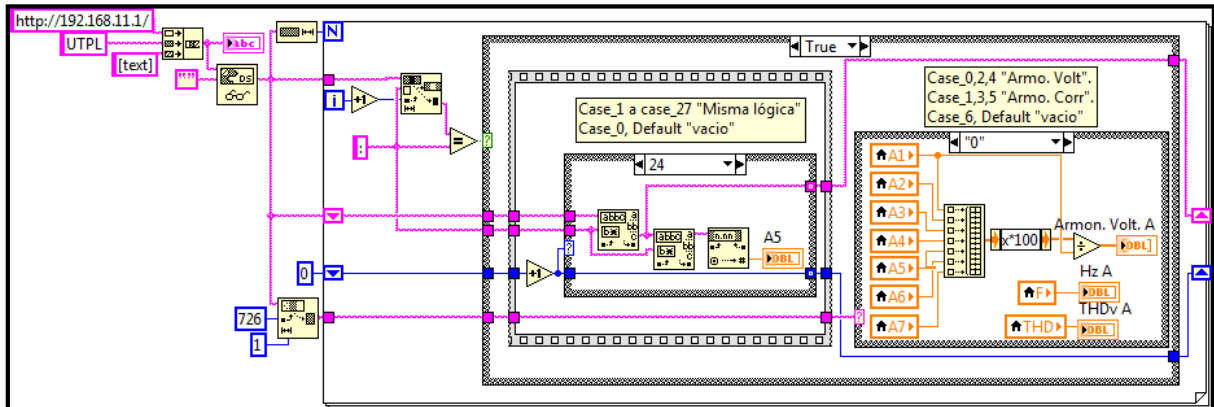


Figura 3.12. Diagrama del bloques de la recepción y desentramado de variables eléctricas.

Fuente: Diseño del autor.

Para la recepción de información de los módulos de procesamiento, es necesario leer el contenido de la dirección URL de la página web cliente del servidor Arduino. Para la lectura del código fuente html, el desentramado, el registro y visualización de los parámetros monitoreados, se utiliza diferentes funciones integradas en LabVIEW, que permitan cumplir con las prestaciones especificadas para la aplicación de escritorio.

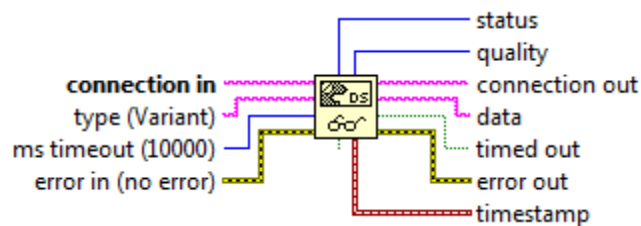


Figura 3.13. Función DataSocket Read.

Fuente: NI LabVIEW.

La función “DataSocket Read” (figura 3.13) permite devolver datos disponibles en el buffer del cliente asociado a la conexión específica. DataSocket es comparable con algunos protocolos como HTTP, FTP y acceso de archivos. Al utilizar esta función se puede recuperar la totalidad del código fuente de una página web asociada a un servidor, simplemente usando la URL estándar. El código fuente es recuperado en formato de cadena

de caracteres. Por ejemplo la URL construida para el presente proyecto es:
[http://192.168.11.1/UTPL\[text\]](http://192.168.11.1/UTPL[text]).

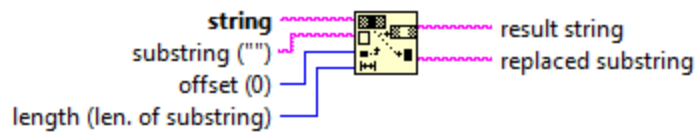


Figura 3.14. Función Replace Substring.

Fuente: NI LabVIEW.

La función “*Replace Substring*” permite insertar, eliminar o reemplazar un substring en el desplazamiento de un string específico. La información capturada por Ethernet será procesada para poder identificar cada una de los parámetros eléctricos, los cuales están separados por el caracter dos puntos “:”.

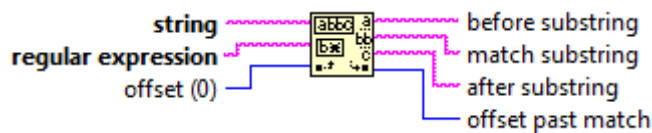


Figura 3.15. Función Match Pattern.

Fuente: NI LabVIEW.

La función “*Match Pattern*” permite buscar una expresión regular en una string, si encuentra una coincidencia divide el string en tres substrings. Una vez identificados todos los parámetros, dentro del código fuente de la página web, es necesario descomponer toda la información para extraer cada uno de los valores.



Figura 3.16. Función Fract/Exp String To Number.

Fuente: NI LabVIEW.

La función “*Fract/Exp String To Number*” permite interpretar los caracteres del 0 al 9 y el punto decimal. Un string en notación de ingeniería, formato exponencial o fraccionario lo devuelve en número. Después de extraer cada una de los parámetros eléctricos en formato string es necesario transformarlo en un tipo de dato numérico.

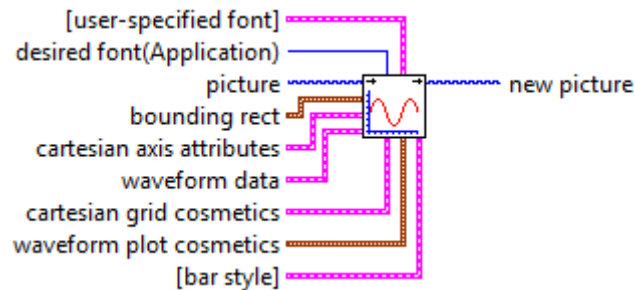


Figura 3.17. Función Plot Waveform.

Fuente: NI LabVIEW.

La función “*Plot Waveform*” permite tomar datos distribuidos de manera uniforme y crea una representación en un gráfico del tipo forma de onda. En la aplicación desarrollada, esta función permite graficar, en diagrama de barras, las amplitudes armónicas de cada fase.

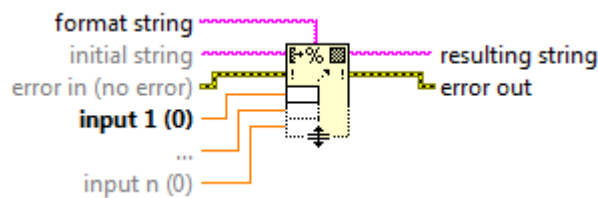


Figura 3.18. Función Format Into String.

Fuente: NI LabVIEW.

La función “*Format Into String*” permite unir en un solo string formatos de cadena de caracteres, tipos de datos numéricos, entre otros. Mediante esta función, se concatena los datos numéricos y textos correspondientes a la información a registrarse en los archivos.

Para generar reportes en Excel, se utiliza las herramientas del Toolkit Report Generation para Microsoft Office; el cual nos permite gestionar las operaciones con los archivos de hojas de cálculo (extensión .xls o .xlsx), con el objetivo de registrar información, dar formato a los datos, leer información o realizar automáticamente, desde LabVIEW, operaciones o funciones nativas de Microsoft Excel.

CAPÍTULO IV

4. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Introducción

En el capítulo anterior se desarrolló el diseño del hardware y se definieron los algoritmos para el cálculo de parámetros de calidad de energía eléctrica, basado en ecuaciones que permiten cuantificar cada uno de los parámetros seleccionados.

Para validar los diseños del proyecto, se realizaron tres ensayos para cada uno de los parámetros calculados, estos ensayos se los realizó en uno de los tableros principales de la red de distribución de energía trifásica del campus de la UTPL, en los cuales se adquirieron muestras del instrumento de referencia -Analizador de calidad de energía eléctrica Fluke 434-, y, del prototipo analizador de calidad de energía implementado en el presente proyecto, sincronizadas en tiempo de muestreo, con el propósito de realizar el análisis comparativo de todos los parámetros de interés, definidos en el capítulo anterior.

En base a los resultados de mediciones realizadas a los edificios del Campus UTPL [28], se decidió realizar la validación de los resultados en el Edificio de Unidades Productivas, debido a que en el comportamiento de carga en dicho edificio, contamos con las siguientes características:

- El rango de corriente eficaz demandada, oscila entre 90 y 300 Amperios, la cual nos permite evaluar el sistema en algunos rangos.
- La carga instalada posee un componente alto de característica inductiva, lo cual nos permite evaluar el sistema ante diferentes factores de potencia.
- La carga instalada posee características de no linealidad, lo cual nos permite evaluar el sistema ante diferentes niveles de distorsión armónica.

4.2. Análisis de los resultados experimentales.

Los equipos se instalaron en el tablero de distribución principal del edificio de Unidades Productivas de la UTPL, los resultados obtenidos para cada parámetro se detallan gráficamente así como también se realiza un análisis del conjunto de datos correspondientes cada medición. Cabe recalcar que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes diferentes.

En la figura 4.1 se muestra la imagen de la instalación del equipamiento, durante las pruebas realizadas



Figura 4.1. Instalación de los equipos analizadores.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2.1. Voltaje de fase.

Los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro Voltaje de fase, realizado en el tablero de distribución del Edificio de Unidades Productivas, se detallan en los siguientes apartados. En estos ensayos se recalca que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes distintos.

4.2.1.1. Primera prueba experimental.

La Tabla 4.1, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro voltaje de fase. En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestra el comportamiento durante el primer periodo de medición comprendida entre las 08:48:25 a.m. y 10:00:00 a.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.1. Resumen de voltajes de fase obtenidos en el primer ensayo.

	Volt A (L1)		Volt B (L2)		Volt C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	860	860	860	860	860	860
Valor máximo registrado (V)	124.25	124.31	123.19	123.38	123.89	123.92
Valor mínimo registrado (V)	122.66	122.74	121.80	121.86	122.26	122.28
Valor promedio (V)	123.49	123.45	122.58	122.55	123.13	123.10
Error máximo (%)	0.428		0.425		0.430	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 0.43%.

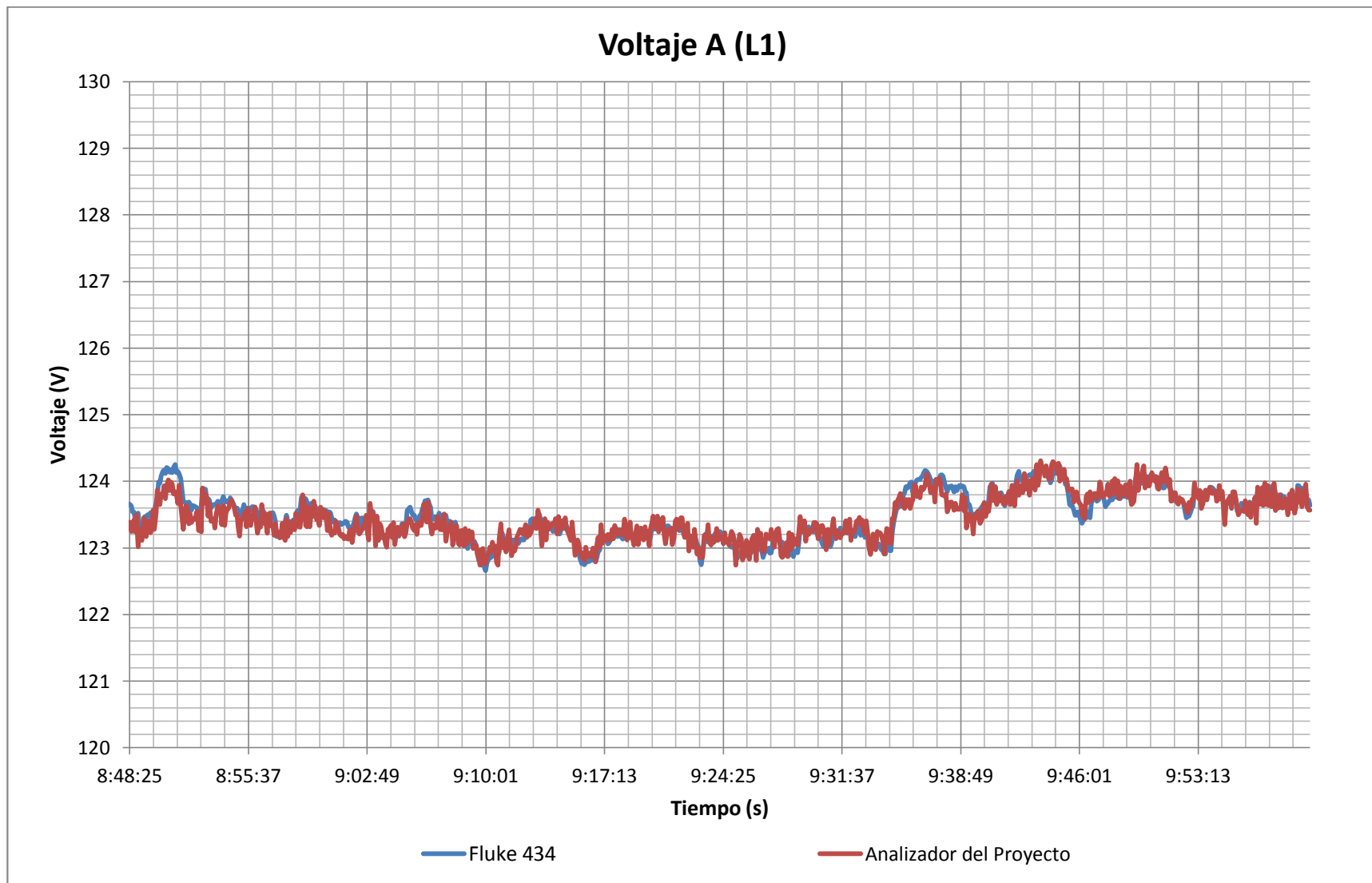


Figura 4.2. Histórico de voltaje A (L1) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

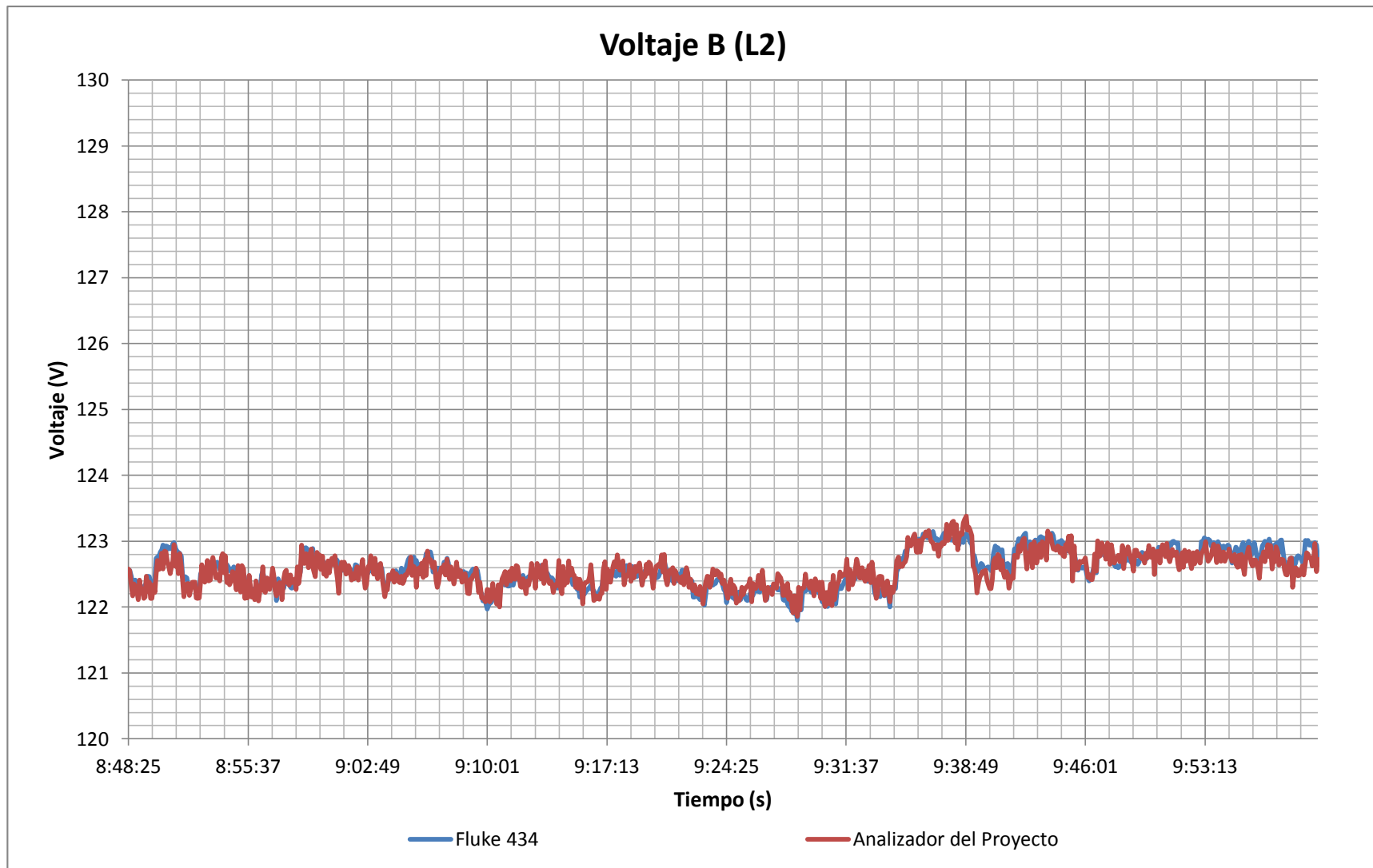


Figura 4.3. Histórico de voltaje B (L2) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

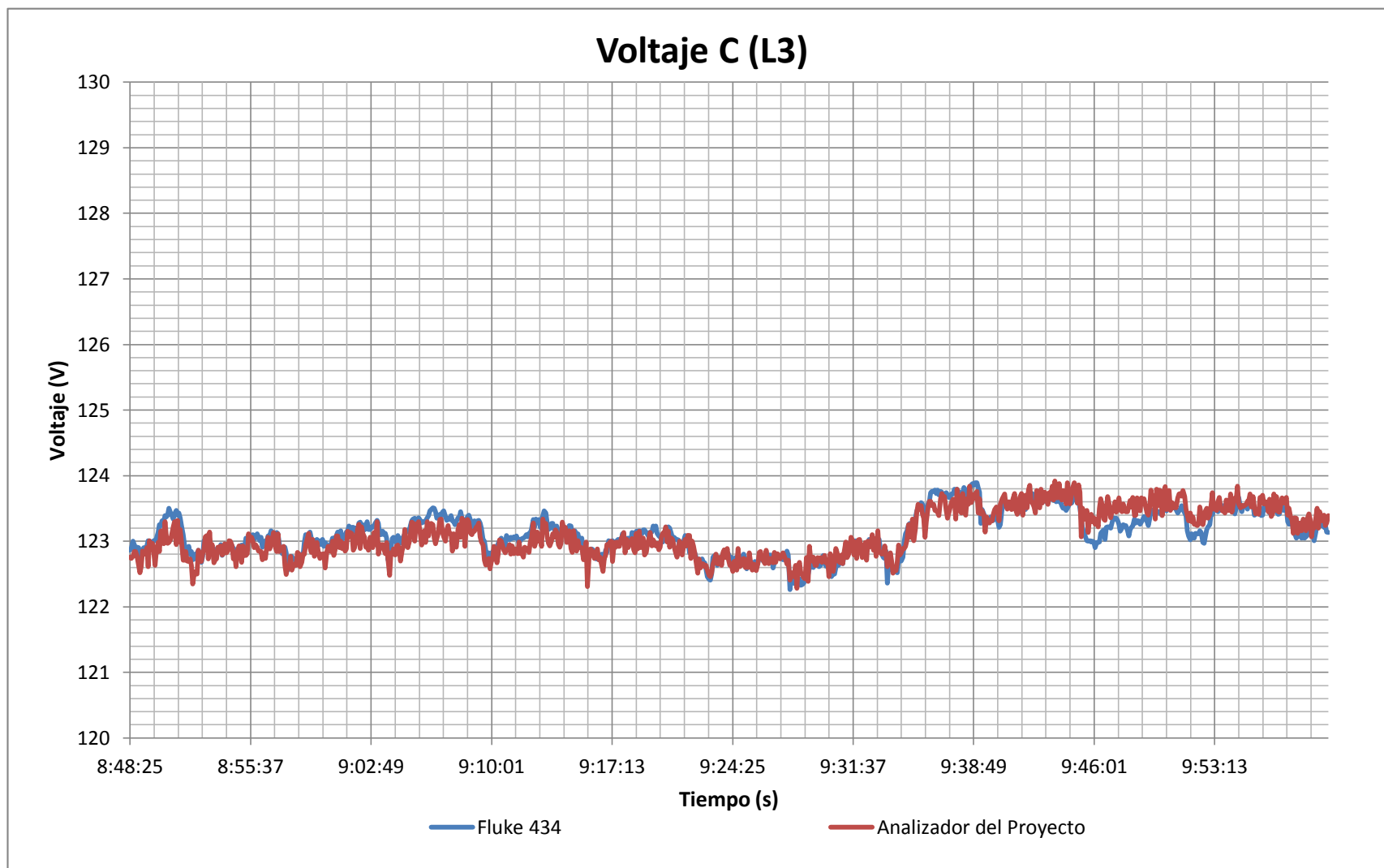


Figura 4.4. Histórico de voltaje C (L3) en el primer ensayo.

Fuente Diseño del autor.

4.2.1.2. Segunda prueba experimental.

La Tabla 4.2, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro voltaje de fase. En las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se muestra el comportamiento durante el segundo periodo de medición comprendida entre las 05:15:21 p.m. y 06:15:16 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.2. Resumen de voltajes obtenidos en el segundo ensayo.

	Volt A (L1)		Volt B (L2)		Volt C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	720	720	720	720	720	720
Valor máximo registrado (V)	124.88	124.88	123.67	123.78	124.67	124.49
Valor mínimo registrado (V)	121.90	122.15	120.59	120.50	121.55	121.46
Valor promedio (V)	123.39	123.52	122.29	122.34	123.12	123.15
Error máximo (%)	0.426		0.466		0.489	
Error mínimo (%)	0.000		0.0004		8.3E-05	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 0.489%.

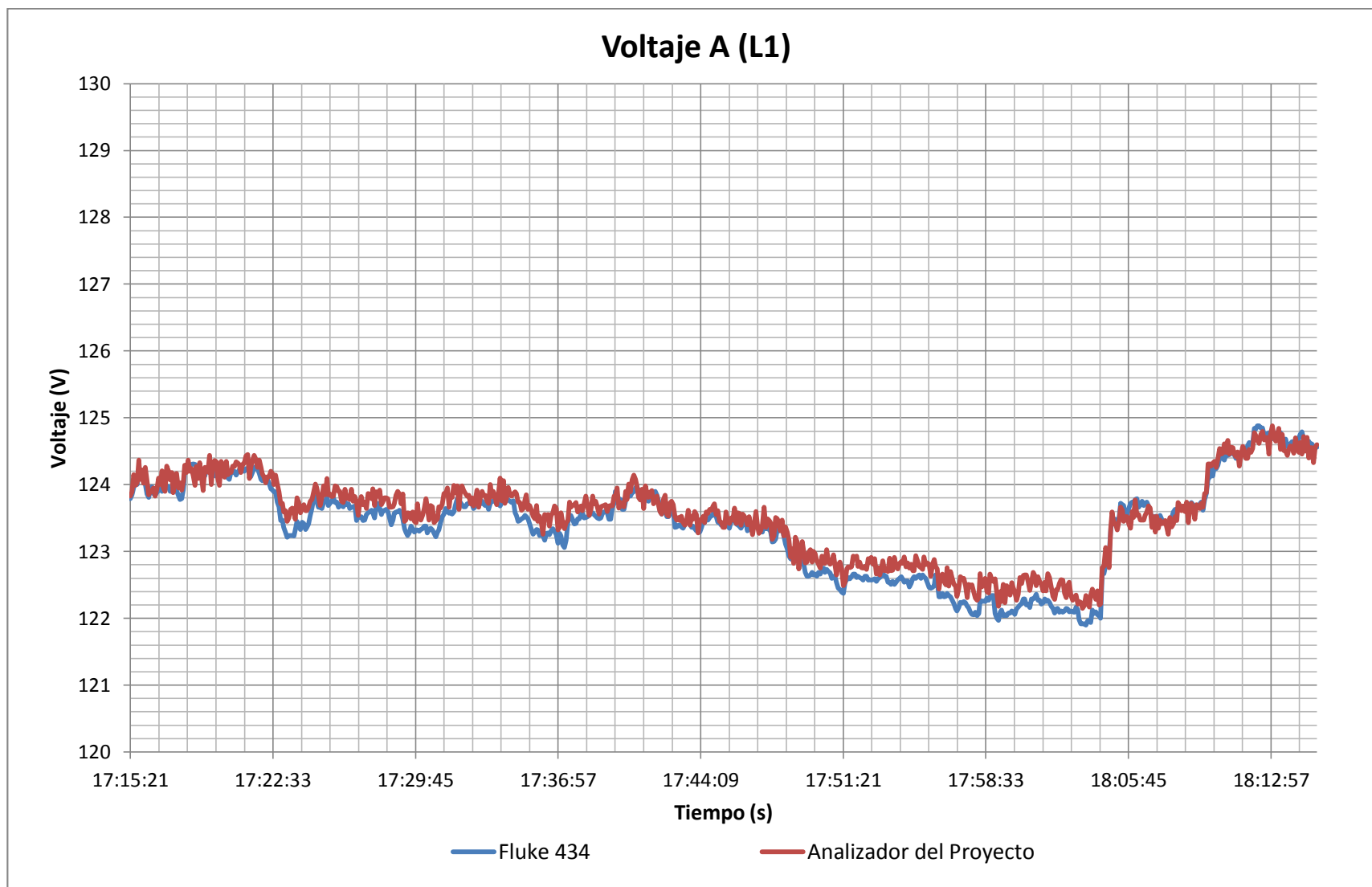


Figura 4.5. Histórico de voltaje A (L1) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

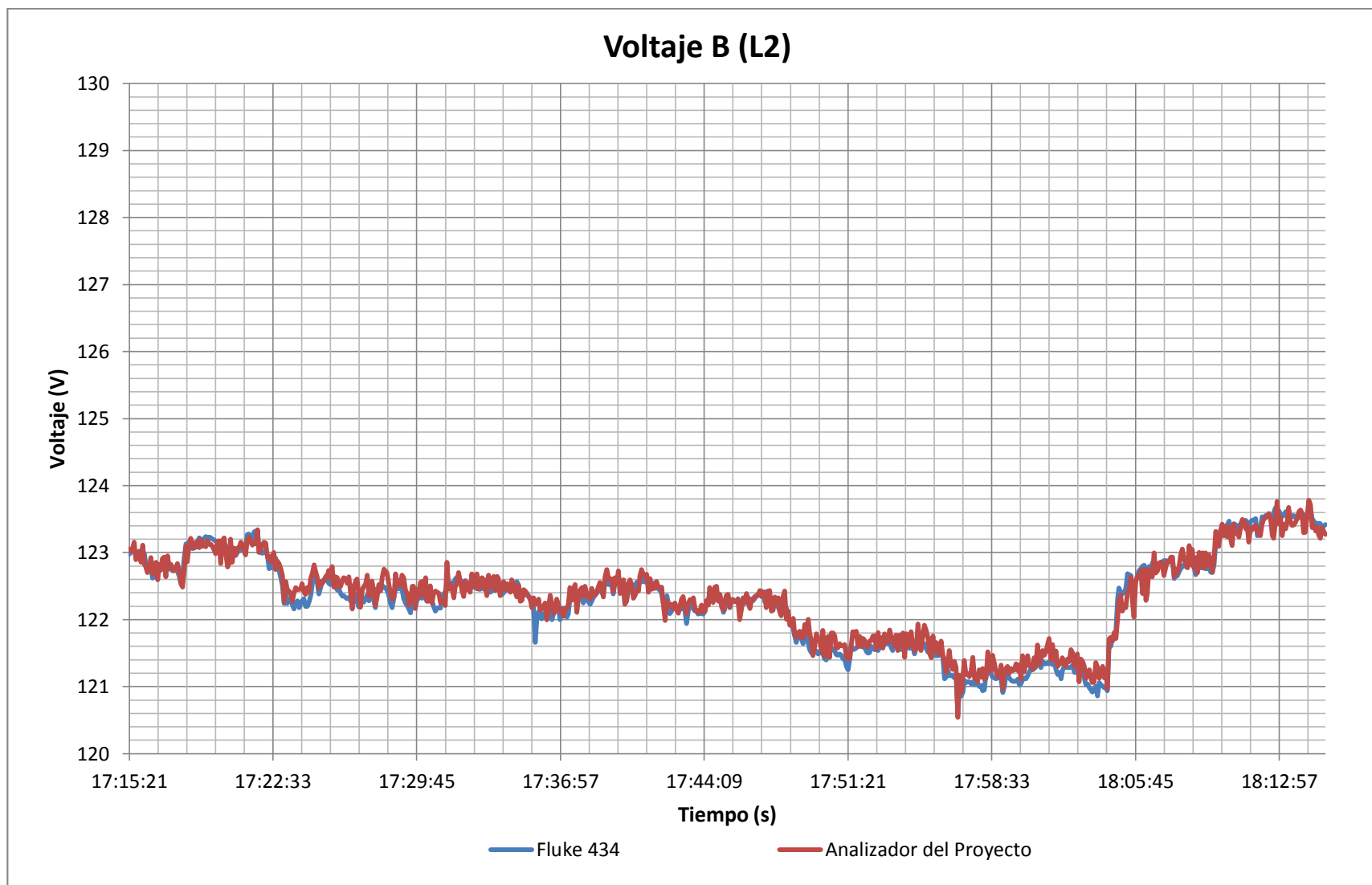


Figura 4.6. Histórico de voltaje B (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

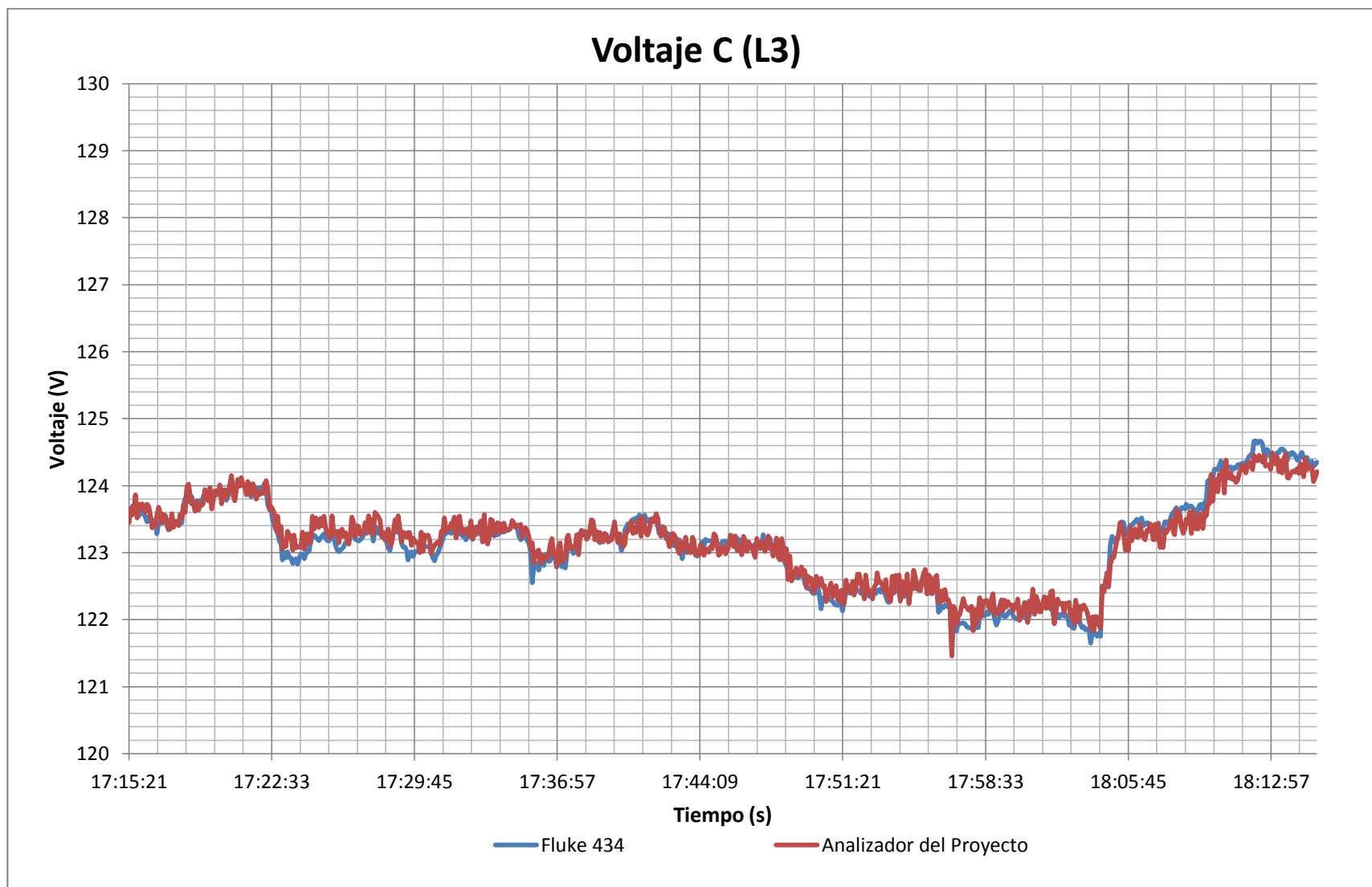


Figura 4.7. Histórico de voltaje C (L3) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.1.3. Tercera prueba experimental.

La Tabla 4.3, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro voltaje de fase. En las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se muestra el comportamiento durante el tercer periodo de medición comprendida entre las 07:20:27 p.m. y 09:00:47 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.3. Resumen de voltajes obtenidos en el tercer ensayo.

	Volt A (L1)		Volt B (L2)		Volt C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	1205	1205	1205	1205	1205	1205
Valor máximo registrado (V)	126.15	125.96	125.34	125.28	125.77	125.74
Valor mínimo registrado (V)	123.41	123.32	123.04	122.84	123.33	123.2
Valor promedio (V)	124.49	124.48	124.01	123.96	124.40	124.35
Error máximo (%)	0.405		0.412		0.435	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 0.435%.

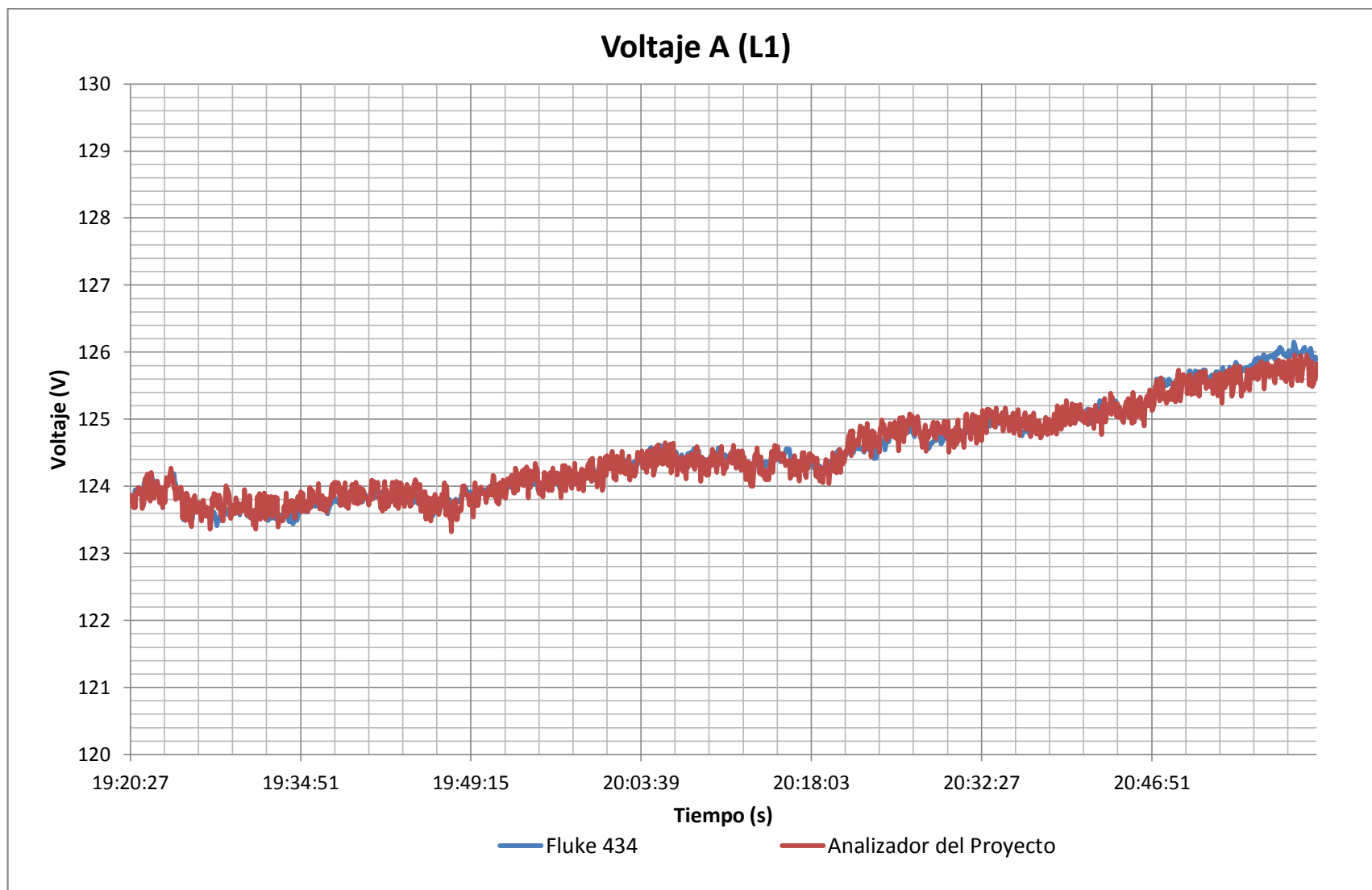


Figura 4.8. Histórico de voltaje A (L1) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

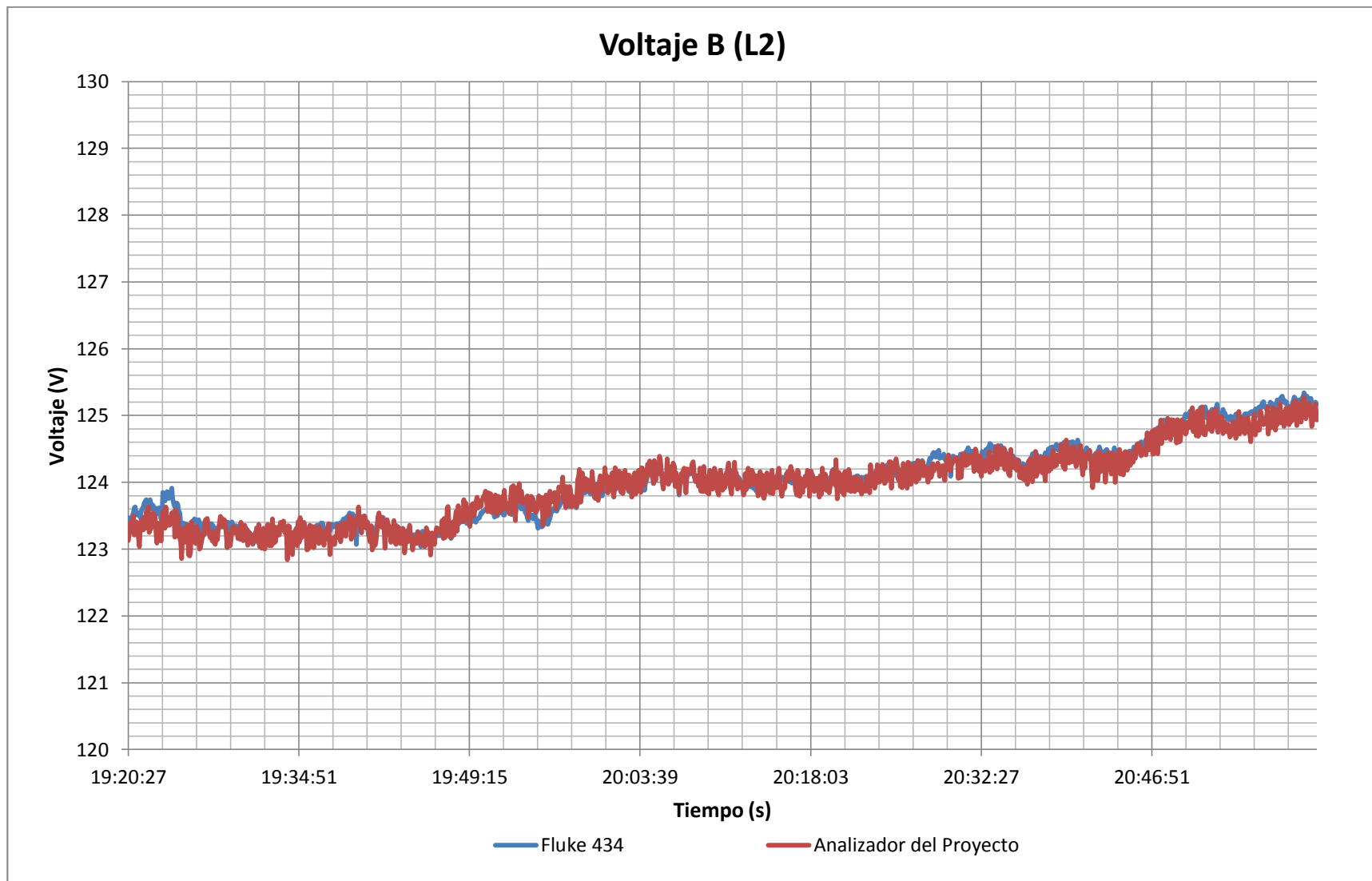


Figura 4.9. Histórico de voltaje B (L2) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

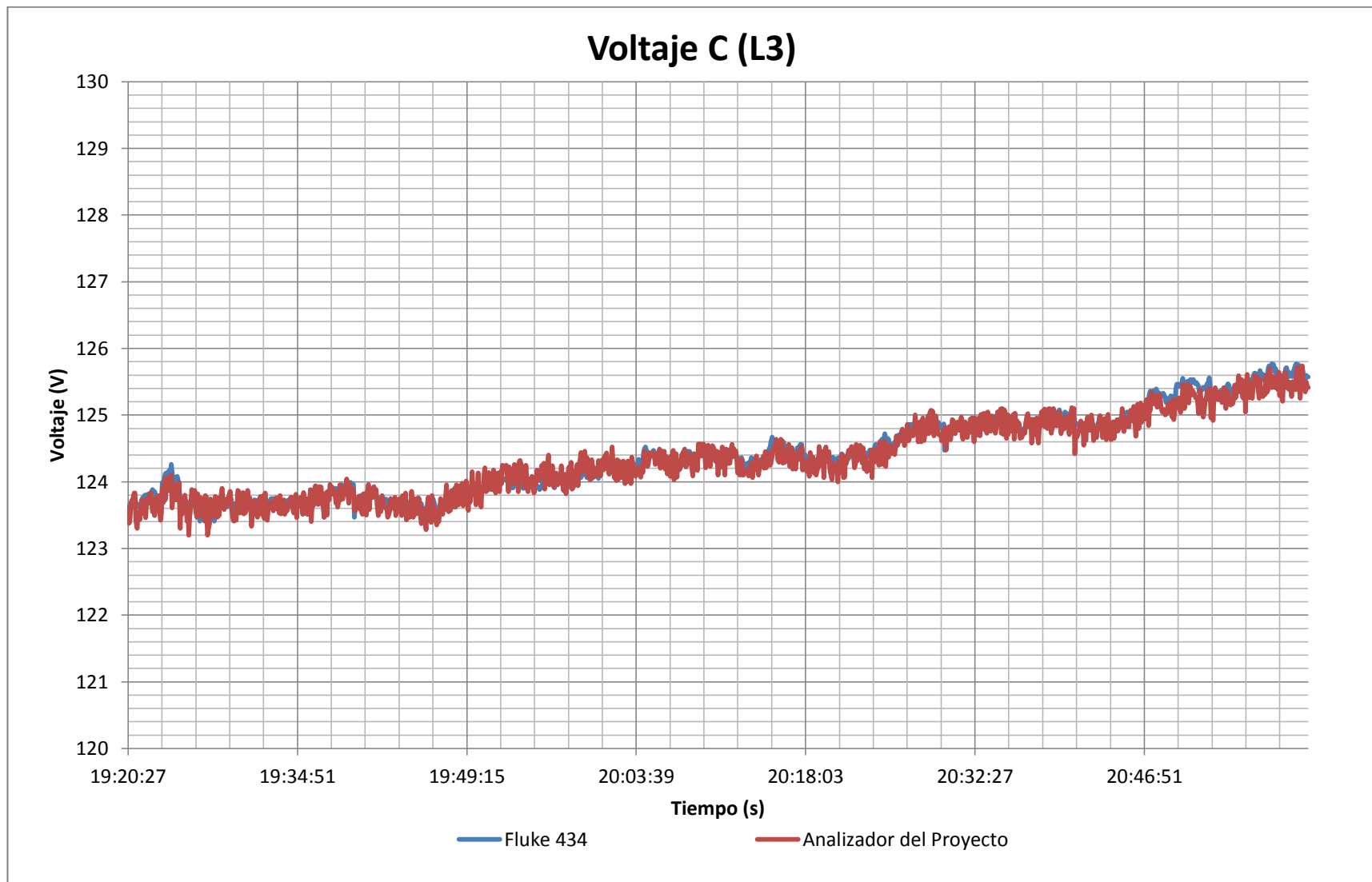


Figura 4.10. Histórico de voltaje C (L3) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.2. Corriente de fase.

Los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro corriente de fase, realizado en el tablero de distribución del Edificio de Unidades Productivas, se detallan en los siguientes apartados. En estos ensayos se recalca que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes distintos.

4.2.2.1. Primera prueba experimental.

La Tabla 4.4, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro corriente de fase. En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestra el comportamiento durante el primer periodo de medición comprendida entre las 08:48:25 a.m. y 10:00:00 a.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.4. Resumen de corrientes obtenidas en el primer ensayo.

	Amp A (L1)		Amp B (L2)		Amp C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	860	860	860	860	860	860
Valor máximo registrado (A)	197.00	201.46	228.50	234.99	227.60	230.337
Valor mínimo registrado (A)	137.70	137.79	176.10	175.78	161.70	161.292
Valor promedio (A)	167.00	168.618	197.08	197.07	188.77	188.76
Error máximo (%)	6.415		14.517		7.030	
Error mínimo (%)	0.012		0.001		0.003	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 14.517%, sin embargo el 98% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

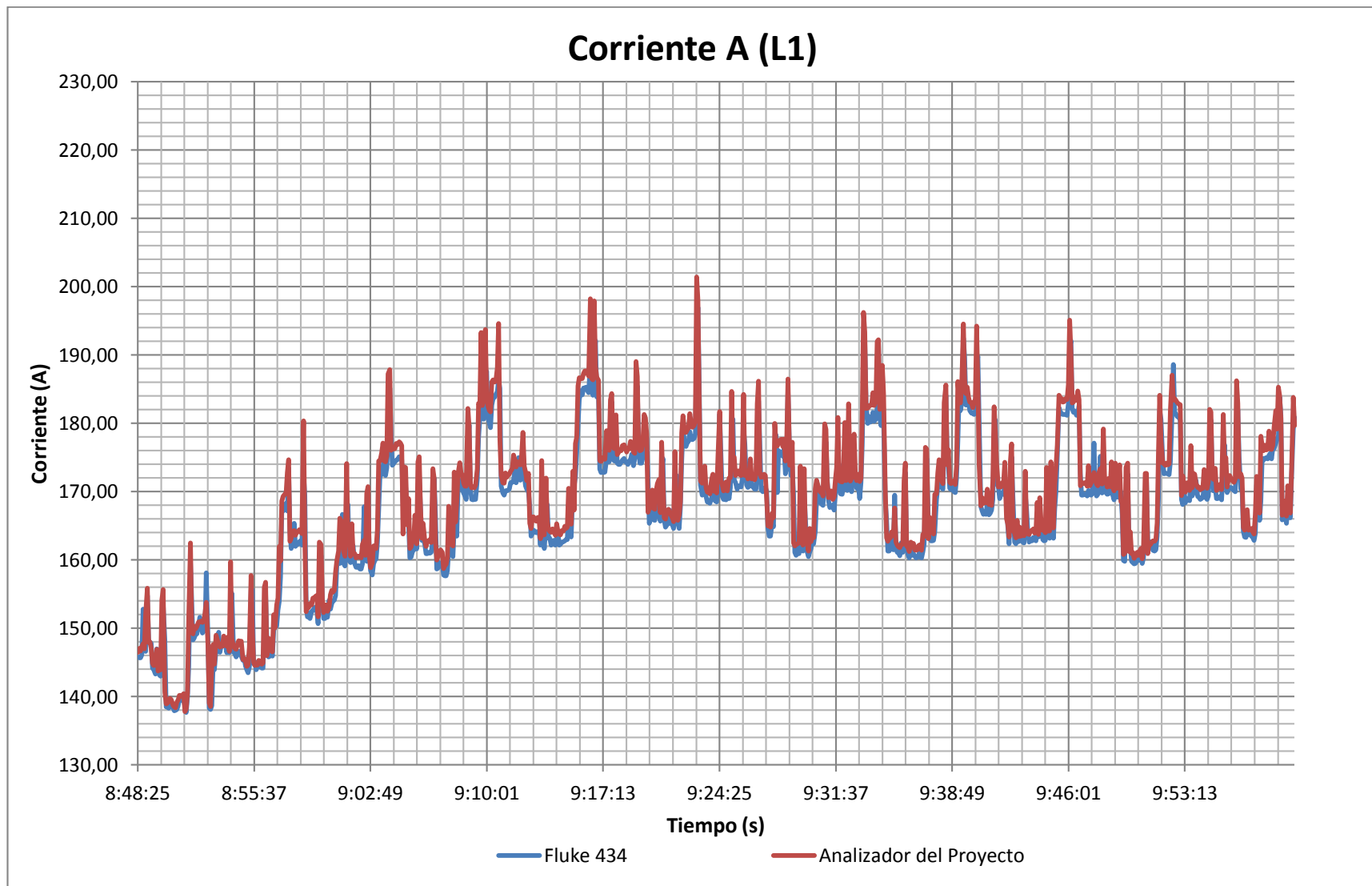


Figura 4.11. Histórico de corrientes A (L1) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

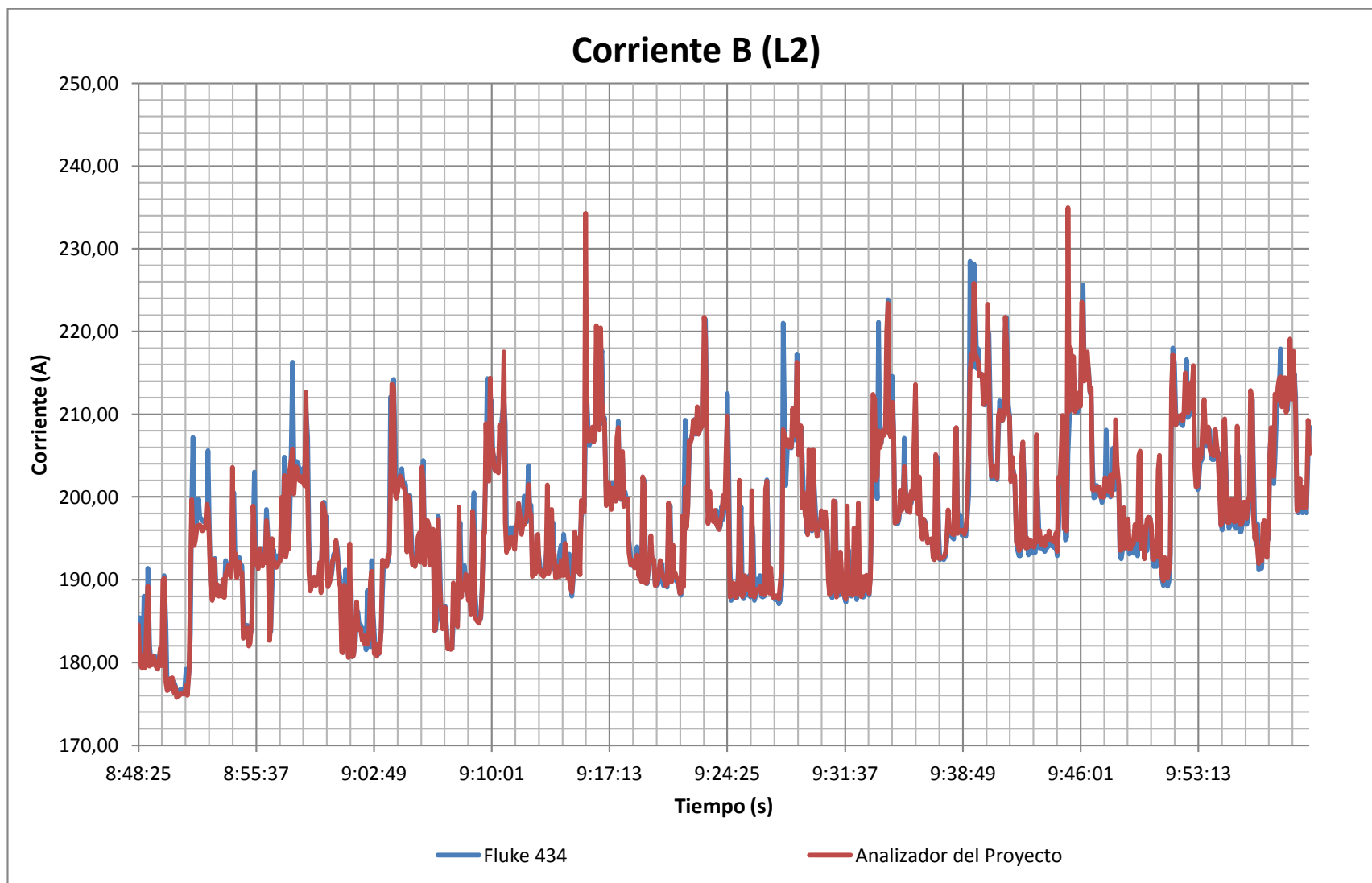


Figura 4.12. Histórico de corrientes B (L2) en el primer ensayo.

Fuente: diseño del autor.

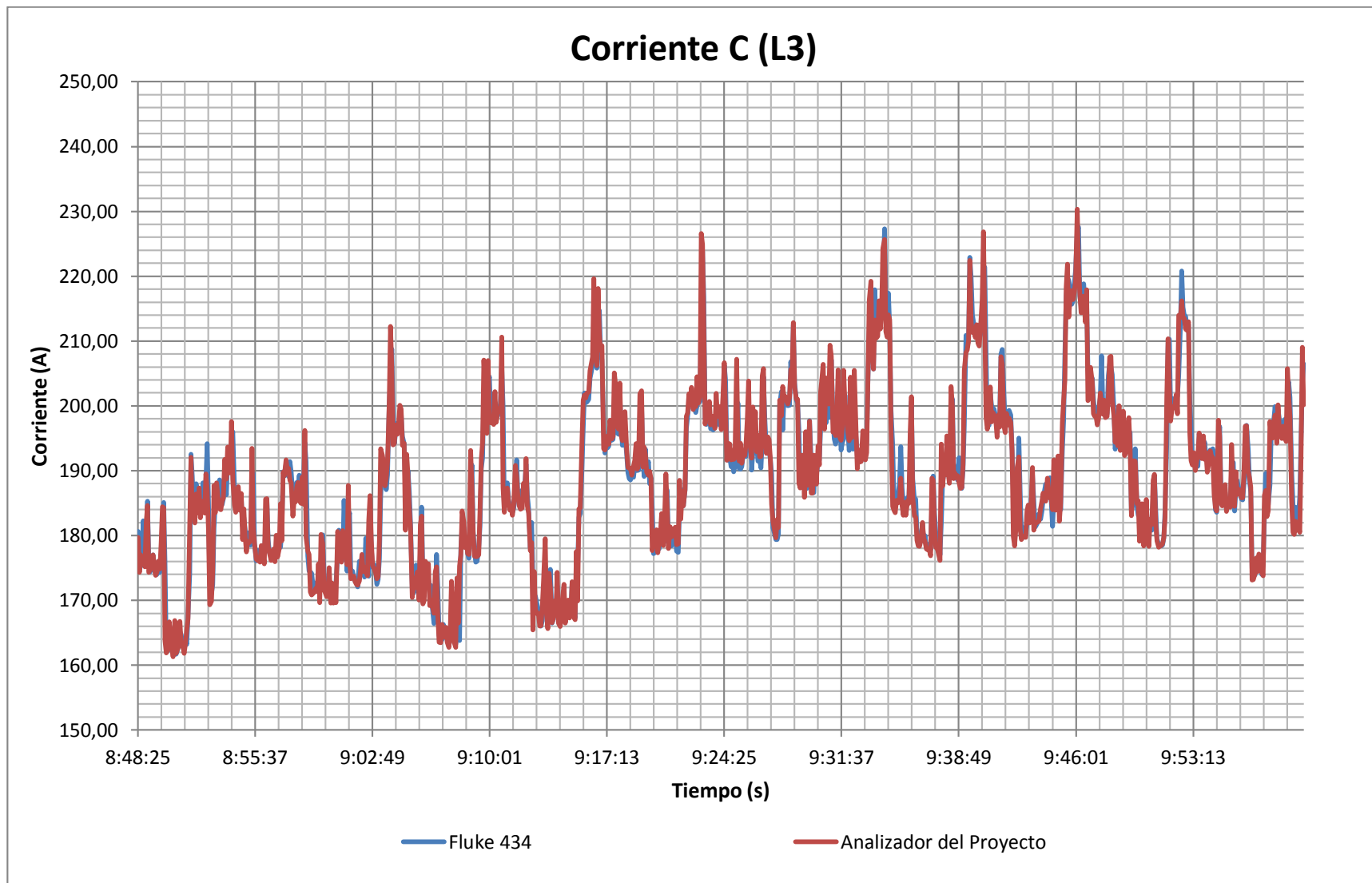


Figura 4.13. Histórico de corrientes C (L3) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.2.2. Segunda prueba experimental.

La Tabla 4.5, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro corriente de fase. En las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se muestra el comportamiento durante el segundo periodo de medición comprendida entre las 05:15:21 p.m. y 06:15:16 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.5. Resumen de corrientes obtenidas en el segundo ensayo.

	Amp A (L1)		Amp B (L2)		Amp C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	720	720	720	720	720	720
Valor máximo registrado (A)	193.00	194.34	252.40	269.85	227.90	232.06
Valor mínimo registrado (A)	152.80	152.37	197.90	197.09	179.70	179.26
Valor promedio (A)	170.44	170.45	213.49	212.51	201.98	201.92
Error máximo (%)	5.836		12.011		3.825	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 12.011%, sin embargo el 99% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

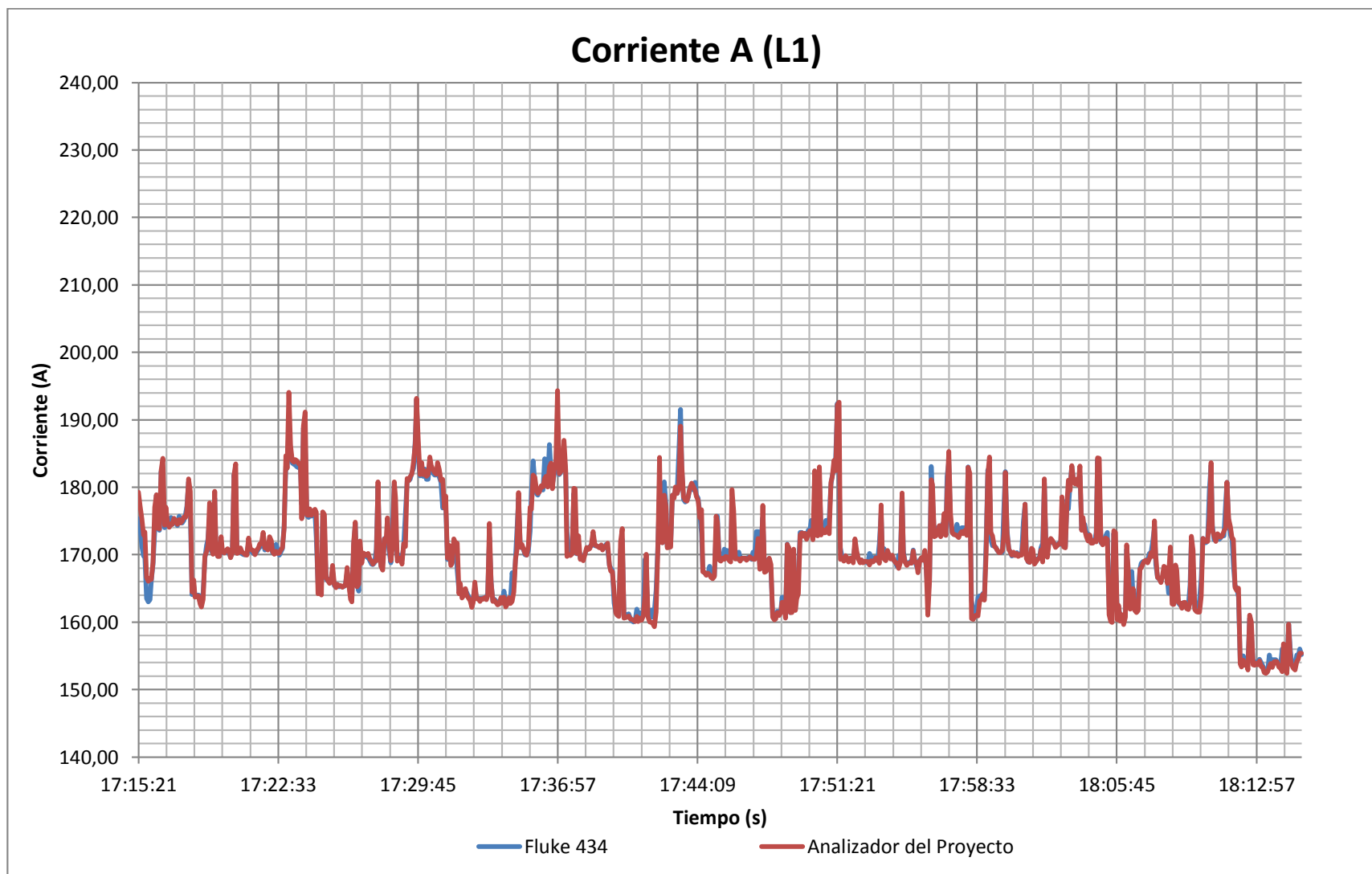


Figura 4.14. Histórico de corrientes A (L1) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

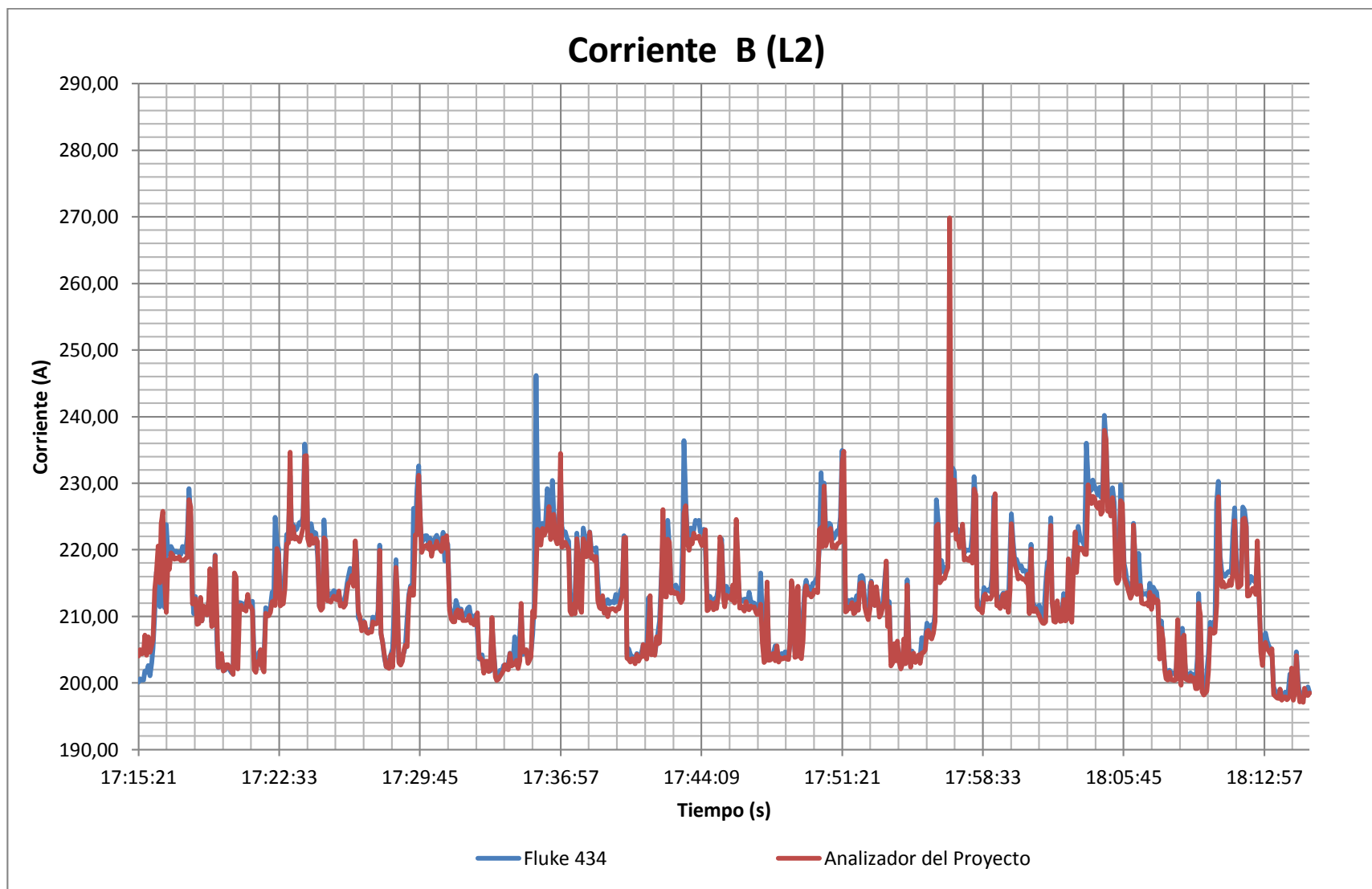


Figura 4.15. Histórico de corrientes B (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

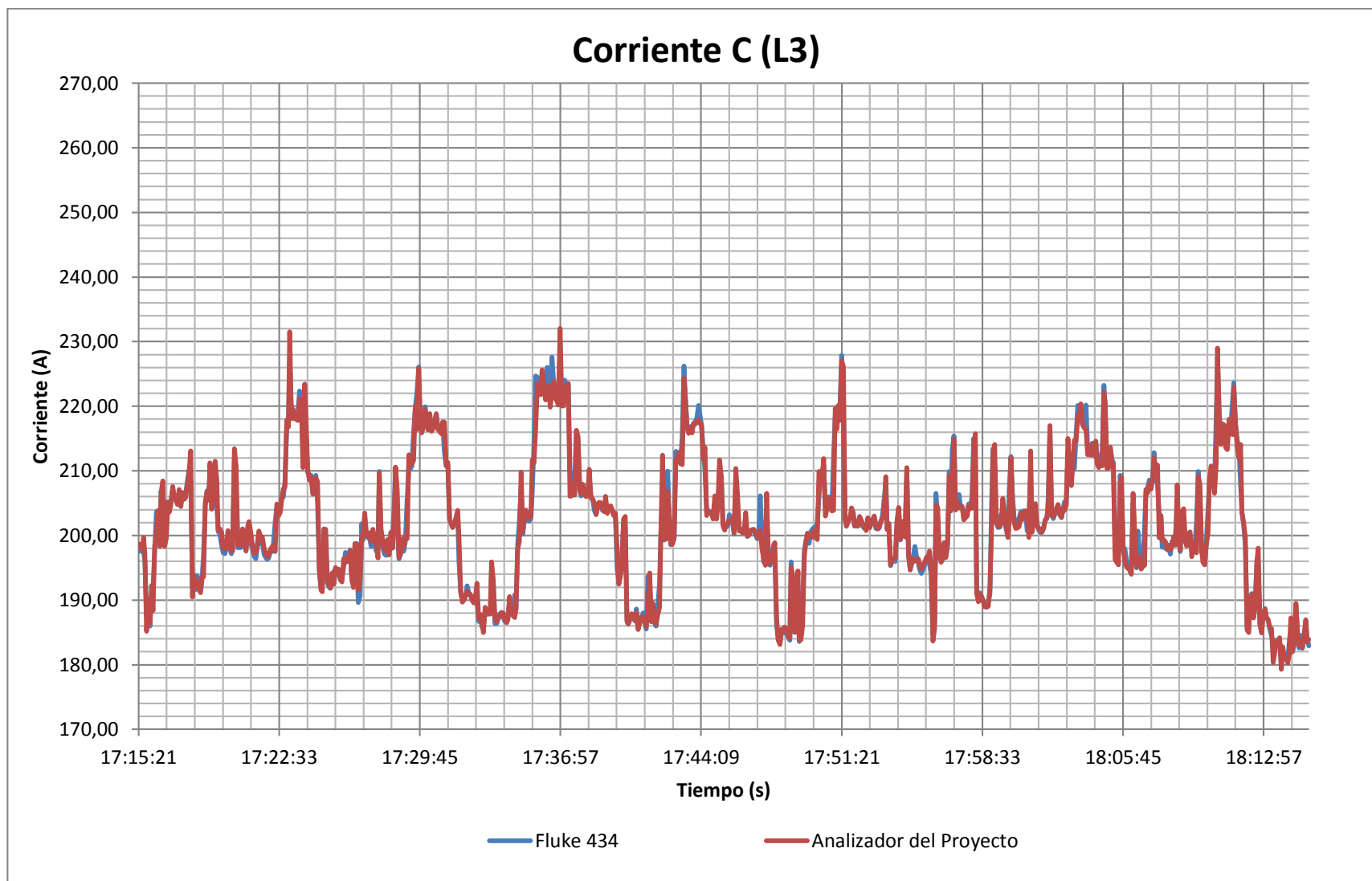


Figura 4.16. Histórico de corrientes C (L3) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.2.3. Tercera prueba experimental.

La Tabla 4.6, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro corriente de fase. En las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19 se muestra el comportamiento durante el tercer periodo de medición comprendida entre las 07:20:27 p.m. y 09:00:47 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.6. Resumen de corrientes obtenidas en el tercer ensayo.

	Amp A (L1)		Amp B (L2)		Amp C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	1205	1205	1205	1205	1205	1205
Valor máximo registrado (A)	160.10	161.55	197.40	194.39	184.70	190.54
Valor mínimo registrado (A)	95.20	95.23	145.50	145.68	127.30	126.81
Valor promedio (A)	130.00	130.64	167.42	167.82	154.11	154.12
Error máximo (%)	5.543		14.086		8.348	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 14.086%, sin embargo el 97.3% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

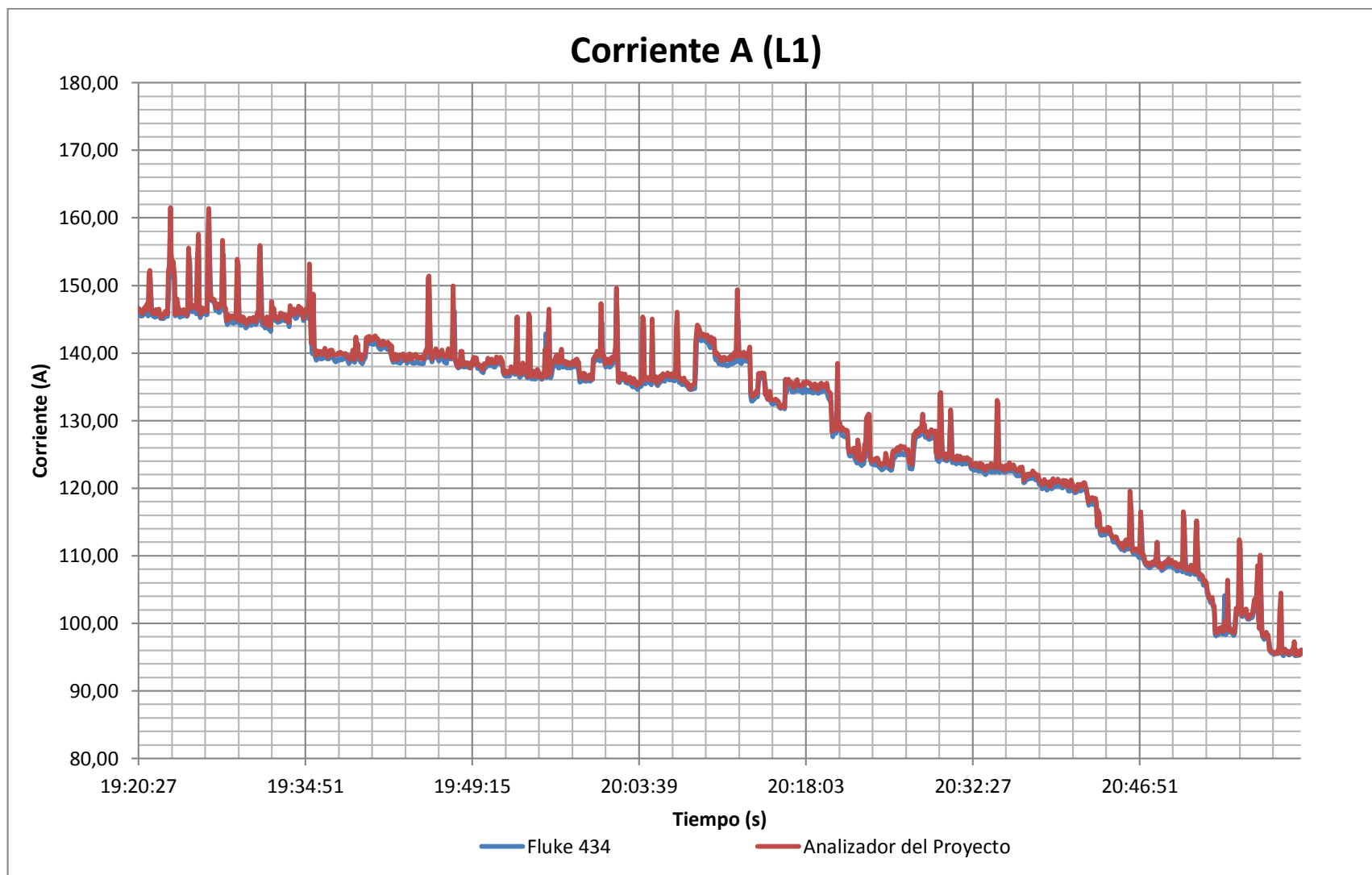


Figura 4.17. Histórico de corrientes A (L1) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

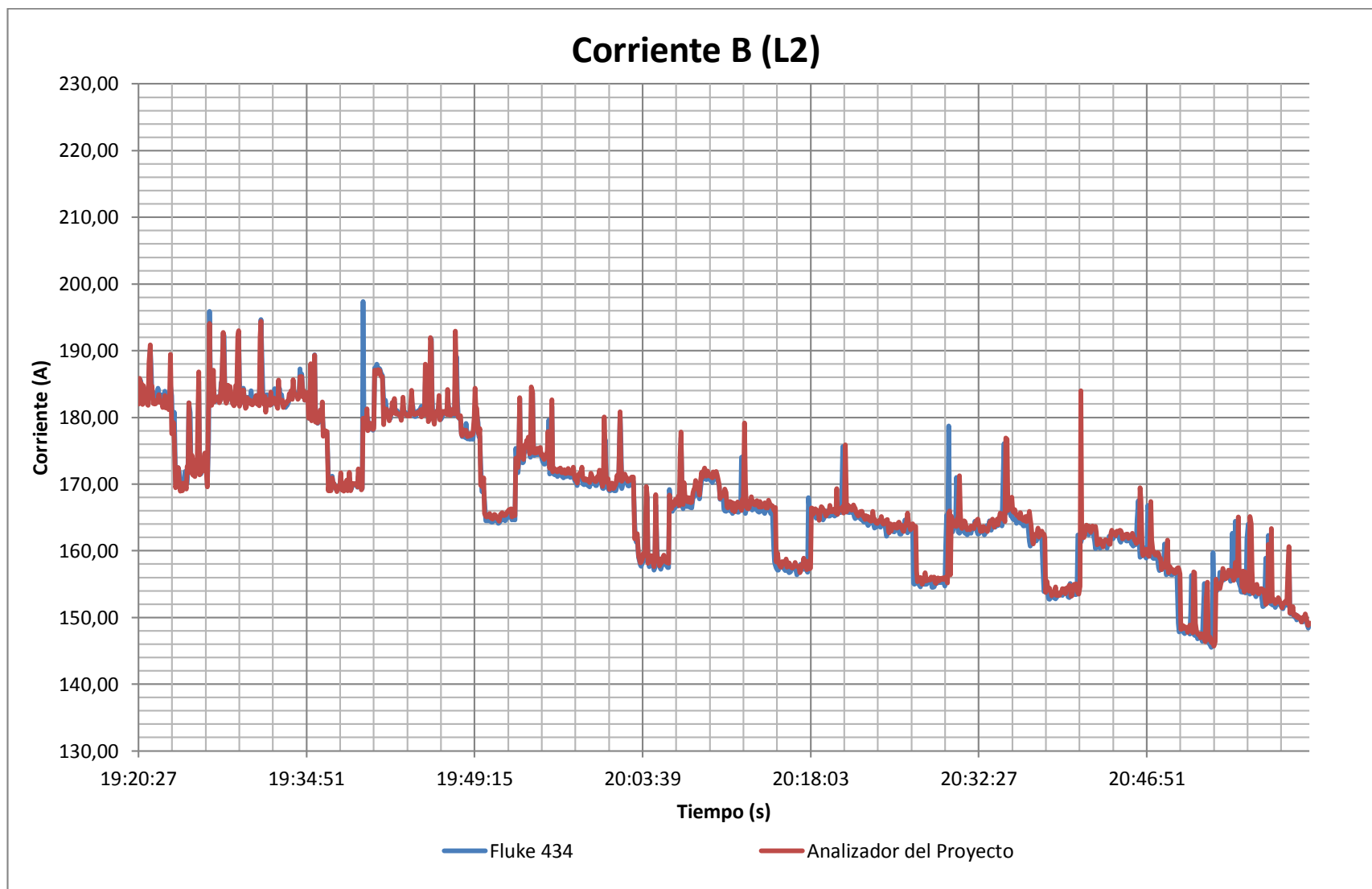


Figura 4.18. Histórico de corrientes B (L2) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

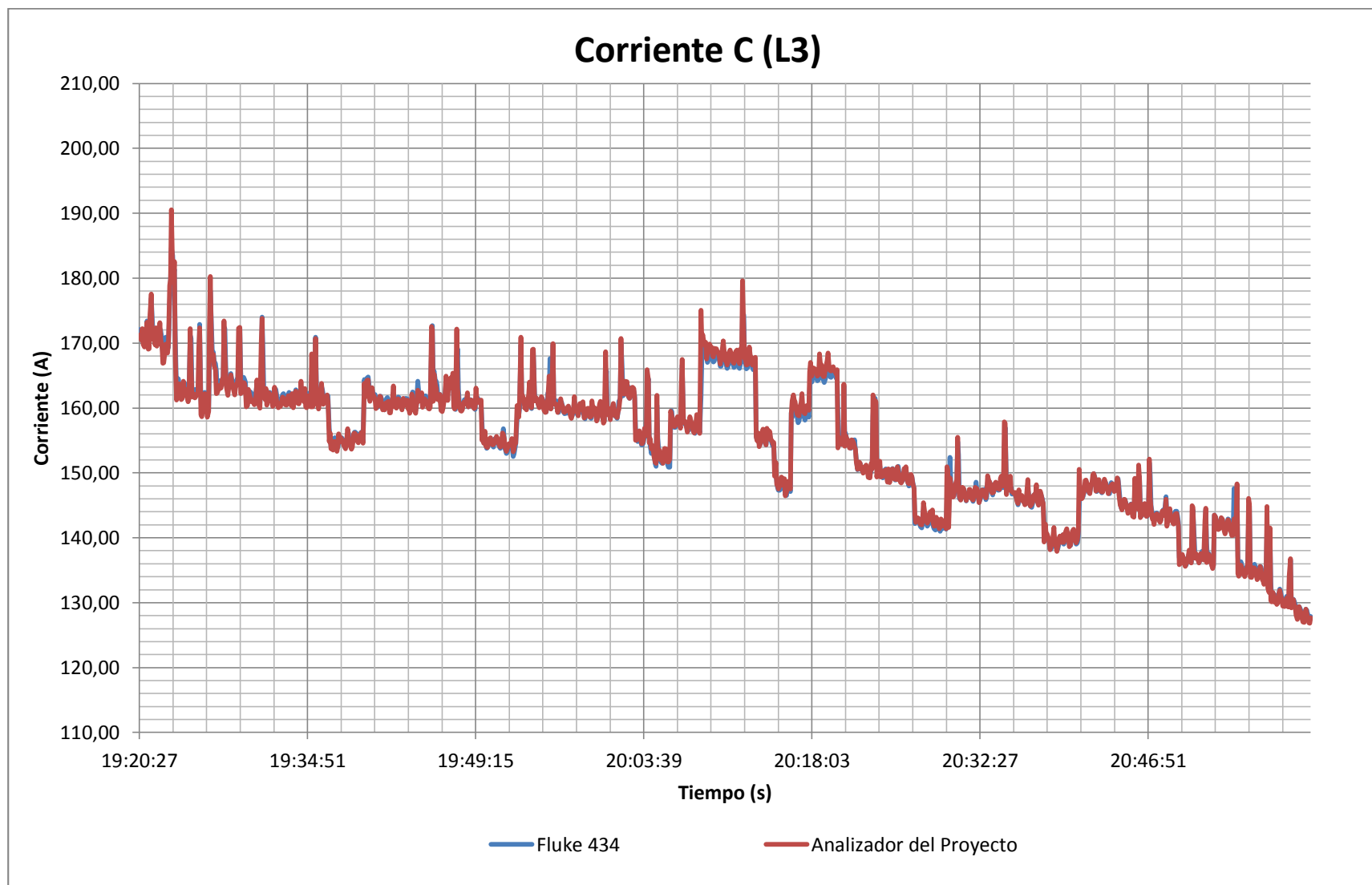


Figura 4.19. Histórico de corrientes C (L3) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.3. Potencia real de fase.

Los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia real de fase, realizado en el tablero de distribución del Edificio de Unidades Productivas, se detallan en los siguientes apartados. En estos ensayos se recalca que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes distintos.

4.2.3.1. Primera prueba experimental.

La Tabla 4.7, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia real de fase. En las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se muestra el comportamiento durante el primer periodo de medición comprendida entre las 08:48:25 a.m. y 10:00:00 a.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.7. Resumen de potencias reales obtenidas en el primer ensayo.

	Potencia Real A (L1)		Potencia Real B (L2)		Potencia Real C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	860	860	860	860	860	860
Valor máximo registrado (kW)	24.07	24.9	27.85	27.55	27.87	28.53
Valor mínimo registrado (kW)	16.92	16.61	21.55	21.25	19.88	19.77
Valor promedio (kW)	20.50	20.66	24.03	23.75	23.12	23.12
Error máximo (%)	7.142		6.484		6.985	
Error mínimo (%)	1.25E-05		1.25E-05		0.00072	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 7.142%, sin embargo el 97.4% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

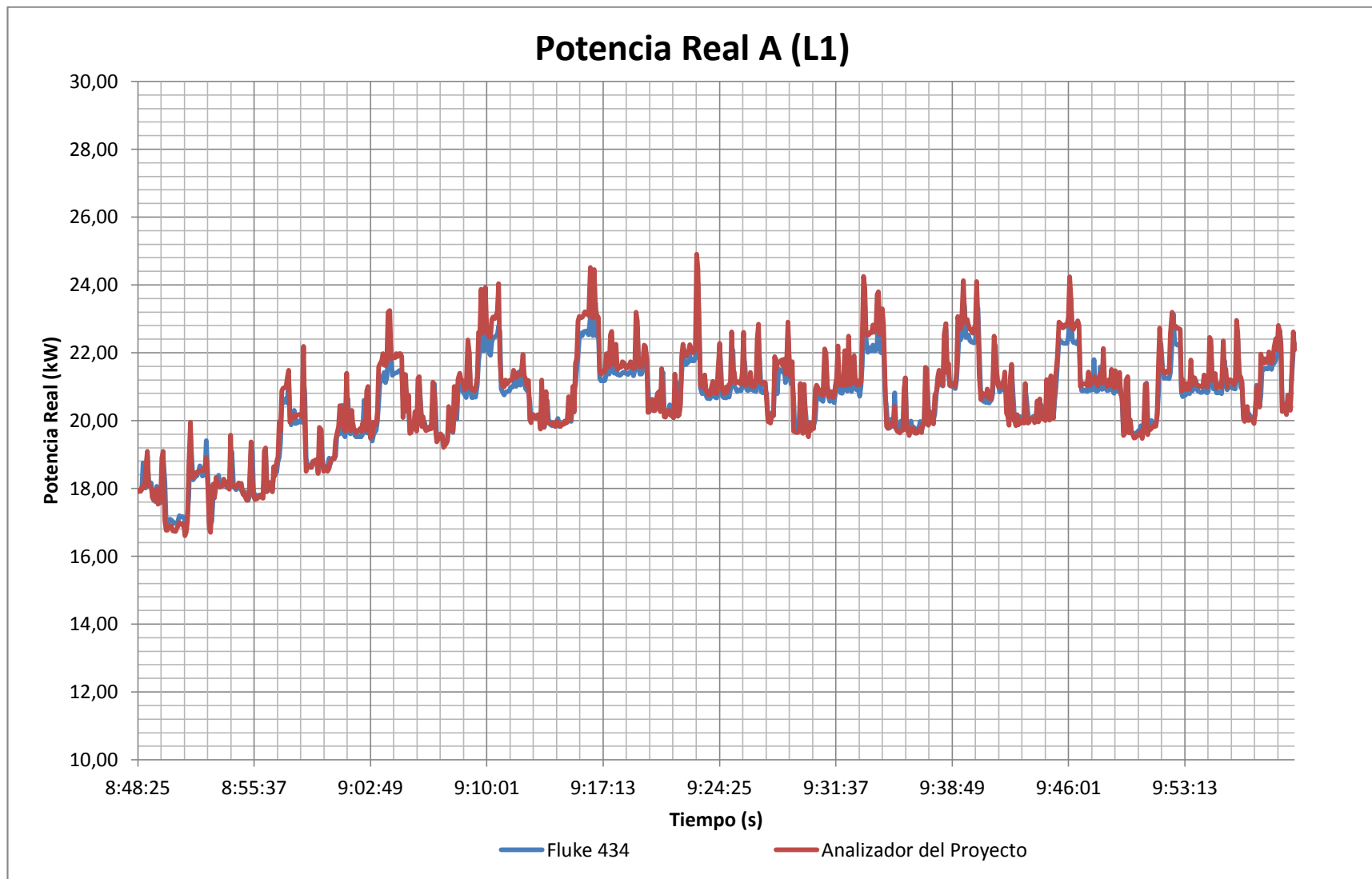


Figura 4.20. Histórico de potencias reales A (L1) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

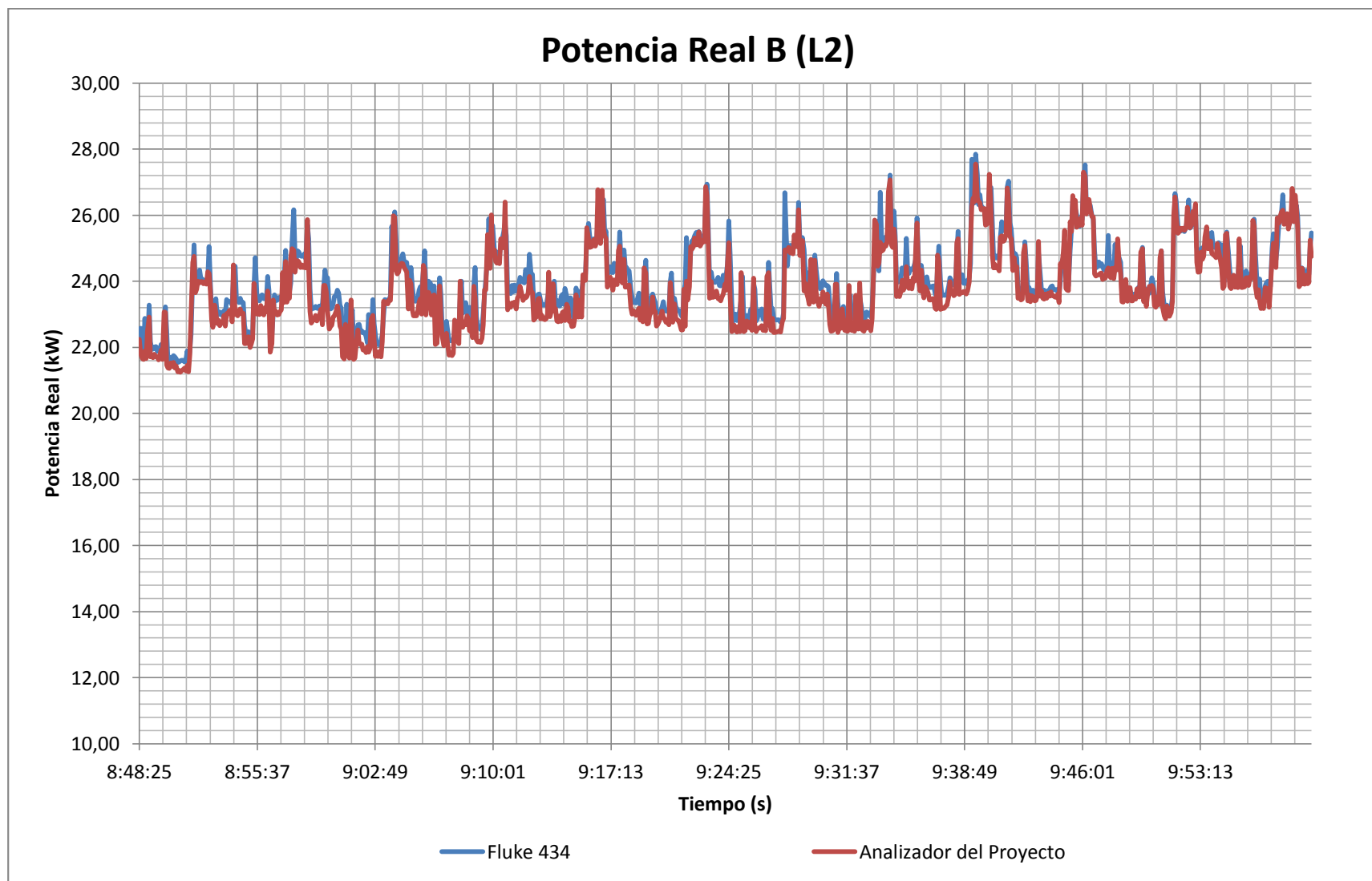


Figura 4.21. Histórico de potencias reales B (L2) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

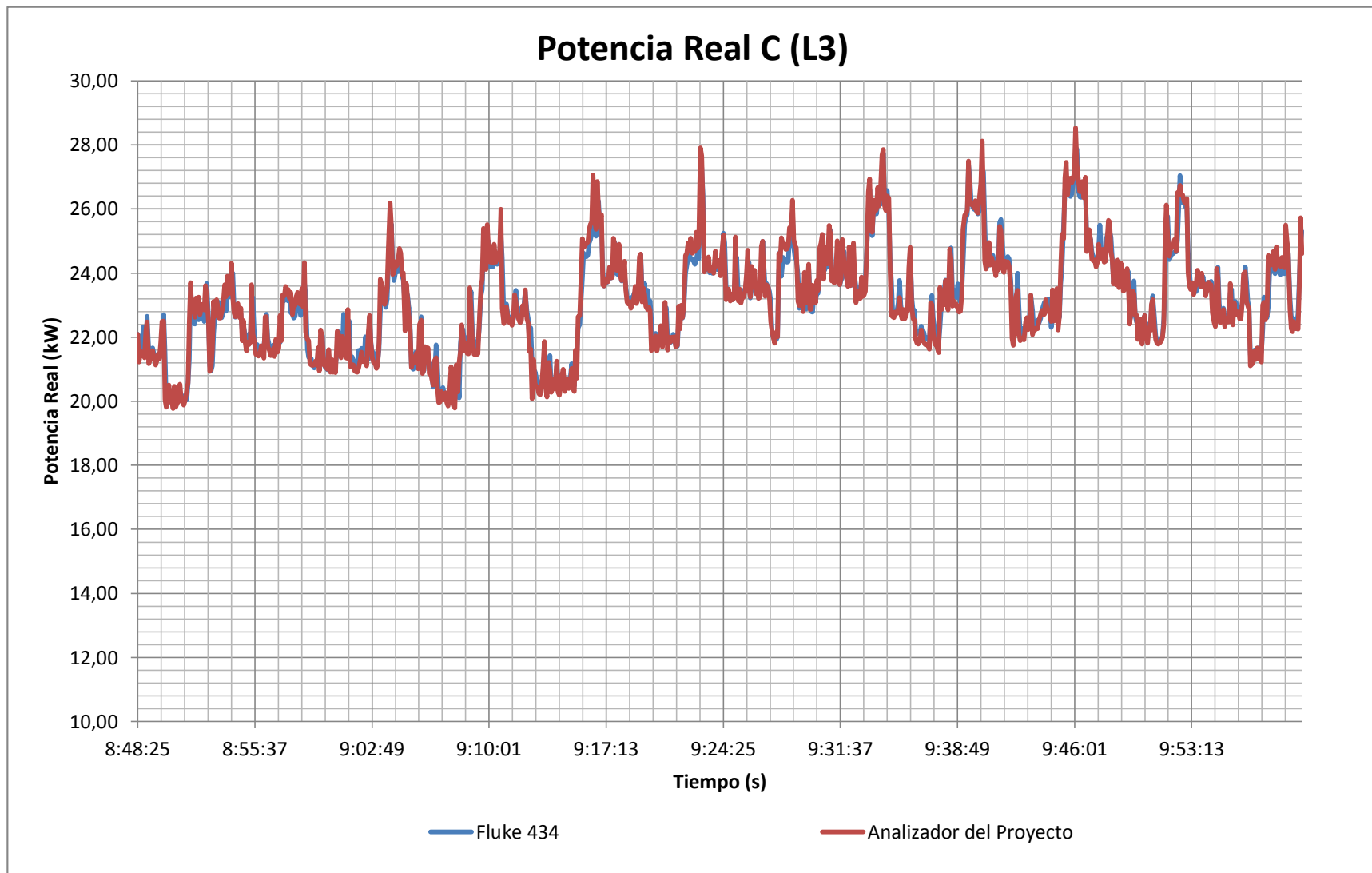


Figura 4.22. Histórico de potencias reales C (L3) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.3.2. Segunda prueba experimental.

La Tabla 4.8, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia real de fase. En las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25 se muestra el comportamiento durante el segundo periodo de medición comprendida entre las 05:15:21 p.m. y 06:15:16 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.8. Resumen de potencias reales obtenidas en el tercer ensayo.

	Potencia Real A (L1)		Potencia Real B (L2)		Potencia Real C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	720	720	720	720	720	720
Valor máximo registrado (kW)	23.68	24.14	29.44	32.61	28.16	28.38
Valor mínimo registrado (kW)	18.89	18.45	23.62	23.52	22.27	21.89
Valor promedio (kW)	20.91	20.91	25.40	25.55	24.75	24.60
Error máximo (%)	7.291		10.755		6.901	
Error mínimo (%)	1.2E-05		1.3E-05		1.2E-05	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 10.755%, sin embargo el 99% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

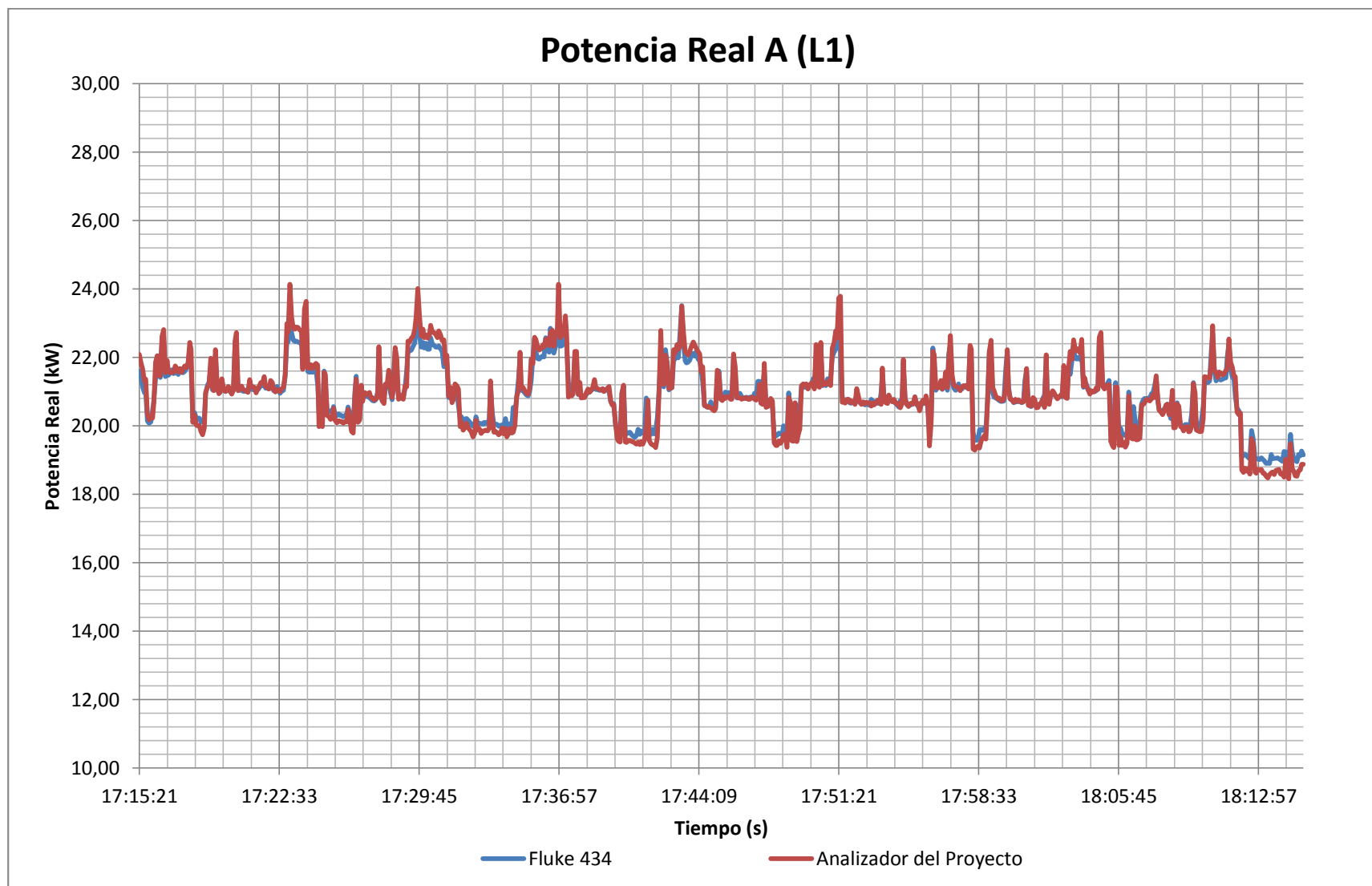


Figura 4.23. Histórico de potencias reales A (L1) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

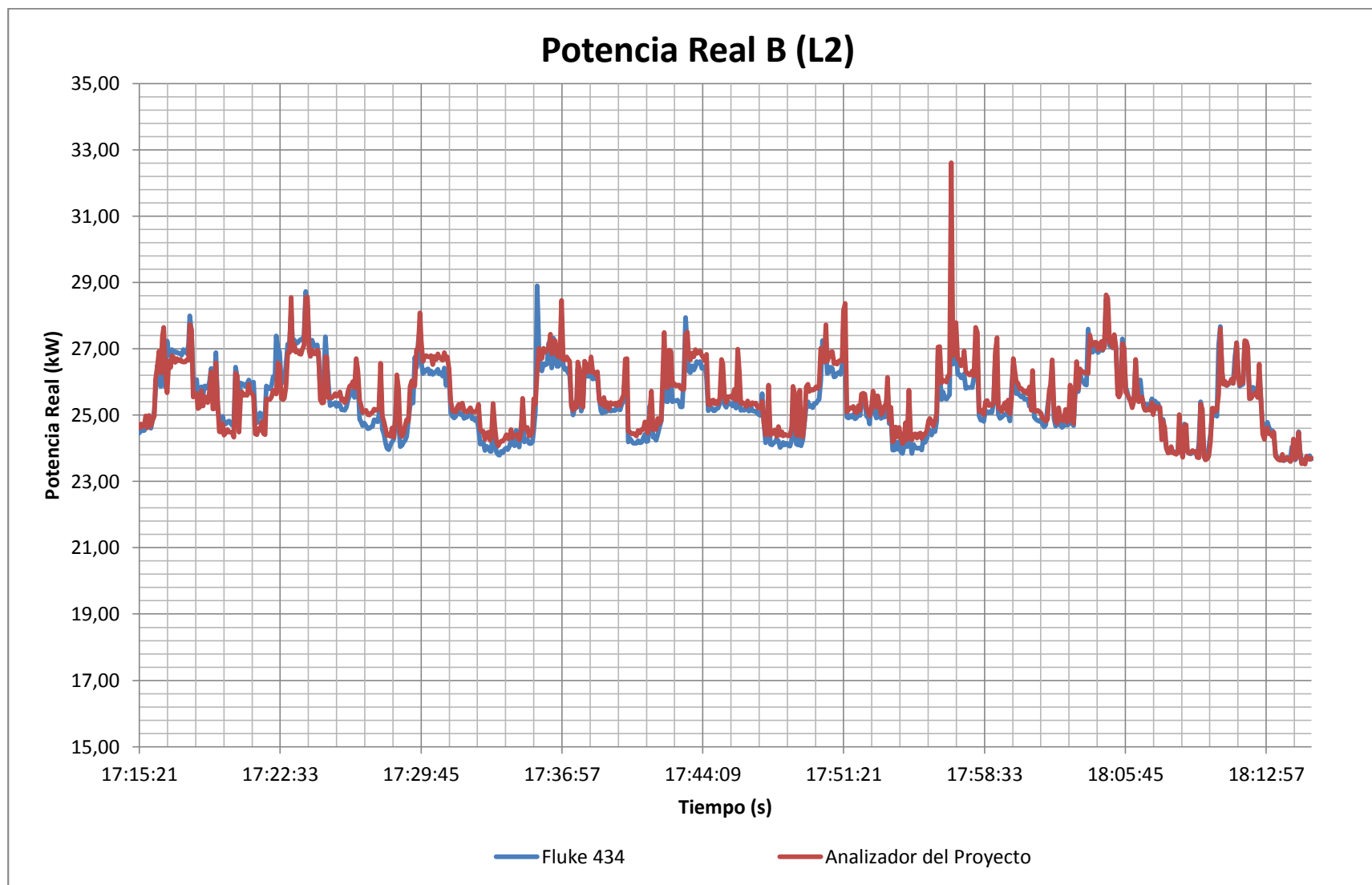


Figura 4.24. Histórico de potencias reales B (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

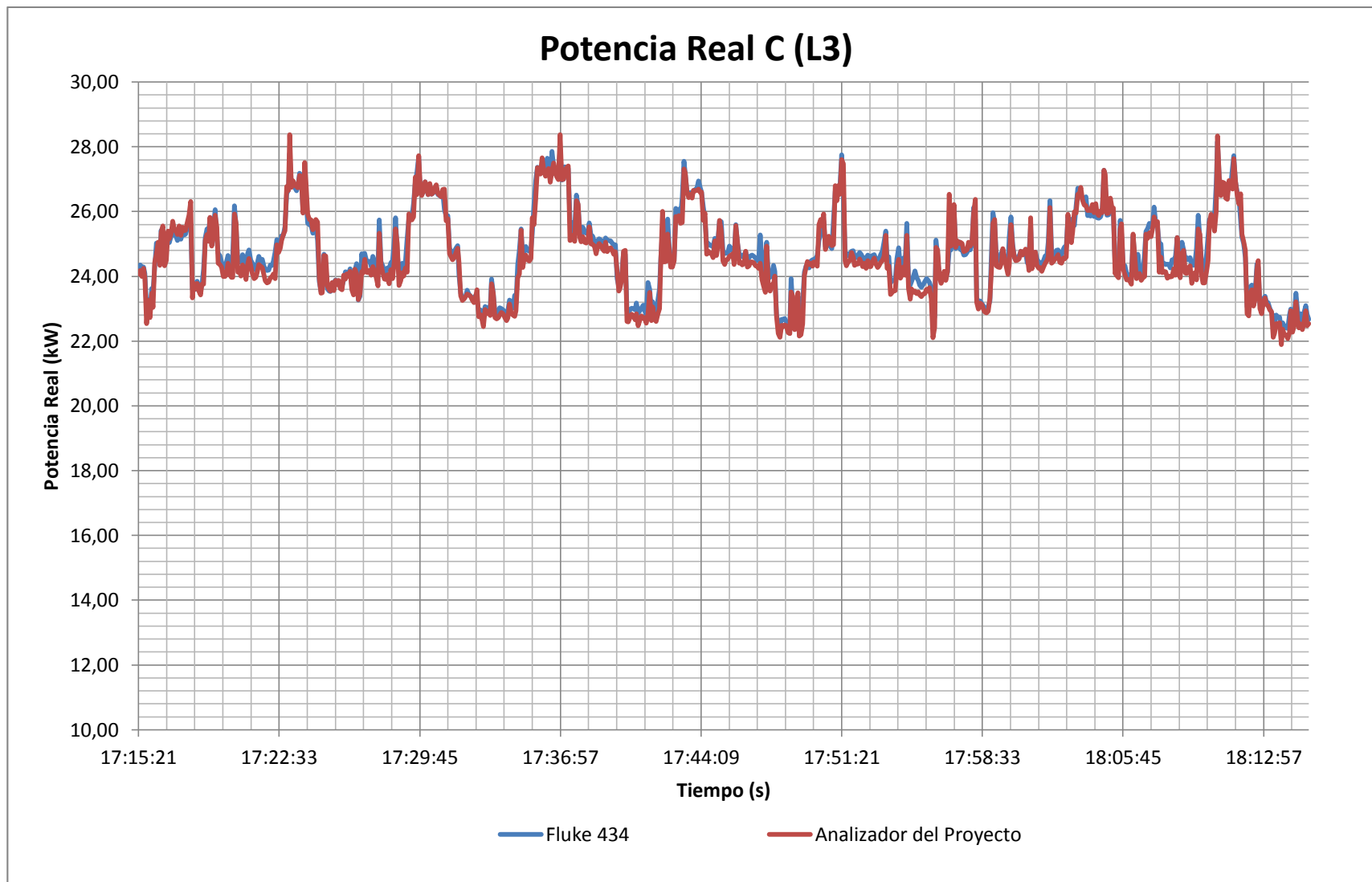


Figura 4.25. Histórico de potencias reales C (L3) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.3.3. Tercera prueba experimental.

La Tabla 4.9, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia real de fase. En las Figuras 4.26, 4.27 y 4.28 se muestra el comportamiento durante el tercer periodo de medición comprendida entre las 07:20:27 p.m. y 09:00:47 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.9. Resumen de potencias reales obtenidas en el tercer ensayo.

	Potencia Real A (L1)		Potencia Real B (L2)		Potencia Real C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	1205	1205	1205	1205	1205	1205
Valor máximo registrado (kW)	19.64	20.00	23.88	23.57	22.75	23.48
Valor mínimo registrado (kW)	11.84	11.62	18.03	17.80	15.92	16.03
Valor promedio (kW)	16.02	16.01	20.54	20.35	19.08	19.12
Error máximo (%)	4.974		13.456		8.216	
Error mínimo (%)	1.25E-05		1.25E-05		1.25E-05	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 13.456%, sin embargo el 97.5% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

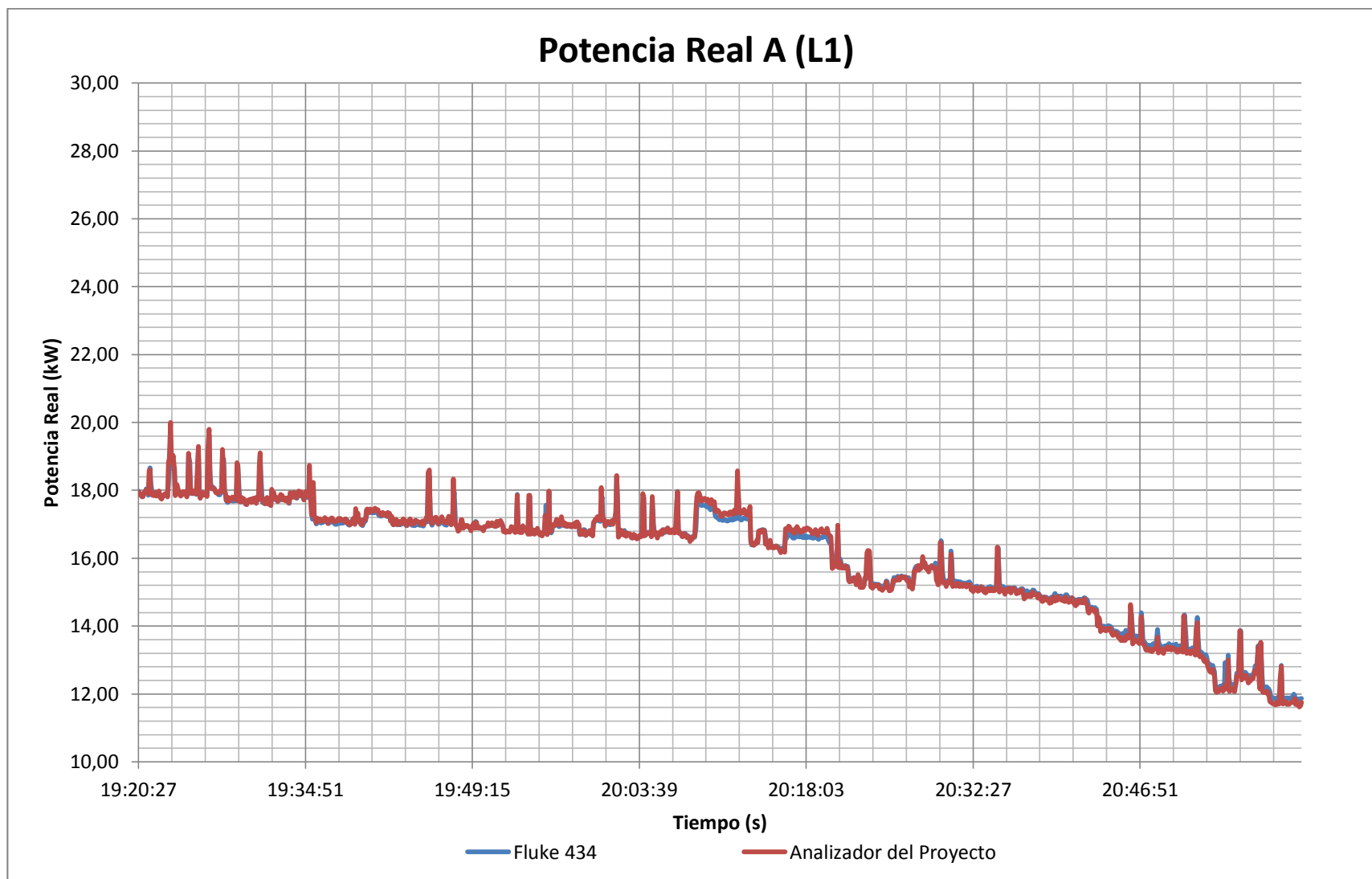


Figura 4.26. Histórico de potencias reales A (L1) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

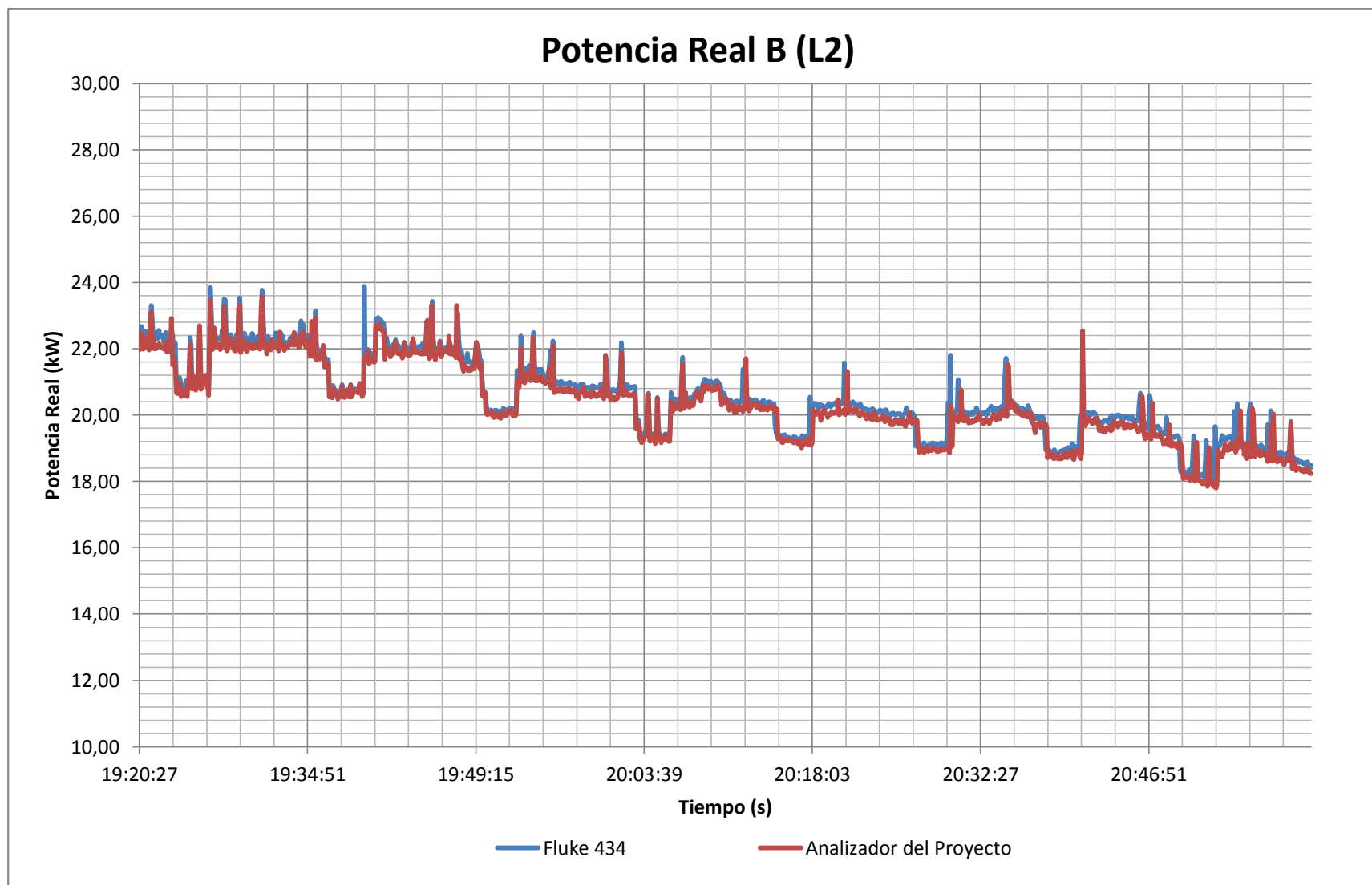


Figura 4.27. Histórico de potencias reales B (L2) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

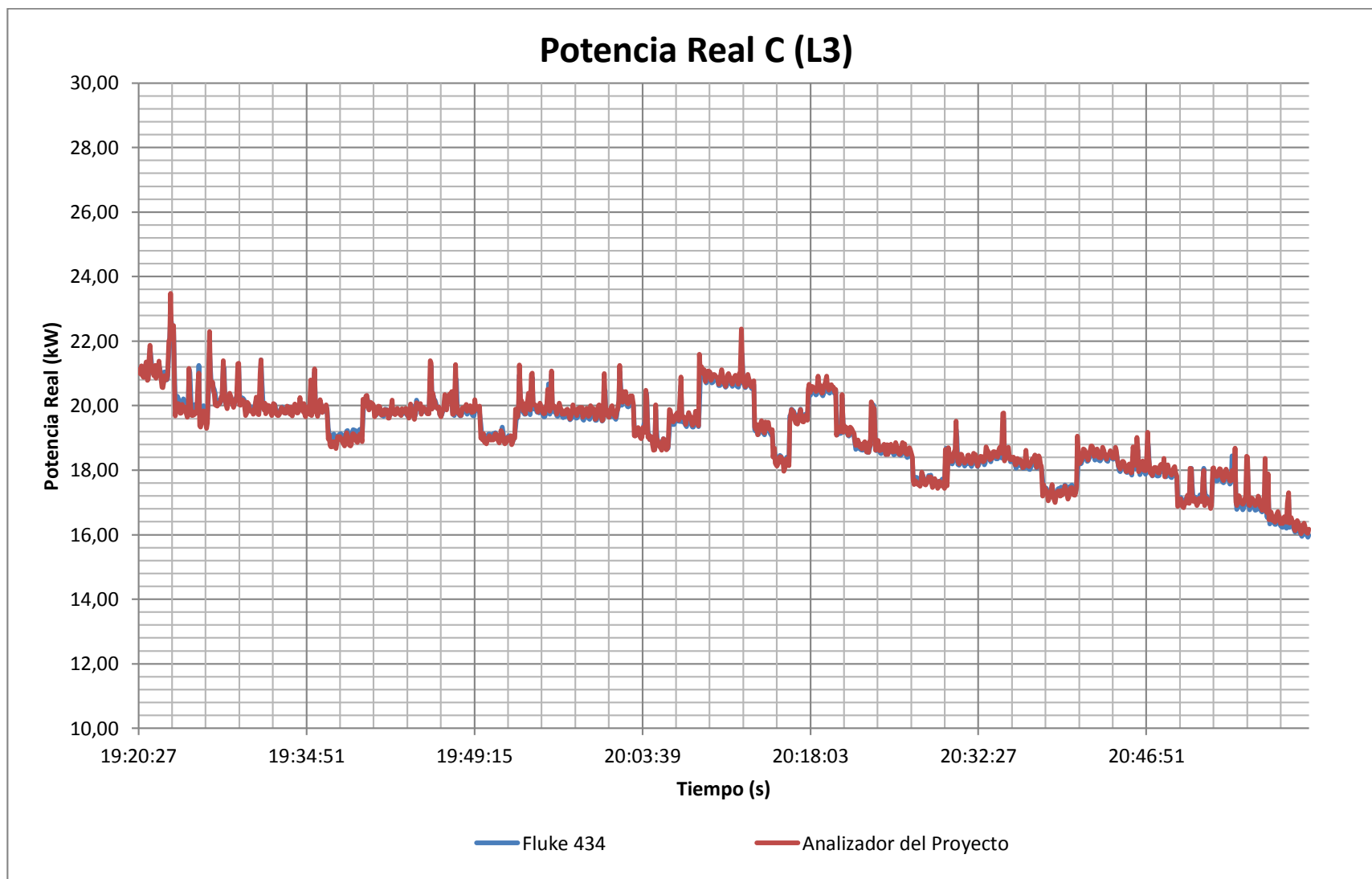


Figura 4.28. Histórico de potencias reales C (L3) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.4. Potencia aparente de fase.

Los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia aparente de fase, realizado en el tablero de distribución del Edificio de Unidades Productivas, se detallan en los siguientes apartados. En estos ensayos se recalca que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes distintos.

4.2.4.1. Primera prueba experimental.

La Tabla 4.10, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia aparente de fase. En las Figuras 4.29, 4.30 y 4.31 se muestra el comportamiento durante el primer periodo de medición comprendida entre las 08:48:25 a.m. y 10:00:00 a.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.10. Resumen de potencias aparentes obtenidas en el primer ensayo.

	Potencia Aparente A (L1)		Potencia Aparente B (L2)		Potencia Aparente C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	860	860	860	860	860	860
Valor máximo registrado (kVA)	24.09	24.73	27.87	29.11	27.91	28.61
Valor mínimo registrado (kVA)	16.99	17.03	21.57	21.74	19.88	20.01
Valor promedio (kVA)	20.52	20.80	24.03	23.75	23.14	23.42
Error máximo (%)	6.728		5.994		8.123	
Error mínimo (%)	0.0145		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 8.123%, sin embargo el 97.6% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

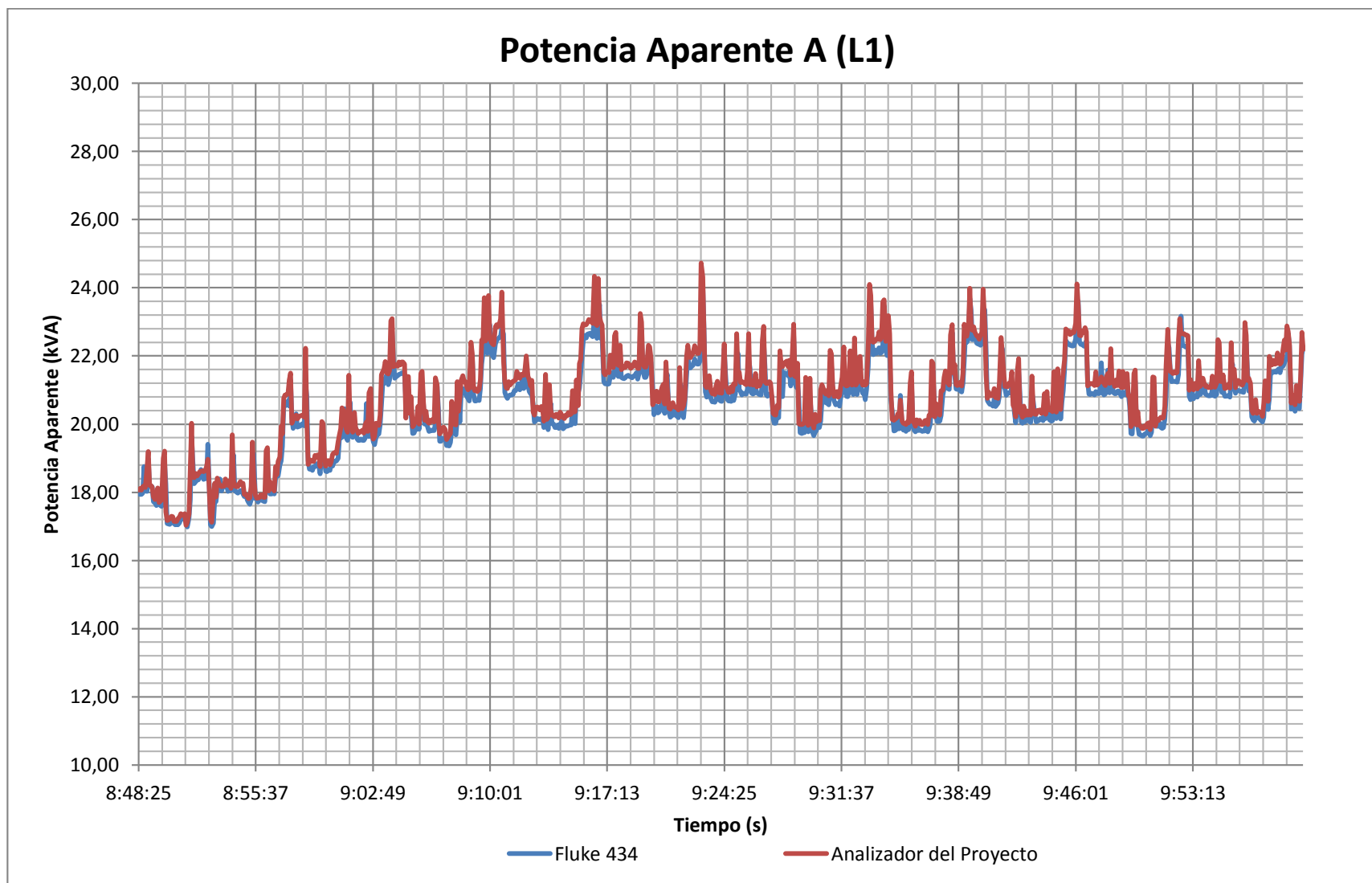


Figura 4.29. Histórico de potencias aparentes A (L1) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

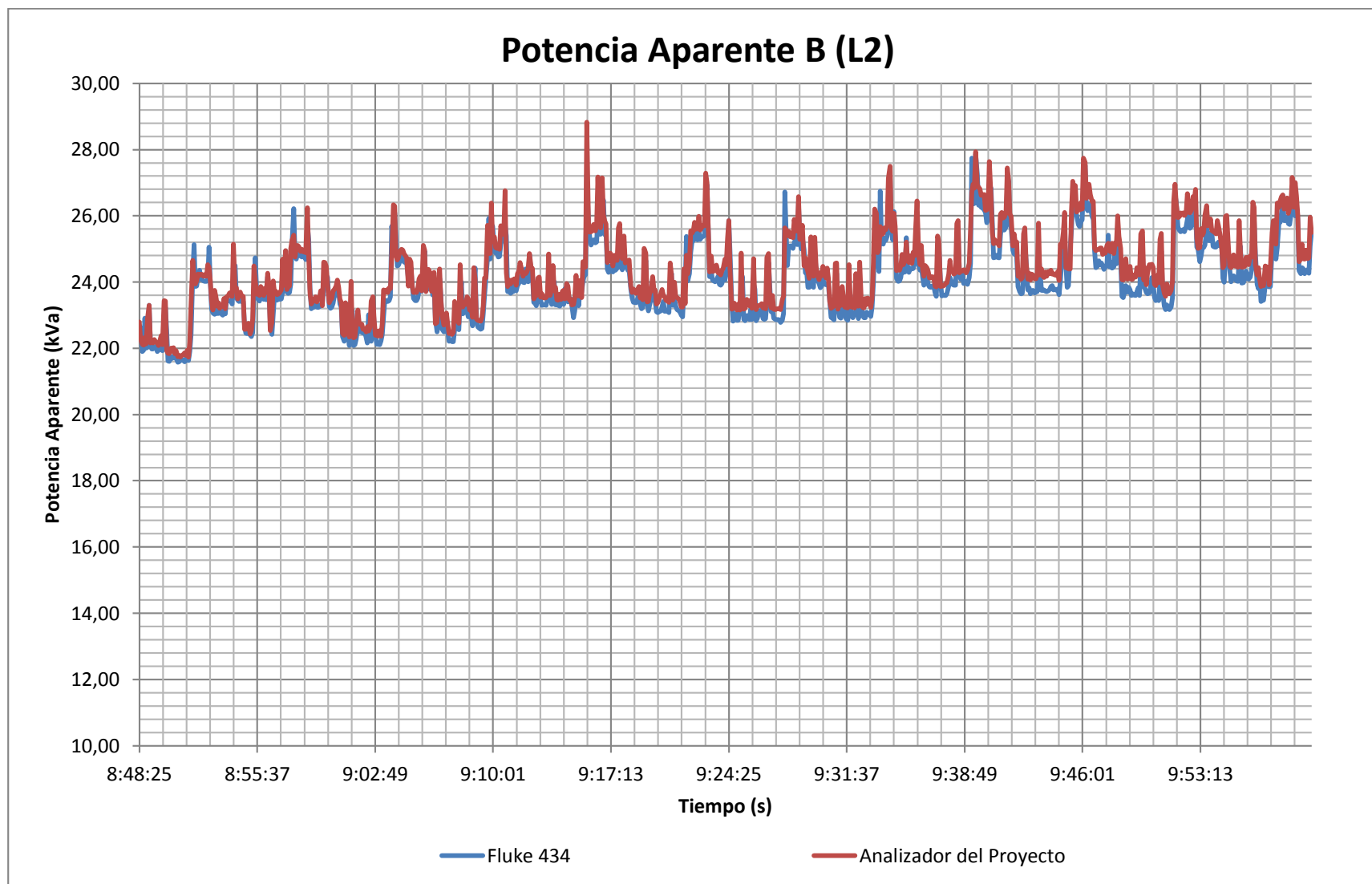


Figura 4.30. Histórico de potencias aparentes B (L2) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

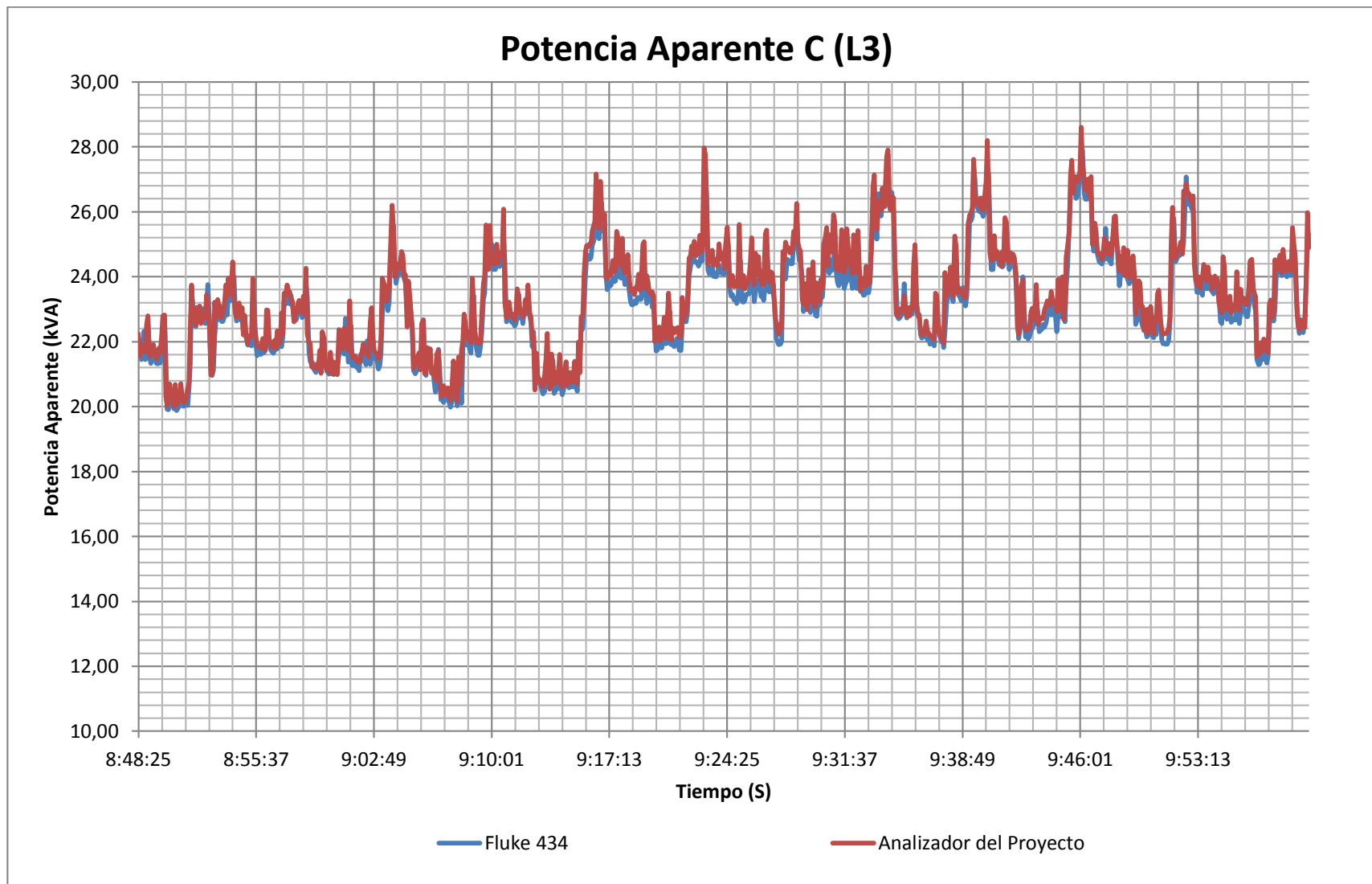


Figura 4.31. Histórico de potencias aparentes C (L3) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.4.2. Segunda prueba experimental.

La Tabla 4.11, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia aparente de fase. En las Figuras 4.32, 4.33 y 4.34 se muestra el comportamiento durante el segundo periodo de medición comprendida entre las 05:15:21 p.m. y 06:15:16 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.11. Resumen de potencias aparentes obtenidas en el segundo ensayo.

	Potencia Aparente A (L1)		Potencia Aparente B (L2)		Potencia Aparente C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	720	720	720	720	720	720
Valor máximo registrado (kVA)	23.71	24.15	30.20	32.62	28.19	28.41
Valor mínimo registrado (kVA)	18.93	18.86	24.41	24.33	22.28	22.13
Valor promedio (kVA)	20.93	21.02	26.02	26.07	24.76	24.79
Error máximo (%)	6.415		10.432		3.713	
Error mínimo (%)	1.2E-05		1.2E-05		1.2E-05	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 10.432%, sin embargo el 99.3% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

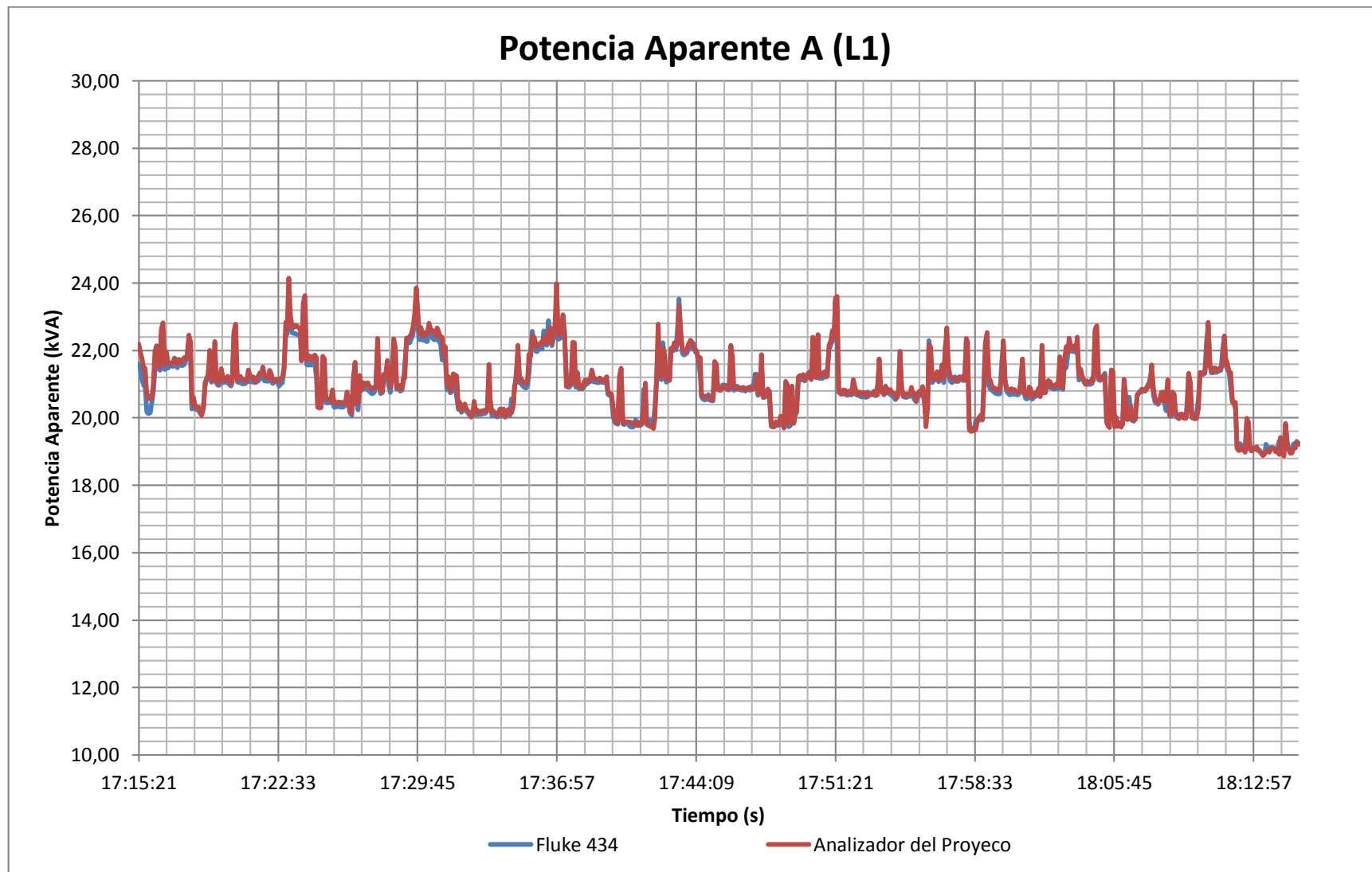


Figura 4.32. Histórico de potencias aparentes A (L1) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

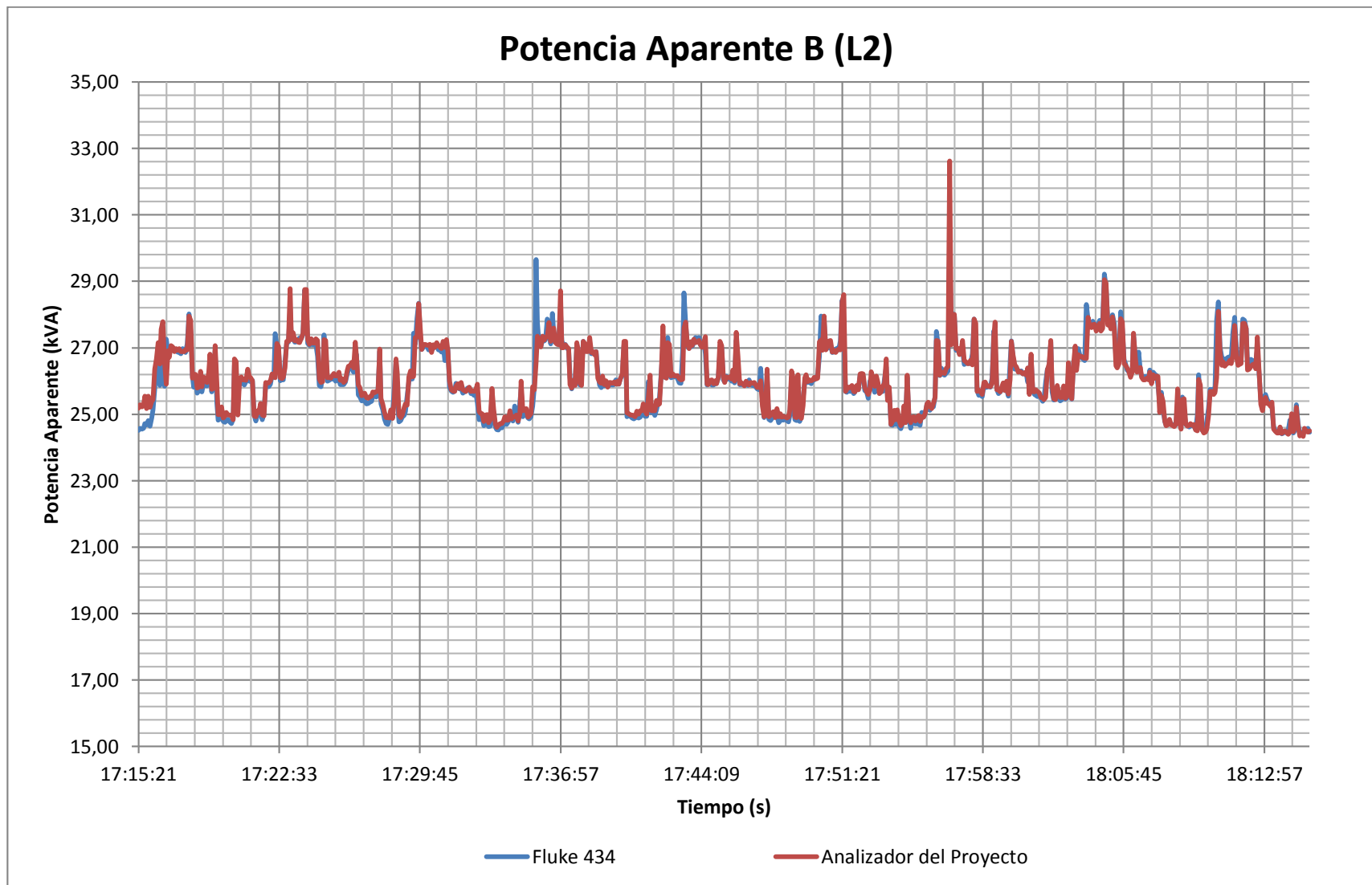


Figura 4.33. Histórico de potencias aparentes B (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

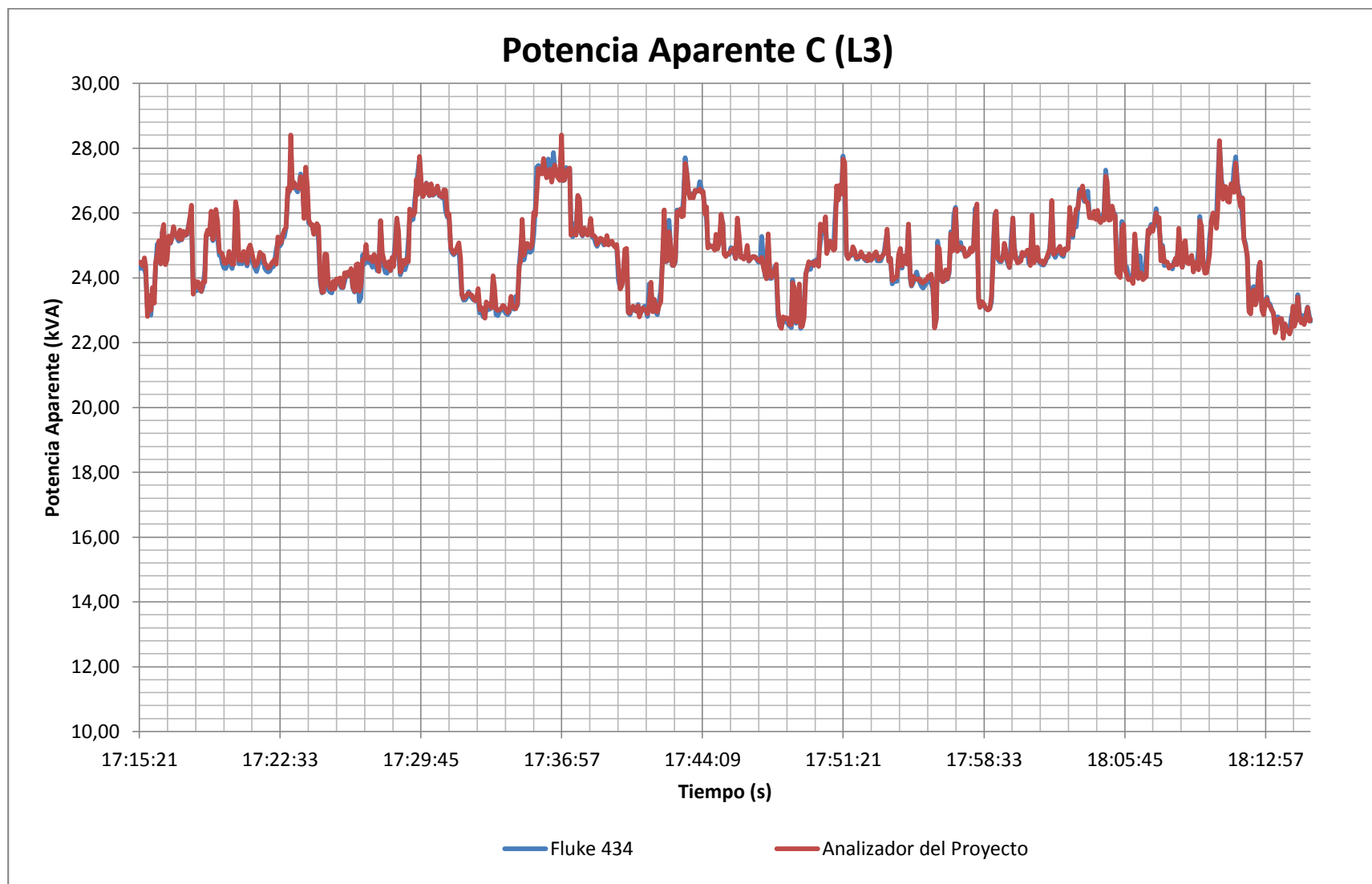


Figura 4.34. Histórico de potencias aparentes C (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.4.3. Tercera prueba experimental.

La Tabla 4.12, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia aparente de fase. En las Figuras 4.35, 4.36 y 4.37 se muestra el comportamiento durante el tercer periodo de medición comprendida entre las 07:20:27 p.m. y 09:00:47 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.12. Resumen de potencias aparentes obtenidas en el tercer ensayo.

	Potencia Aparente A (L1)		Potencia Aparente B (L2)		Potencia Aparente C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	1205	1205	1205	1205	1205	1205
Valor máximo registrado (kVA)	19.68	20.01	23.97	23.58	22.75	23.51
Valor mínimo registrado (kVA)	11.92	11.84	18.17	17.97	15.93	16.04
Valor promedio (kVA)	16.07	16.15	24.03	23.75	19.09	19.14
Error máximo (%)	5.174		5.994		8.895	
Error mínimo (%)	1.25E-05		0.000		1.25E-05	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 8.895%, sin embargo el 98.2% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

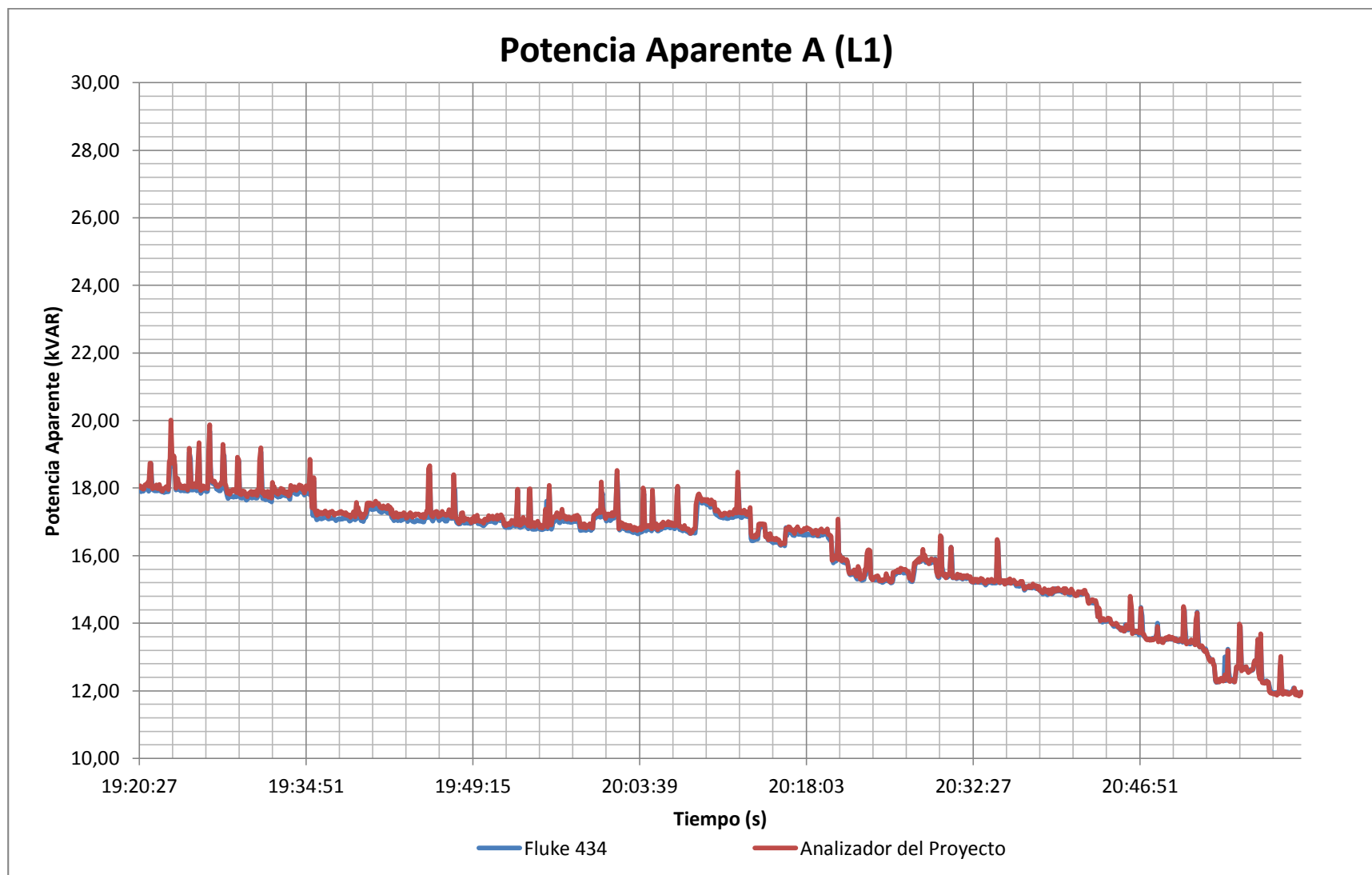


Figura 4.35. Histórico de potencias aparentes A (L1) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

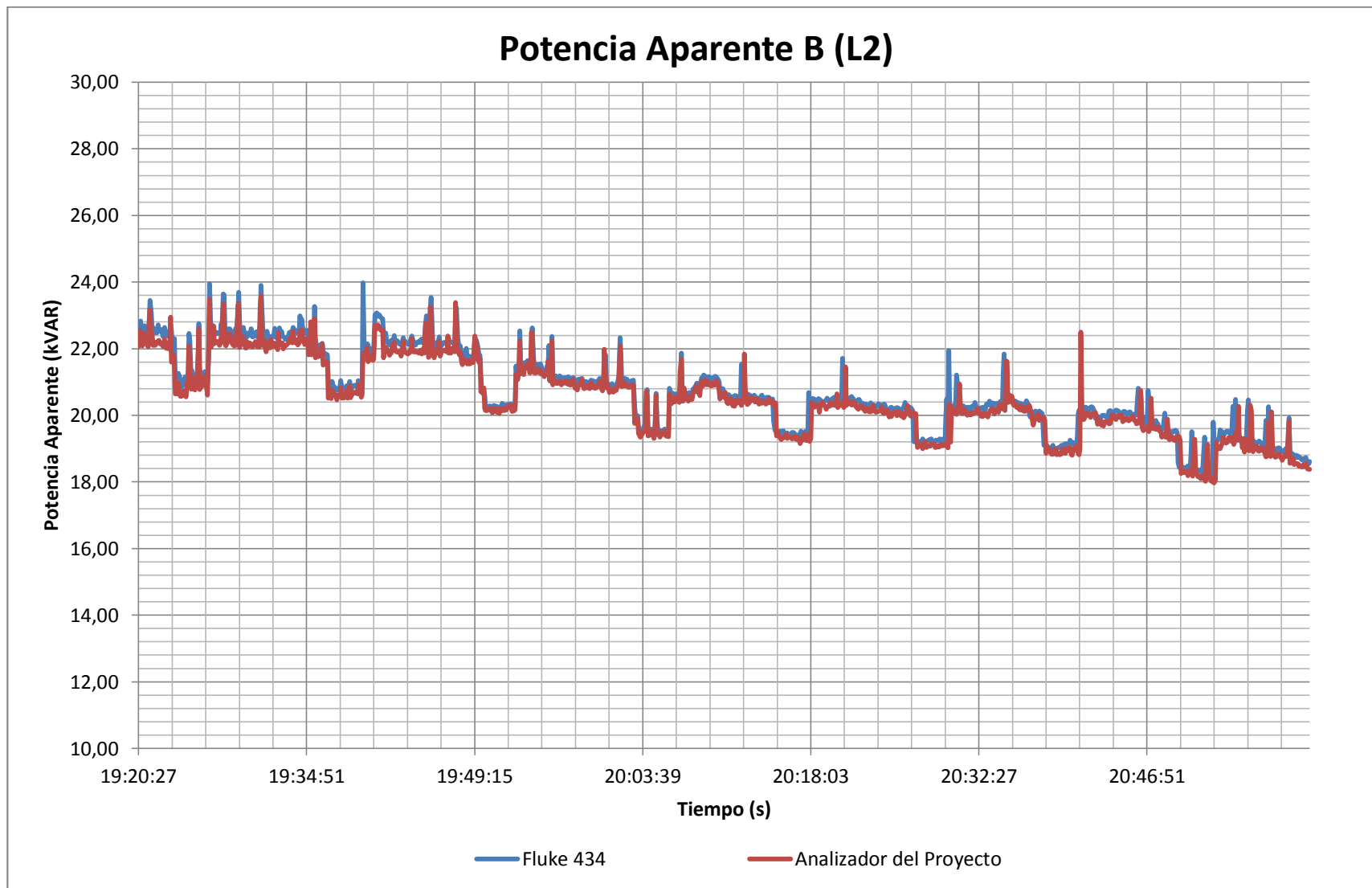


Figura 4.36. Histórico de potencias aparentes B (L2) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

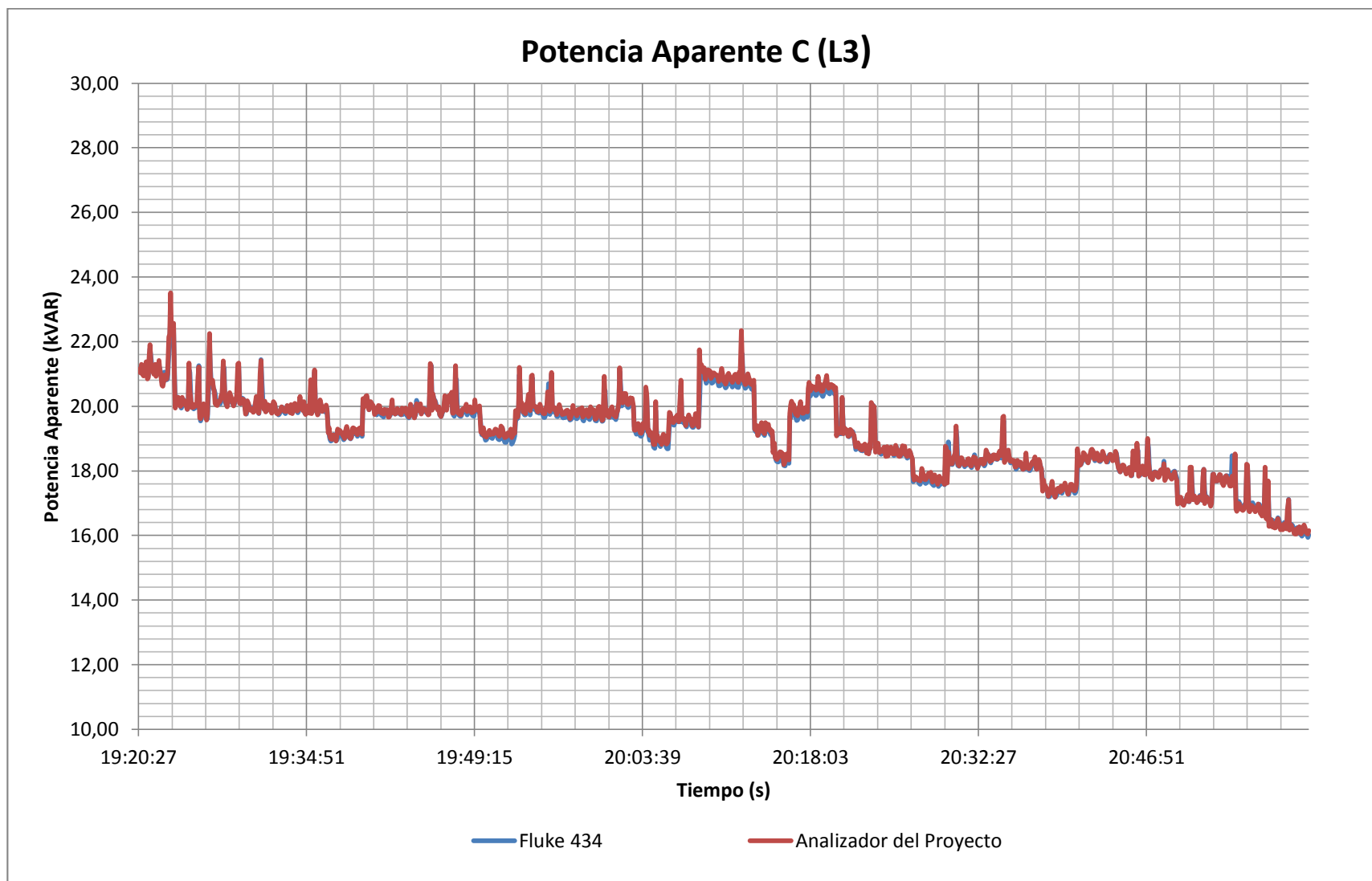


Figura 4.37. Histórico de potencias aparentes C (L3) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.5. Potencia reactiva de fase.

Los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia reactiva de fase, realizado en el tablero de distribución del Edificio de Unidades Productivas, se detallan en los siguientes apartados. En estos ensayos se recalca que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes distintos.

4.2.5.1. Primera prueba experimental.

La Tabla 4.13, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia reactiva de fase. En las Figuras 4.38, 4.39 y 4.40 se muestra el comportamiento durante el primer periodo de medición comprendida entre las 08:48:25 a.m. y 10:00:00 a.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.13. Resumen de potencias reactivas obtenidas en el primer ensayo.

	Potencia Reactiva A (L1)		Potencia Reactiva B (L2)		Potencia Reactiva C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	860	860	860	860	860	860
Valor máximo registrado (kVAR)	1.51	1.88	1.63	1.73	3.19	3.10
Valor mínimo registrado (kVAR)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor promedio (kVAR)	0.61	0.63	0.99	0.98	0.53	0.53
Error máximo (%)	20.000		20.652		25.806	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 25.806%, sin embargo el 21.7% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%. Por lo tanto, el margen de error del 78.3% de las muestras adquiridas no son aceptables.

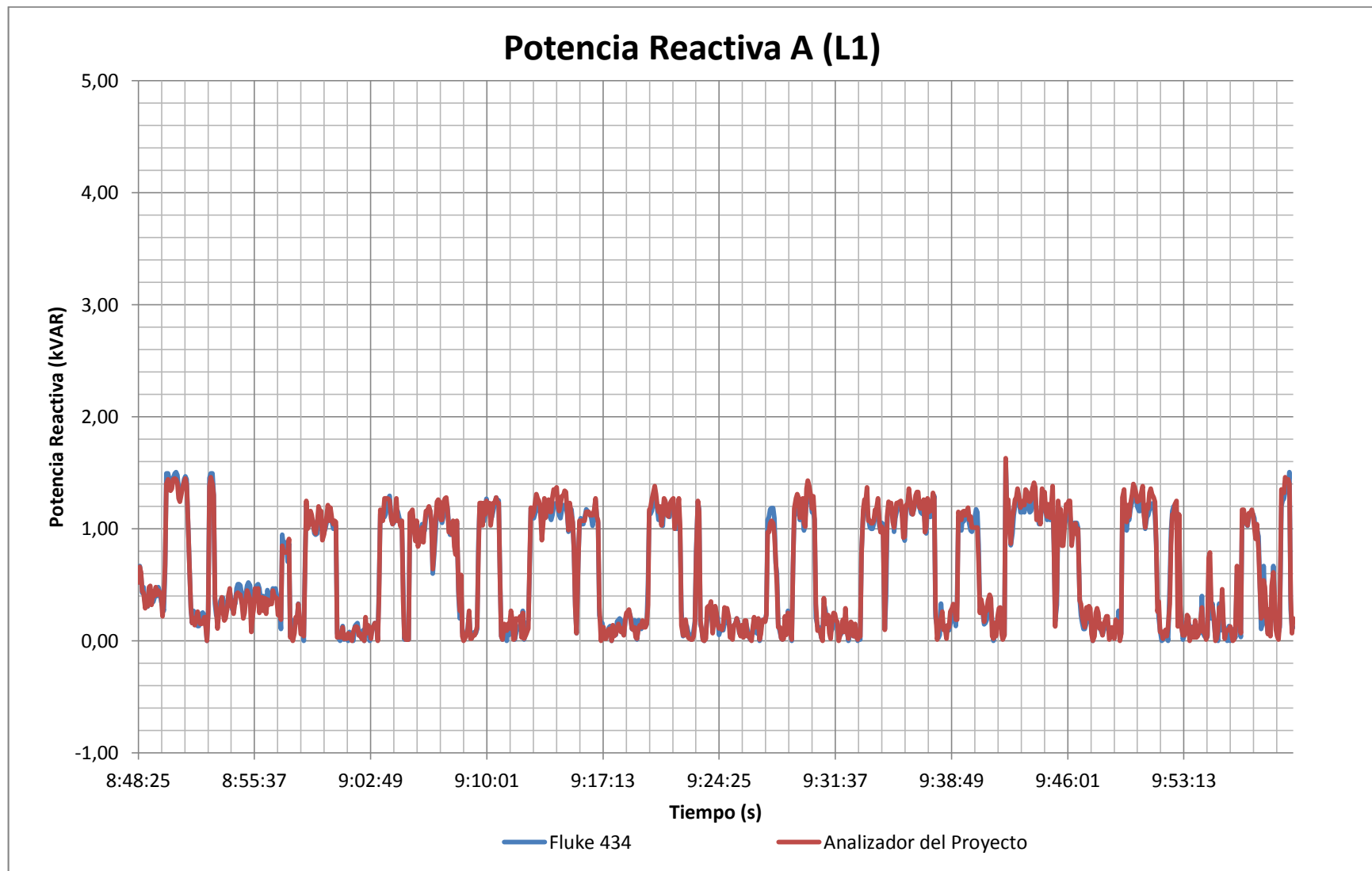


Figura 4.38. Histórico de potencias reactivas A (L1) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

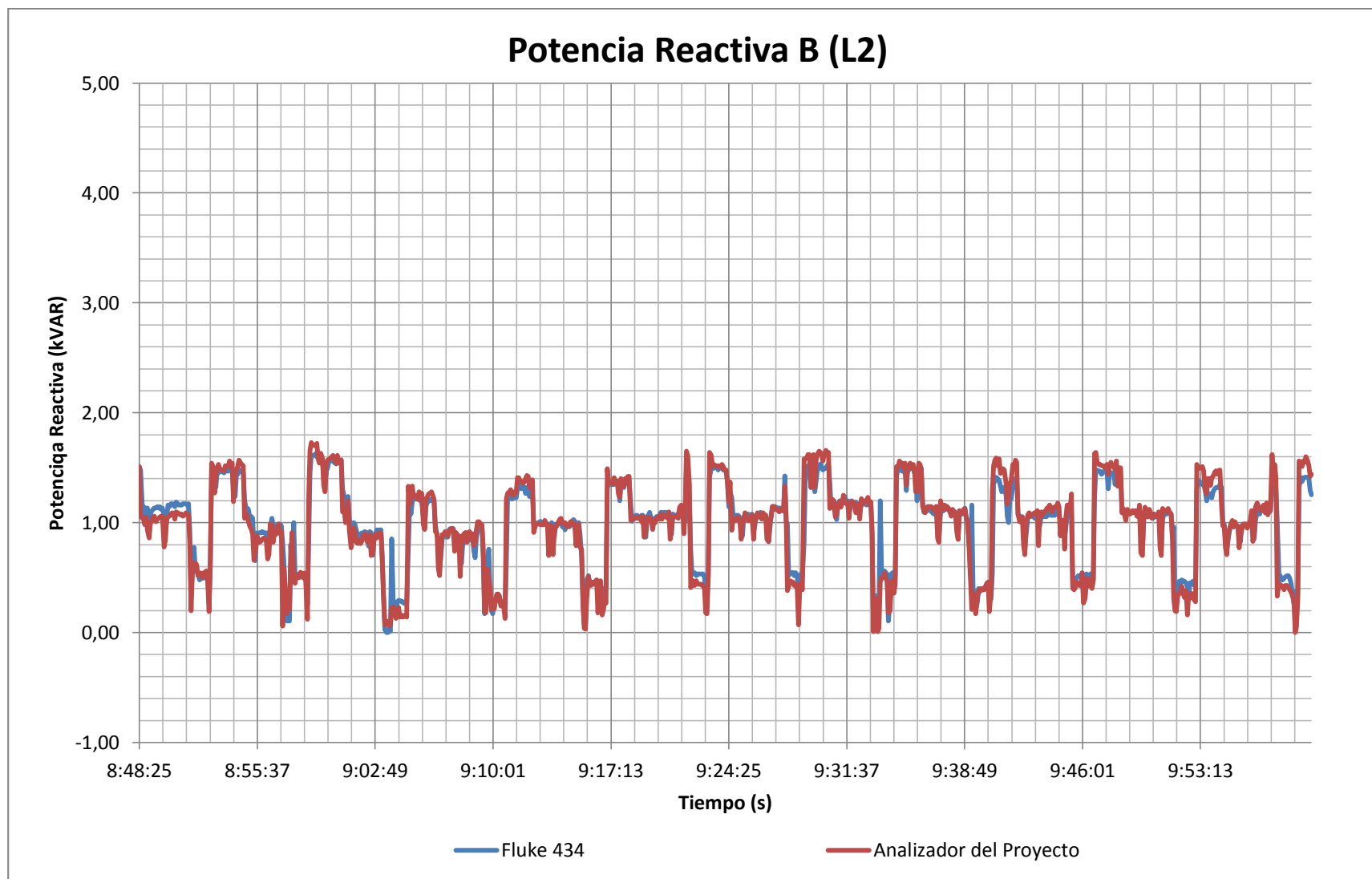


Figura 4.39. Histórico de potencias reactivas B (L2) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

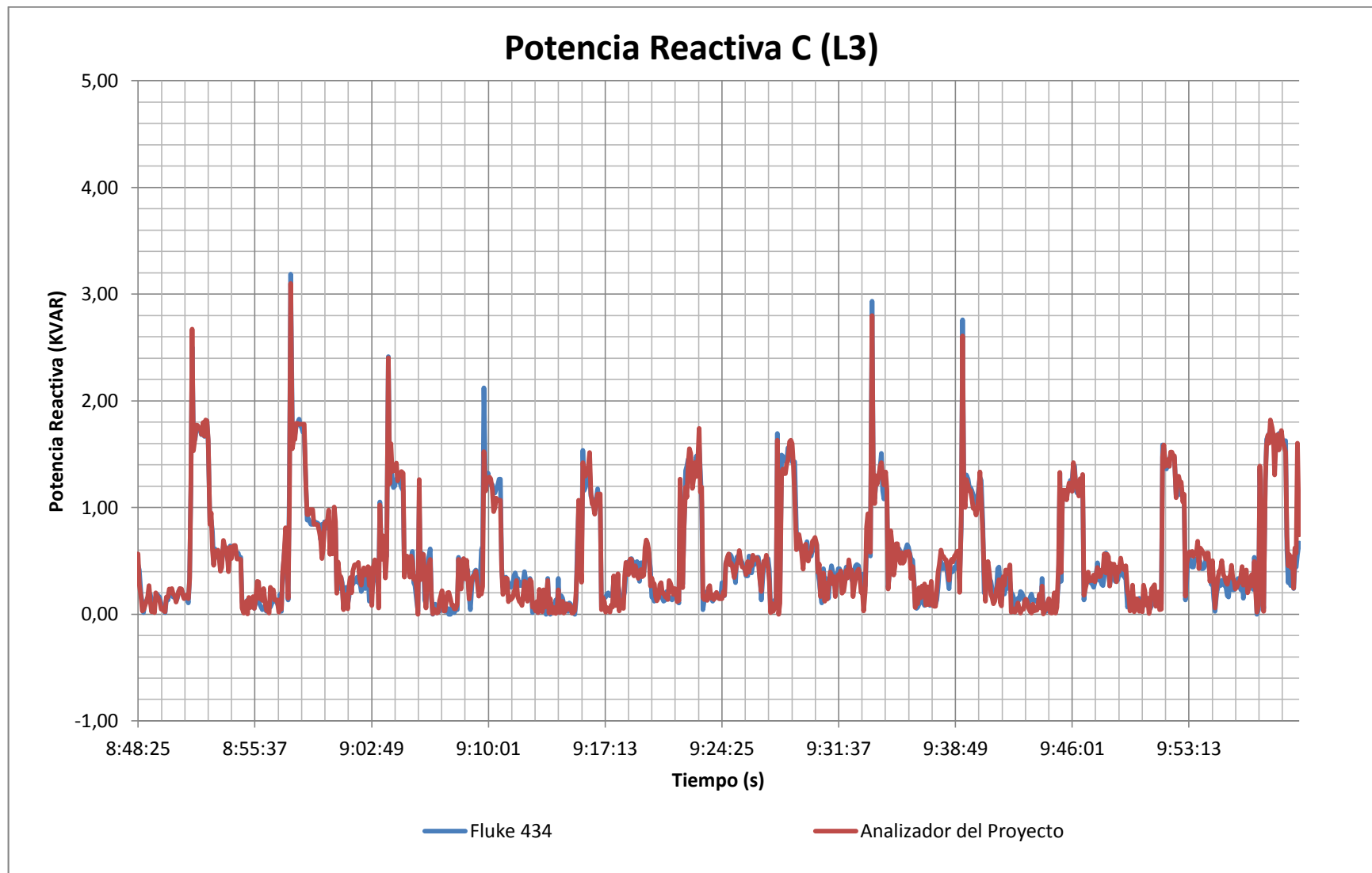


Figura 4.40. Histórico de potencias reactivas C (L3) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.5.2. Segunda prueba experimental.

La Tabla 4.14, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia reactiva de fase. En las Figuras 4.41, 4.42 y 4.43 se muestra el comportamiento durante el segundo periodo de medición comprendida entre las 05:15:21 p.m. y 06:15:16 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.14. Resumen de potencias reactivas obtenidas en el segundo ensayo.

	Potencia Reactiva A (L1)		Potencia Reactiva B (L2)		Potencia Reactiva C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	720	720	720	720	720	720
Valor máximo registrado (kVAR)	1.57	1.61	2.69	2.89	3.56	3.45
Valor mínimo registrado (kVAR)	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00
Valor promedio (kVAR)	0.67	0.55	1.36	1.31	0.48	0.48
Error máximo (%)	25.000		21.429		25.000	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 25%, sin embargo el 28.2% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%. Por lo tanto, el margen de error del 71.8% de las muestras adquiridas no son aceptables.

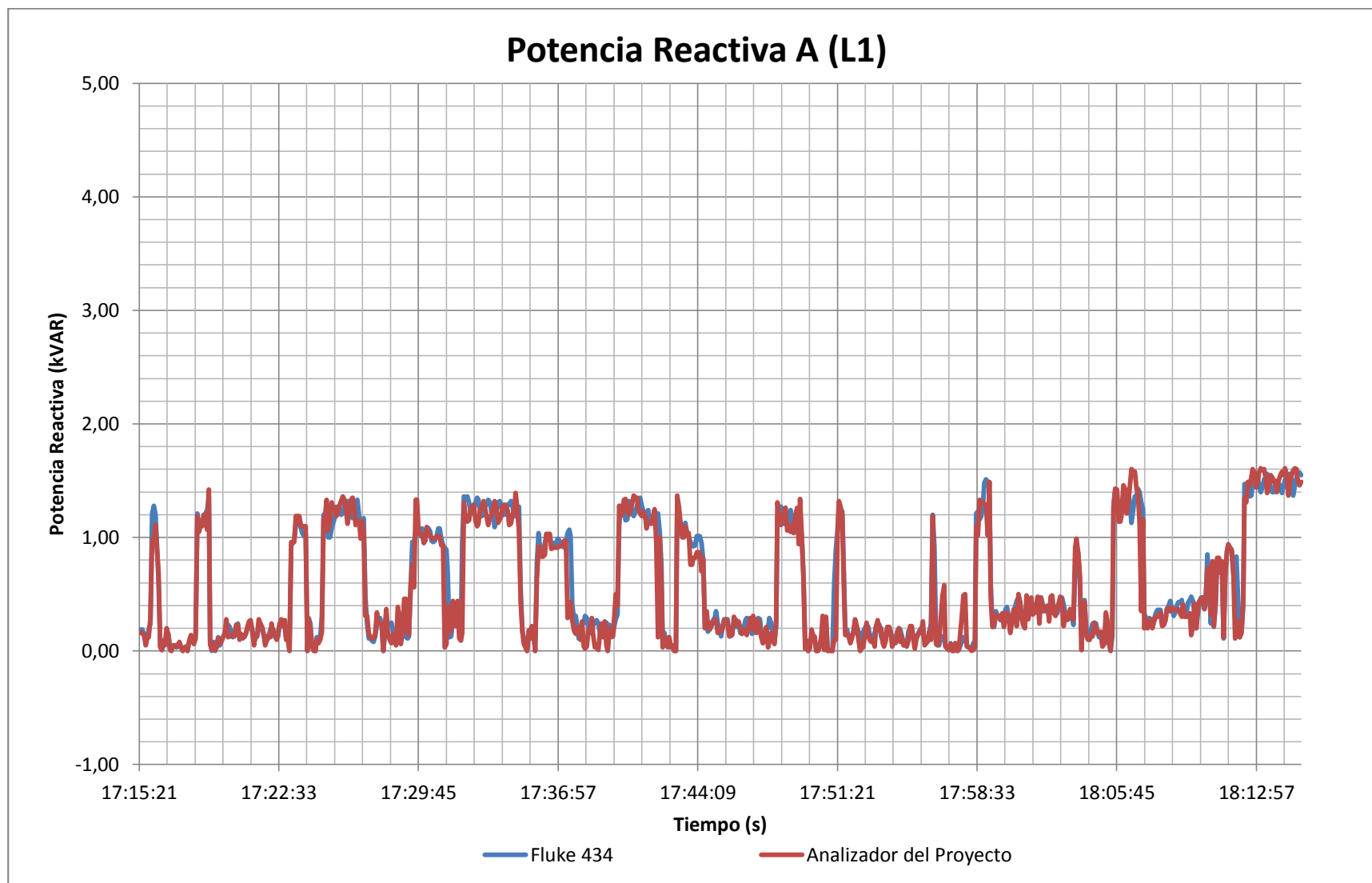


Figura 4.41. Histórico de potencias reactivas A (L1) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

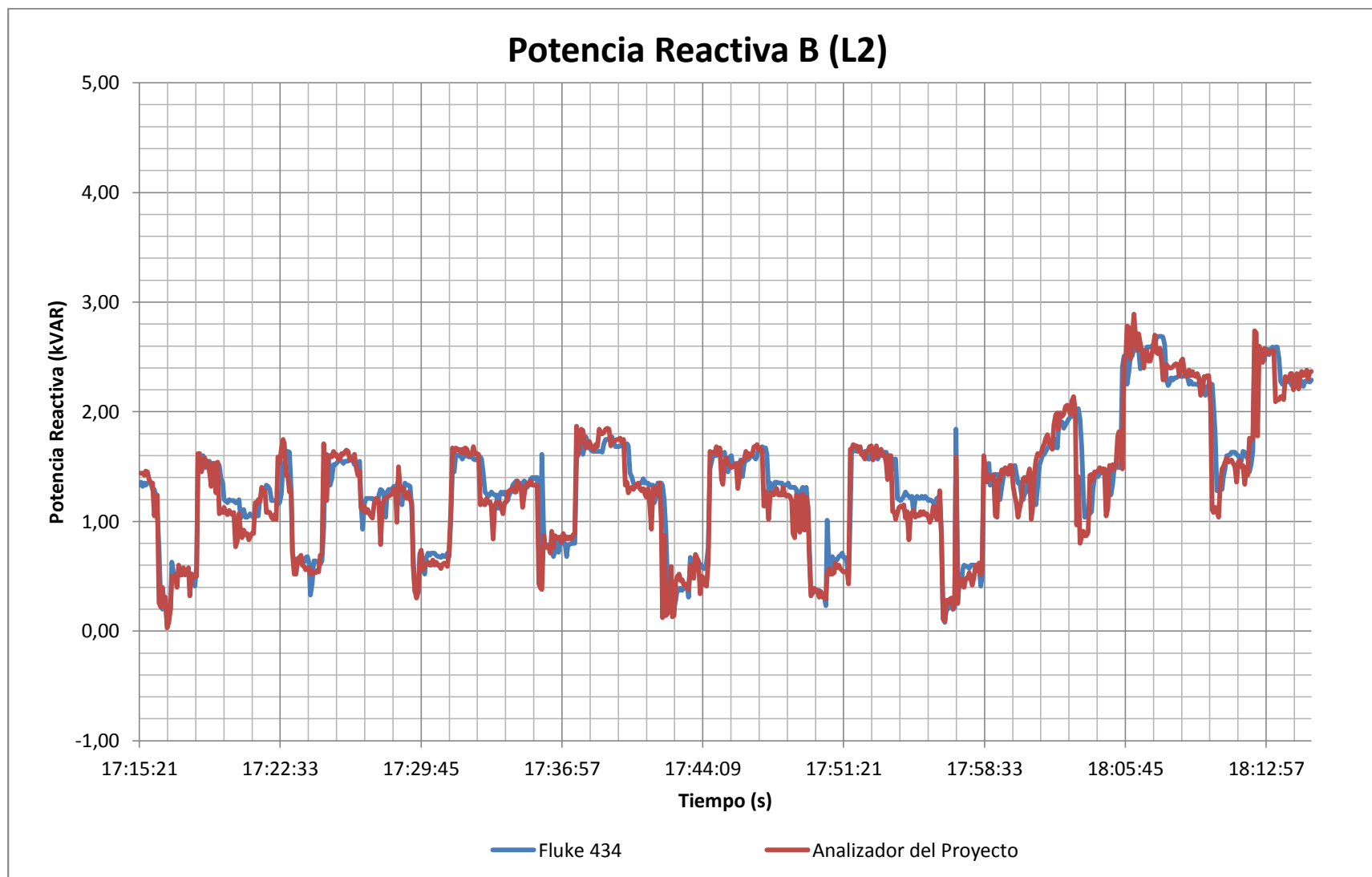


Figura 4.42. Histórico de potencias reactivas B (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

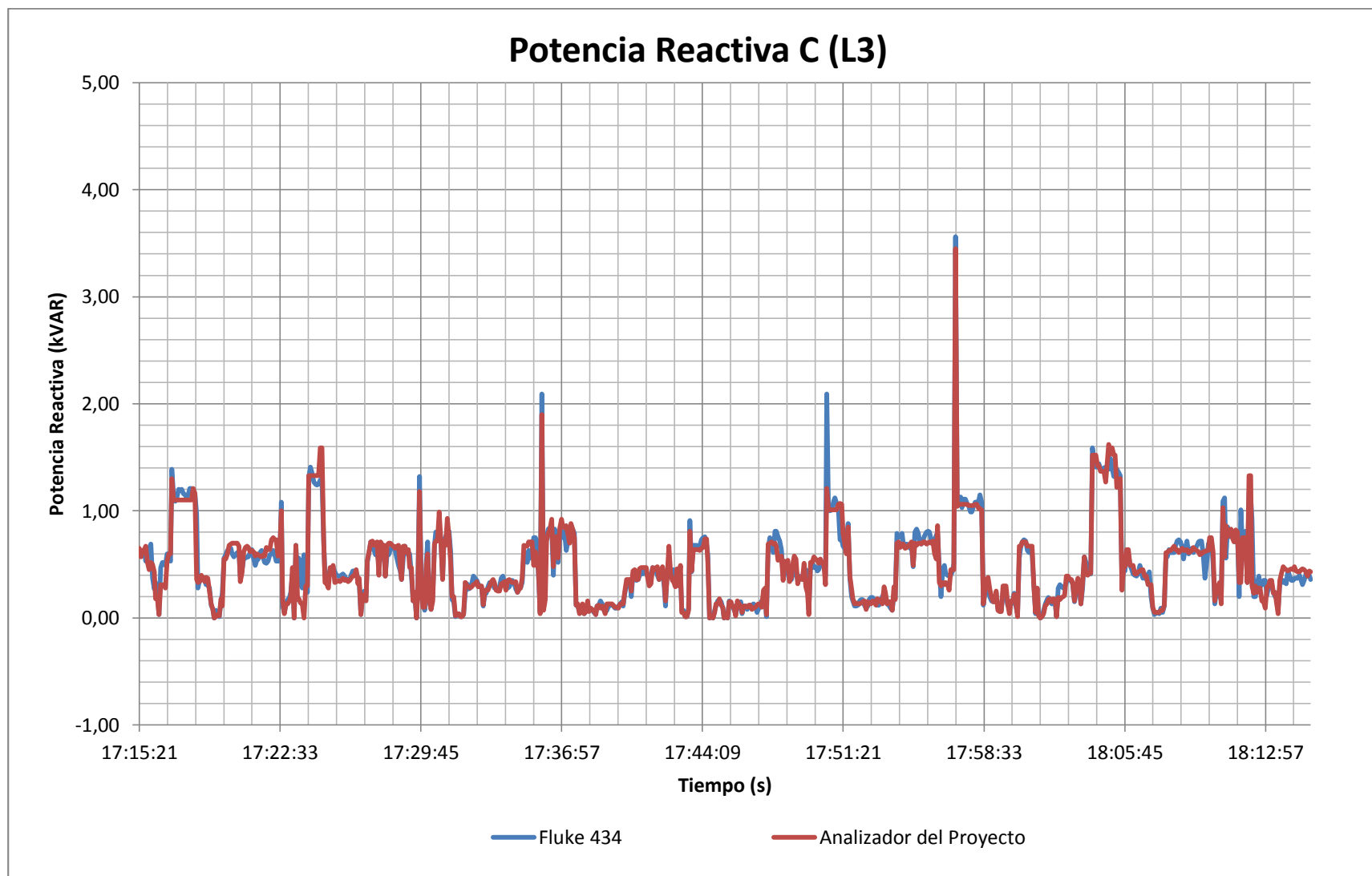


Figura 4.43 . Histórico de potencias reactivas C (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.5.3. Tercera prueba experimental.

La Tabla 4.15, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia reactiva de fase. En las Figuras 4.44, 4.45 y 4.46 se muestra el comportamiento durante el tercer periodo de medición comprendida entre las 07:20:27 p.m. y 09:00:47 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.15. Resumen de potencias reactivas obtenidas en el tercer ensayo.

	Potencia Reactiva A (L1)		Potencia Reactiva B (L2)		Potencia Reactiva C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	1205	1205	1205	1205	1205	1205
Valor máximo registrado (kVAR)	1.61	1.56	2.81	3.09	1.95	1.11
Valor mínimo registrado (kVAR)	0.08	0.095	1.87	1.399	0.00	0.00
Valor promedio (kVAR)	1.22	1.20	2.48	2.49	0.42	0.45
Error máximo (%)	10.526		16.615		21.875	
Error mínimo (%)	6.75E-04		9.47E-04		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 21.875%, sin embargo el 32% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%. Por lo tanto, el margen de error del 68% de las muestras adquiridas no son aceptables.

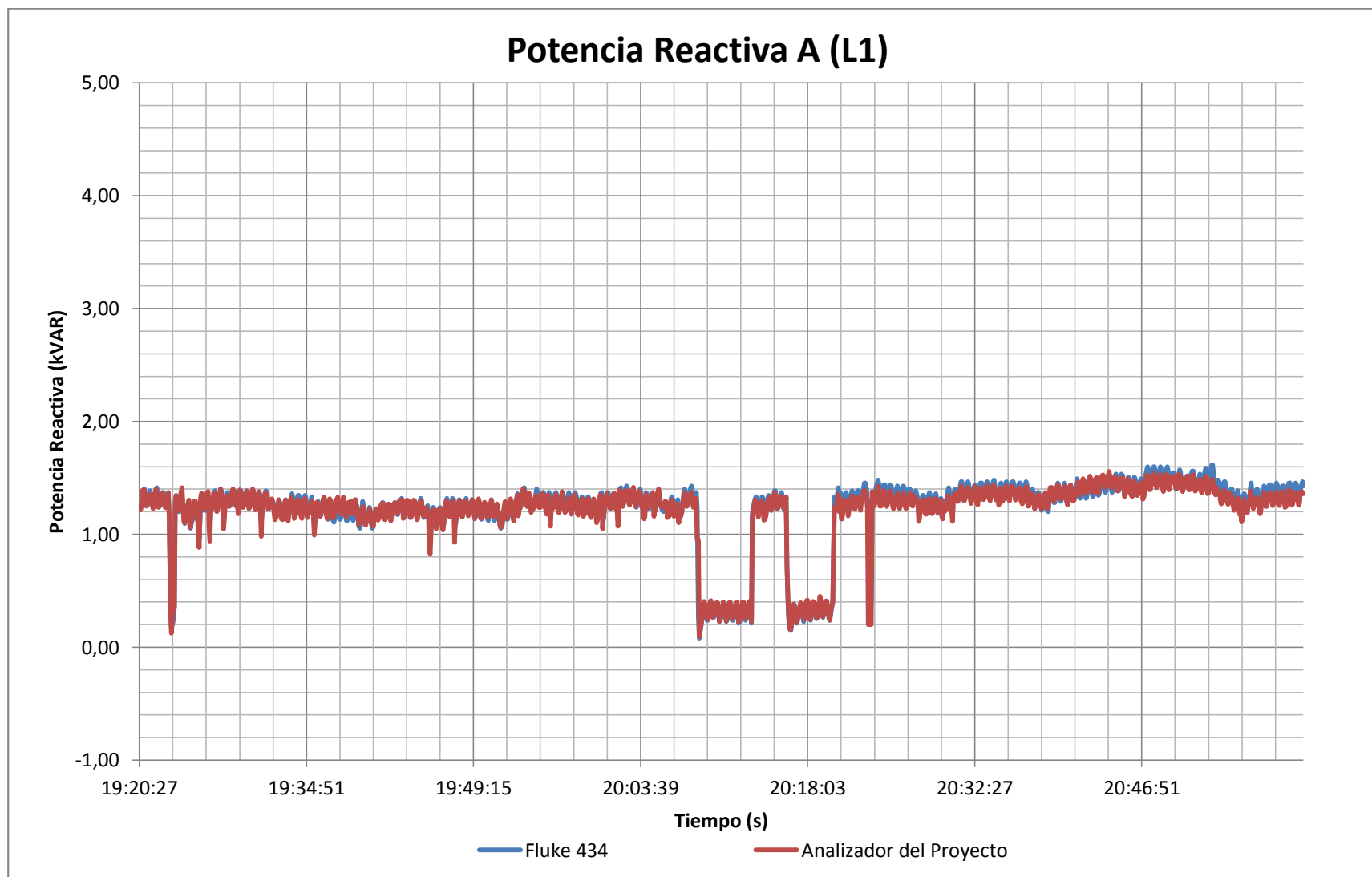


Figura 4.44. Histórico de potencias reactivas A (L1) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

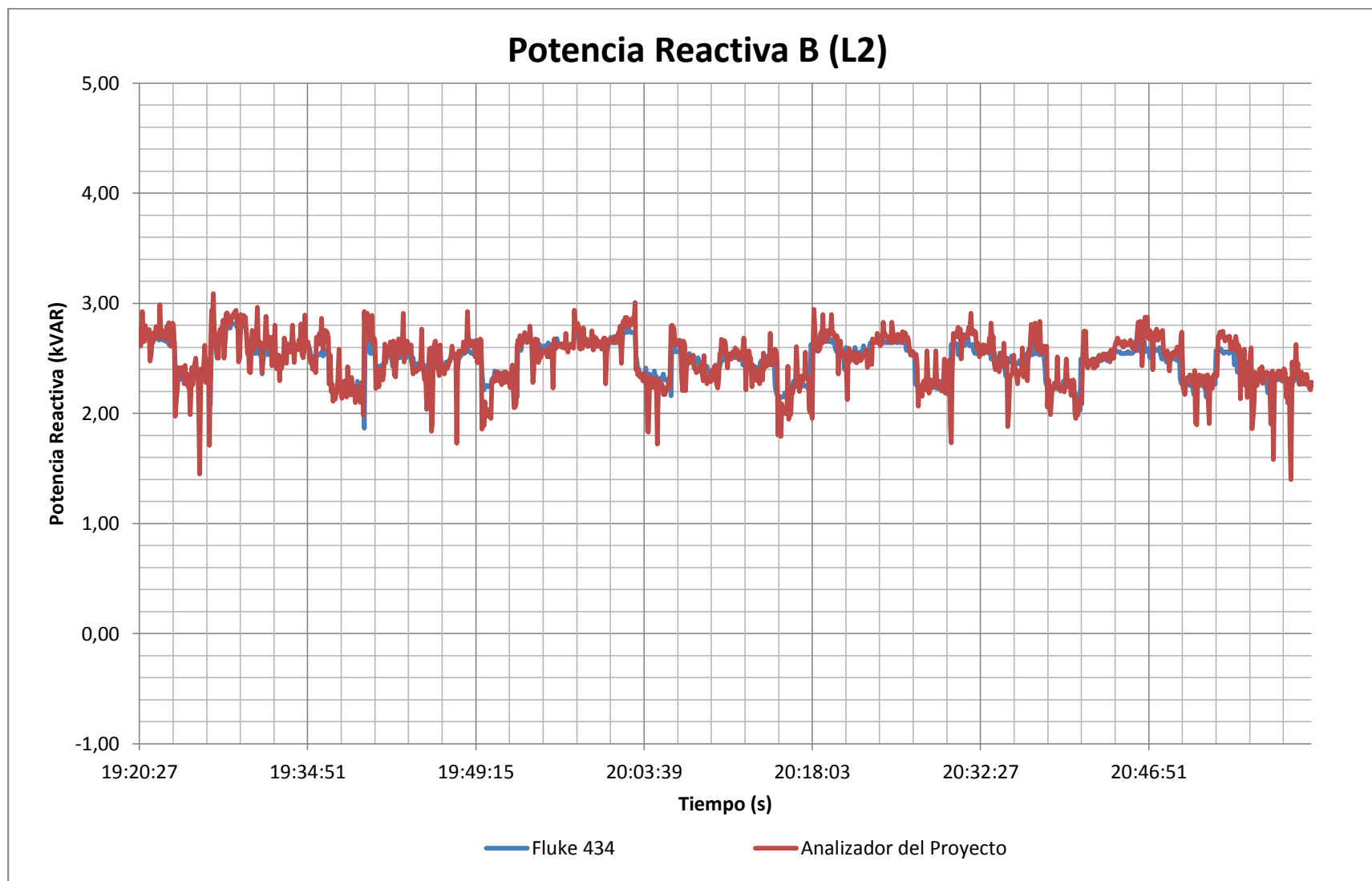


Figura 4.45. Histórico de potencias reactivas B (L2) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

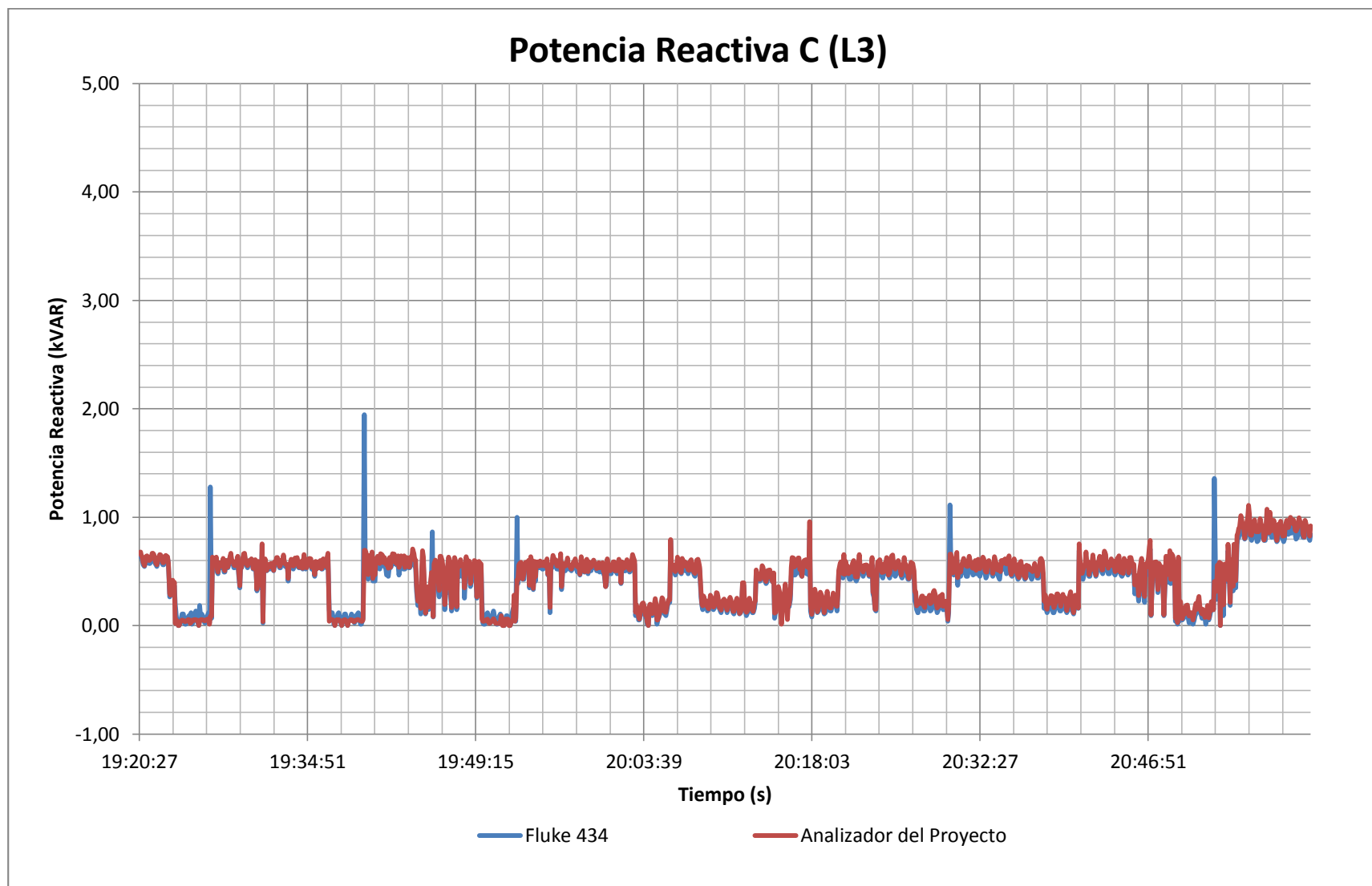


Figura 4.46. Histórico de potencias reactivas C (L3) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.6. Factor de potencia de fase.

Los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro factor de potencia de fase, realizado en el tablero de distribución del Edificio de Unidades Productivas, se detallan en los siguientes apartados. En estos ensayos se recalca que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes distintos.

4.2.6.1. Primera prueba experimental.

La Tabla 4.16, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro factor de potencia de fase. En las Figuras 4.47, 4.48 y 4.49 se muestra el comportamiento durante el primer periodo de medición comprendida entre las 08:48:25 a.m. y 10:00:00 a.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.16. Resumen de factores de potencia obtenidas en el primer ensayo.

	Factor de Potencia A (L1)		Factor de Potencia B (L2)		Factor de Potencia C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	860	860	860	860	860	860
Valor máximo registrado (PF)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Valor mínimo registrado (PF)	0.980	0.976	0.990	0.984	0.980	0.981
Valor promedio (PF)	0.991	0.993	0.995	0.992	0.992	0.992
Error máximo (%)	2.041		1.420		2.041	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 2.041%.

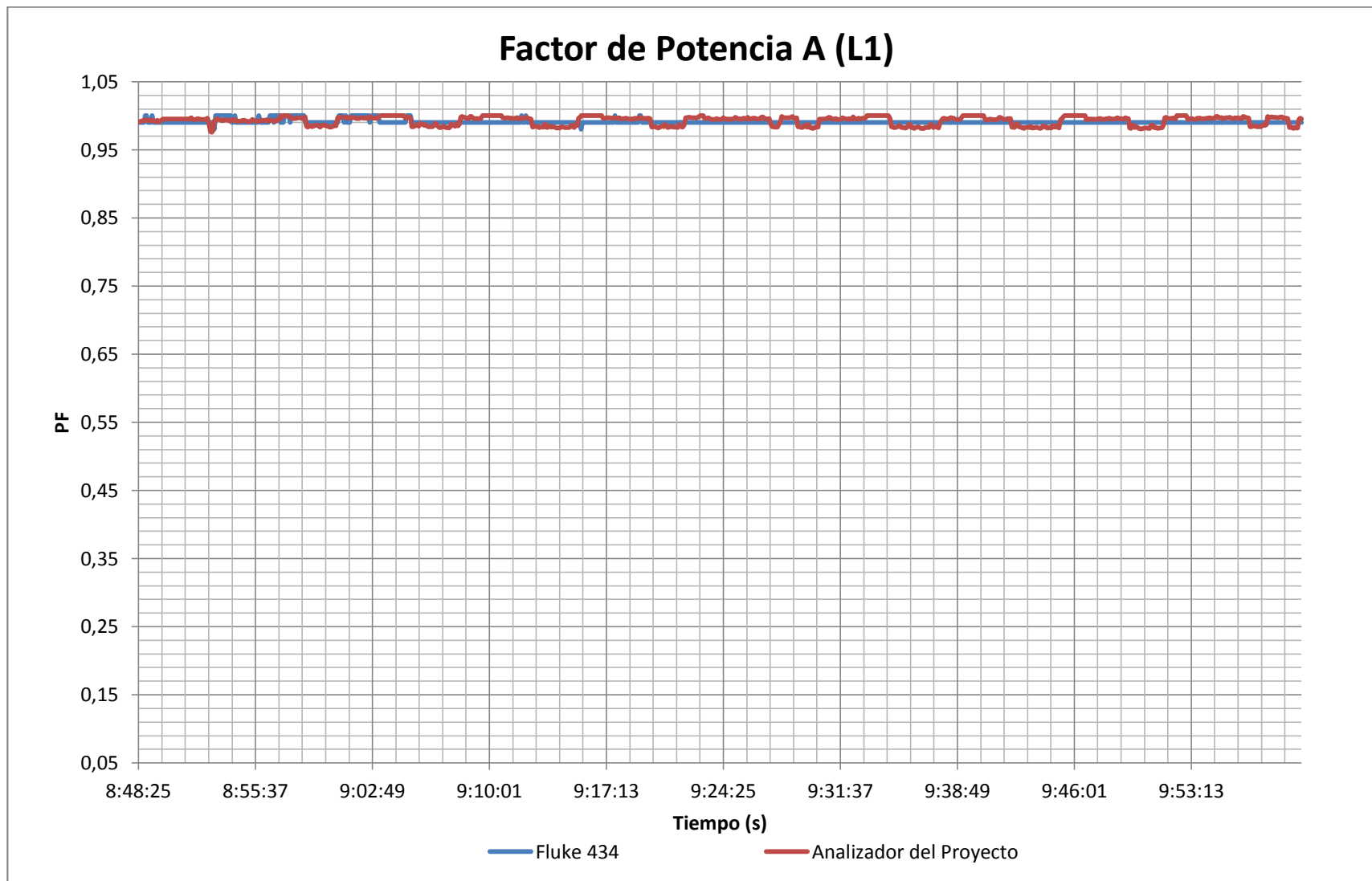


Figura 4.47. Histórico de factores de potencia A (L1) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

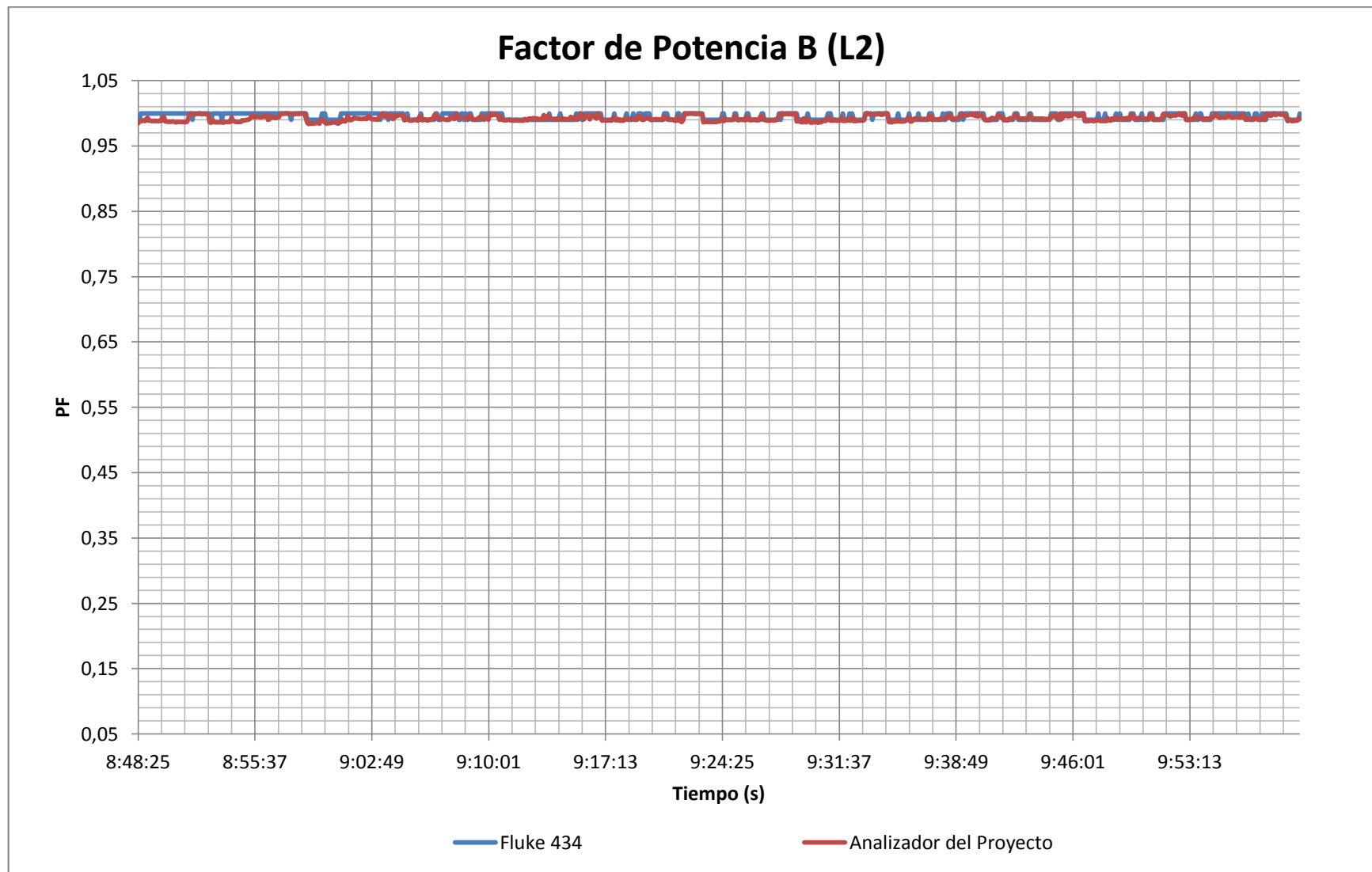


Figura 4.48. Histórico de factores de potencia B (L2) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

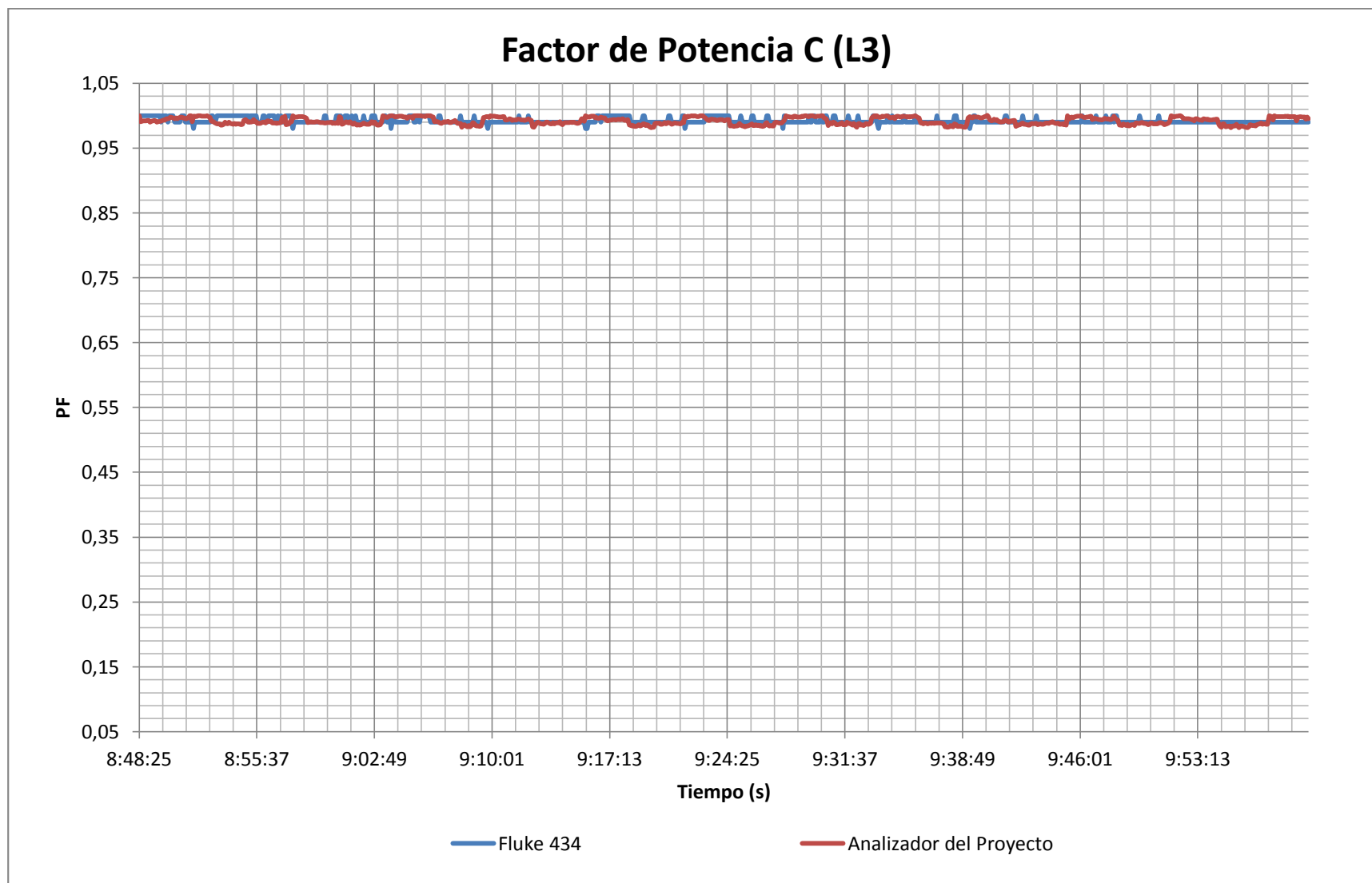


Figura 4.49. Histórico de factores de potencia C (L3) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.6.2. Segunda prueba experimental.

La Tabla 4.17, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro factor de potencia de fase. En las Figuras 4.50, 4.51 y 4.52 se muestra el comportamiento durante el segundo periodo de medición comprendida entre las 05:15:21 p.m. y 06:15:16 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.17. Resumen de factores de potencia obtenidas en el segundo ensayo.

	Factor de Potencia A (L1)		Factor de Potencia B (L2)		Factor de Potencia C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	720	720	720	720	720	720
Valor máximo registrado (PF)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Valor mínimo registrado (PF)	0.980	0.978	0.990	0.984	0.970	0.978
Valor promedio (PF)	0.992	0.994	0.994	0.991	0.995	0.992
Error máximo (%)	2.000		1.240		3.093	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 3.093%.

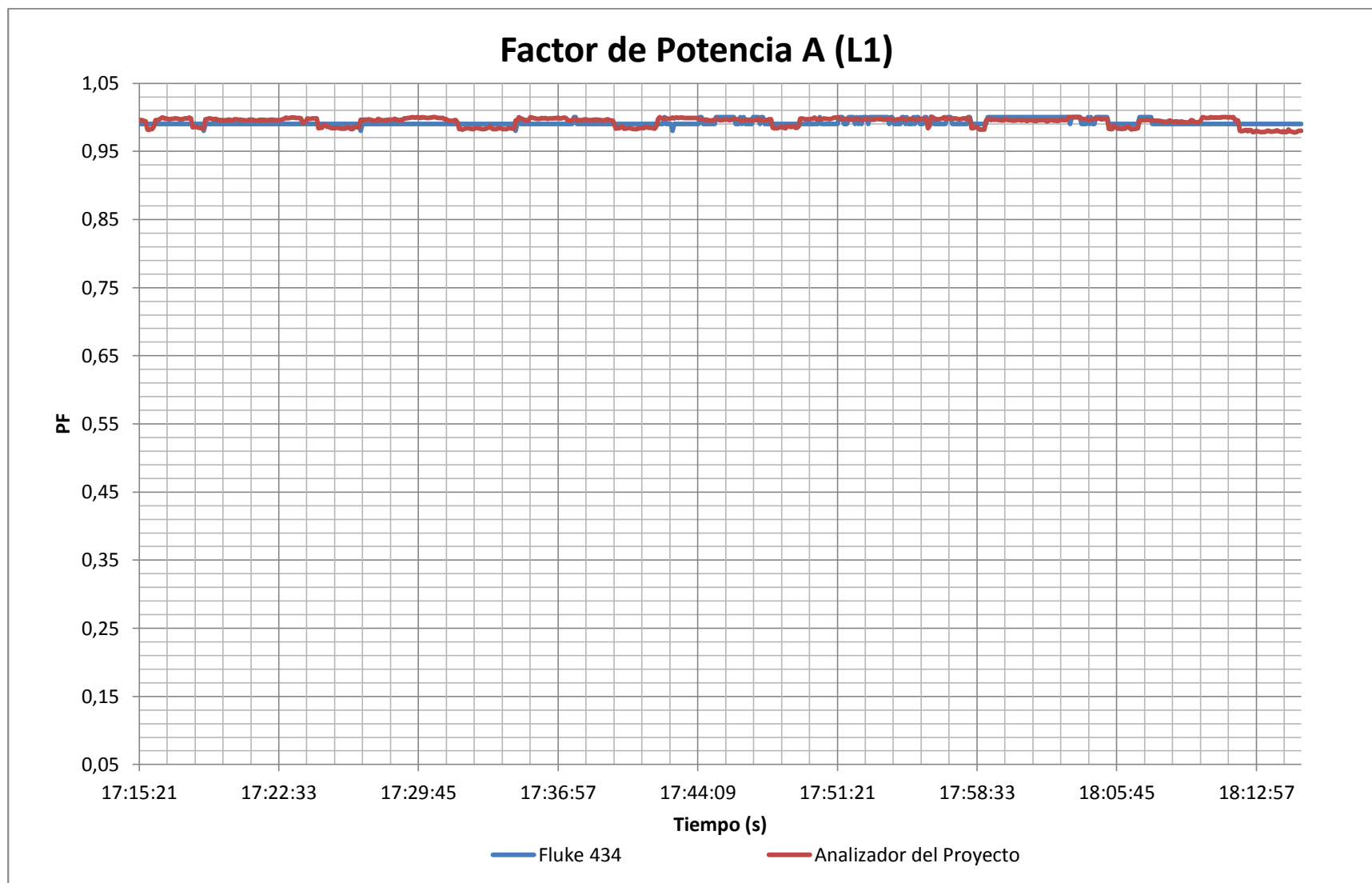


Figura 4.50. Histórico de factores de potencia A (L1) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

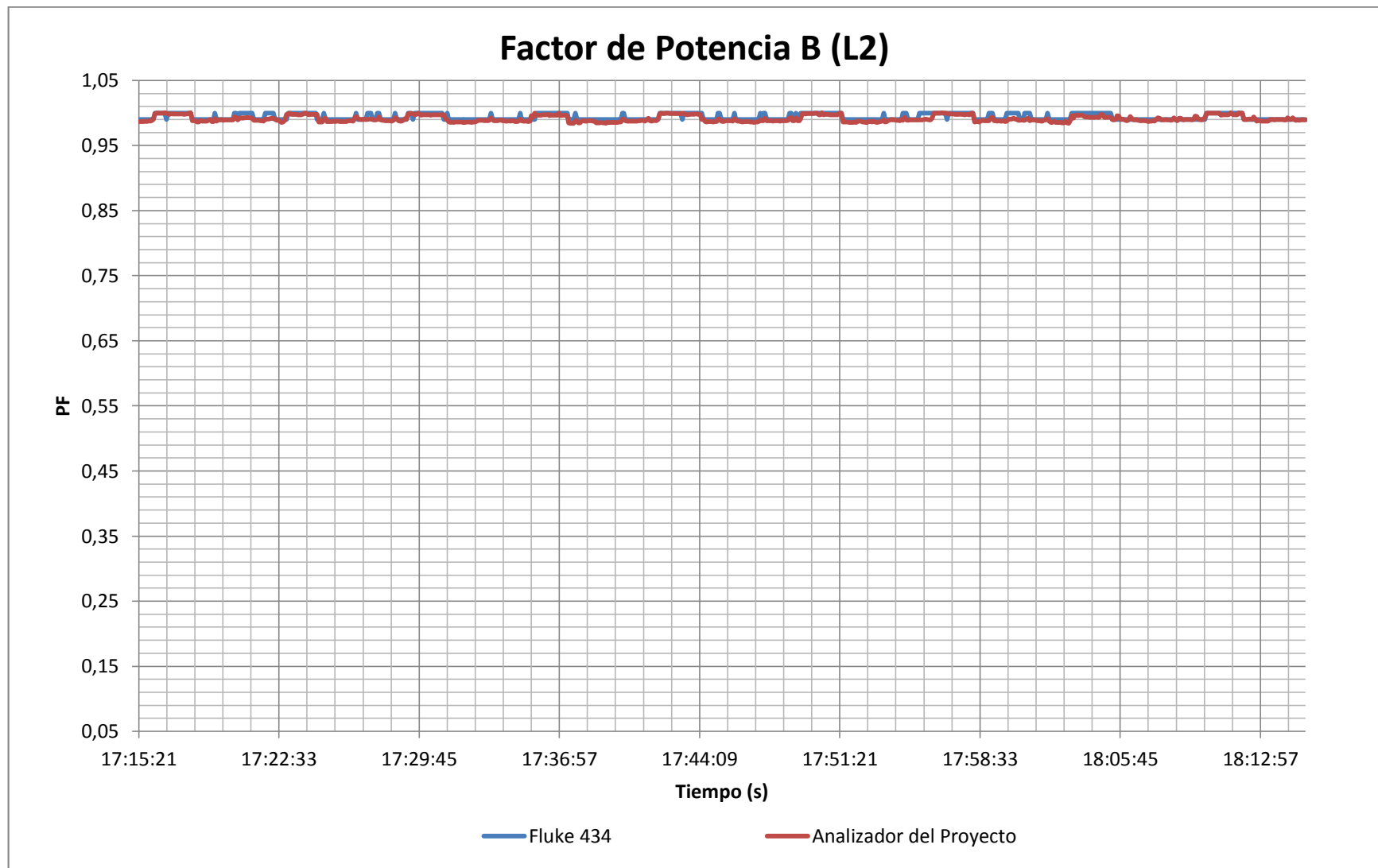


Figura 4.51. Histórico de factores de potencia B (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

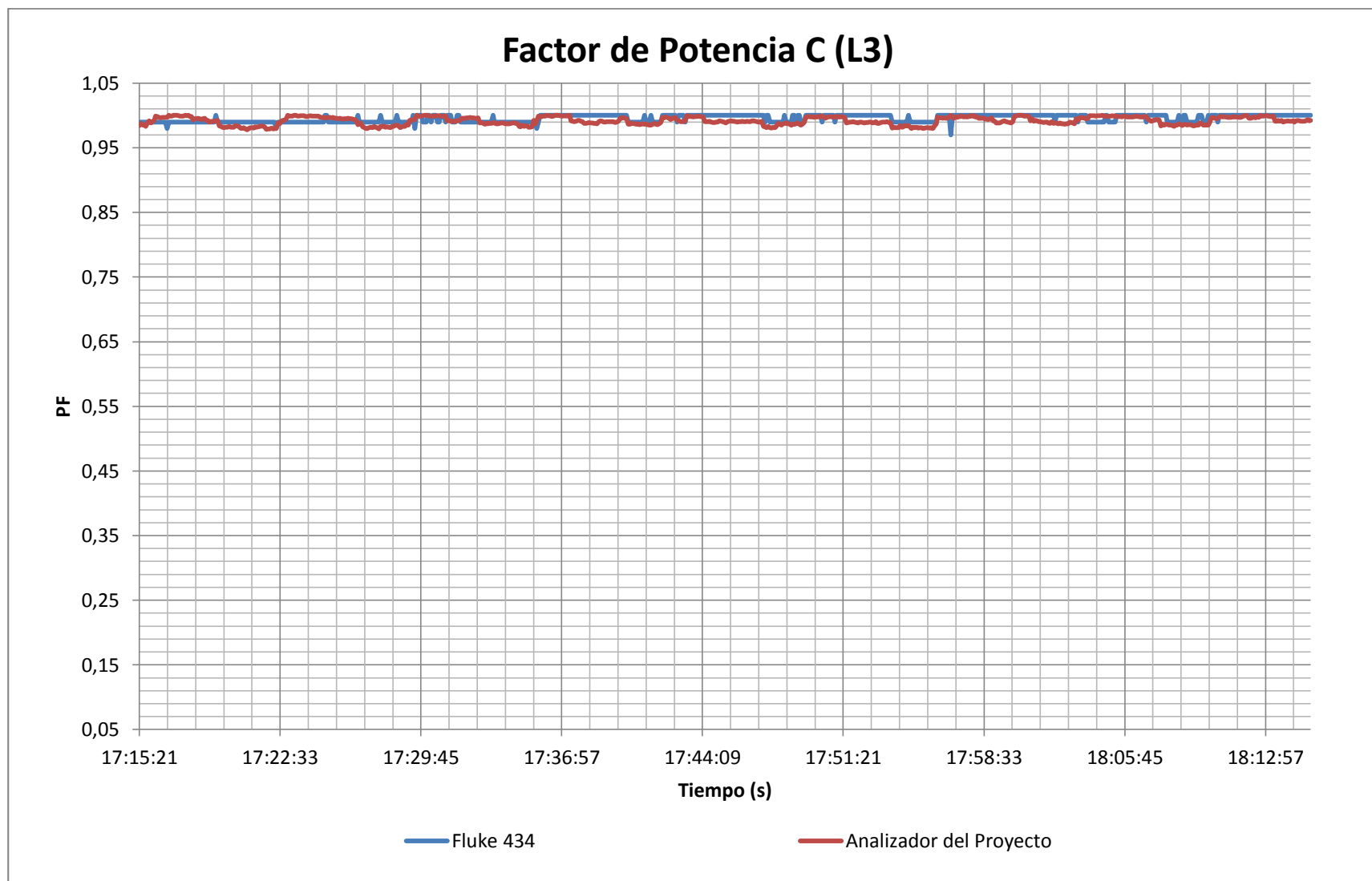


Figura 4.52. Histórico de factores de potencia C (L3) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.6.3. Tercera prueba experimental.

La Tabla 4.18, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro factor de potencia de fase. En las Figuras 4.53, 4.54 y 4.55 se muestra el comportamiento durante el tercer periodo de medición comprendida entre las 07:20:27 p.m. y 09:00:47 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.18. Resumen de factores de potencia obtenidas en el tercer ensayo.

	Factor de Potencia A (L1)		Factor de Potencia B (L2)		Factor de Potencia C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	1205	1205	1205	1205	1205	1205
Valor máximo registrado (PF)	1.000	1.000	0.990	0.998	1.000	1.000
Valor mínimo registrado (PF)	0.990	0.982	0.990	0.986	0.960	0.983
Valor promedio (PF)	0.990	0.992	0.990	0.991	0.997	0.995
Error máximo (%)	1.010		0.788		3.760	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 3.76%.

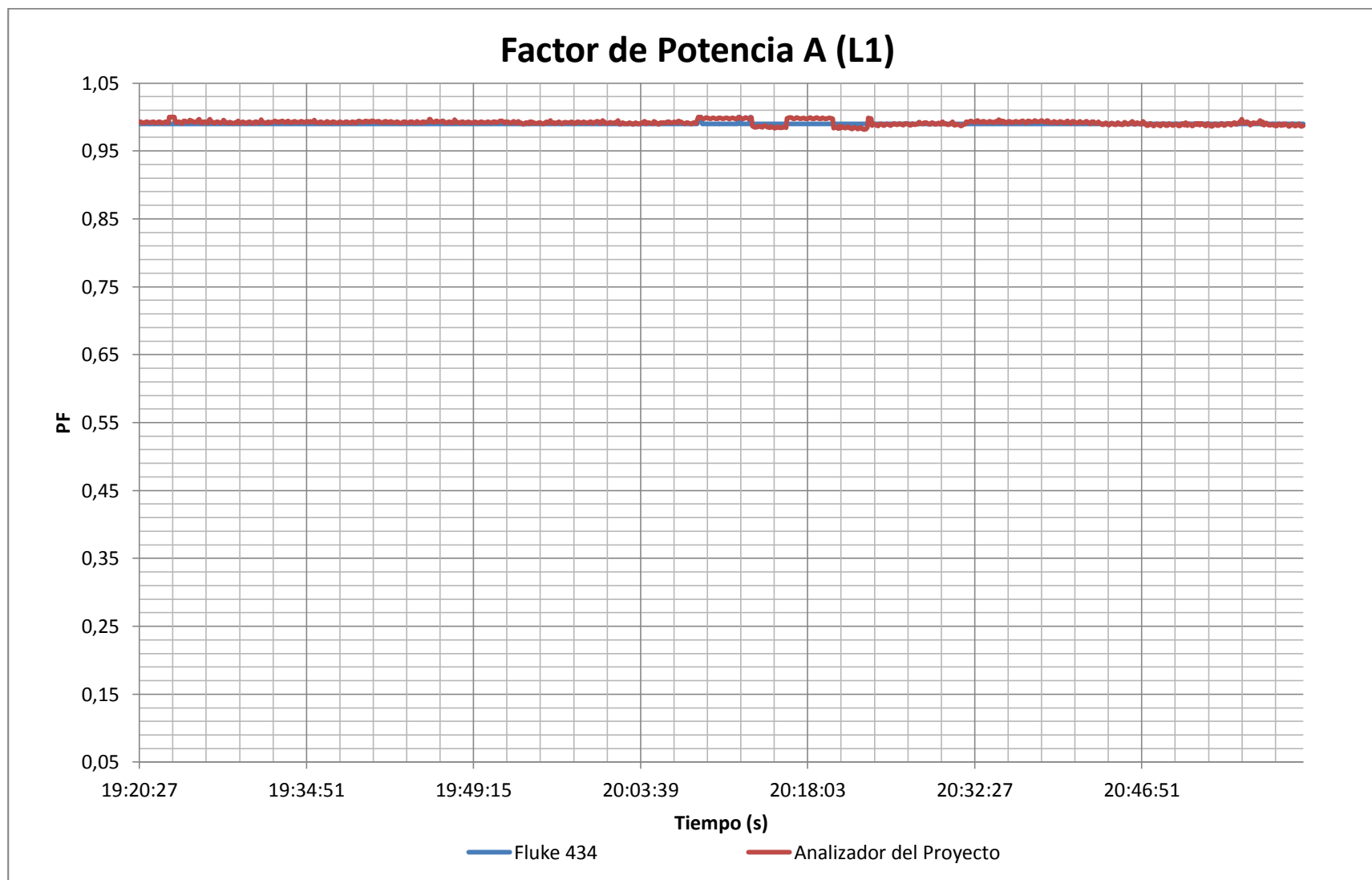


Figura 4.53. Histórico de factores de potencia A (L1) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

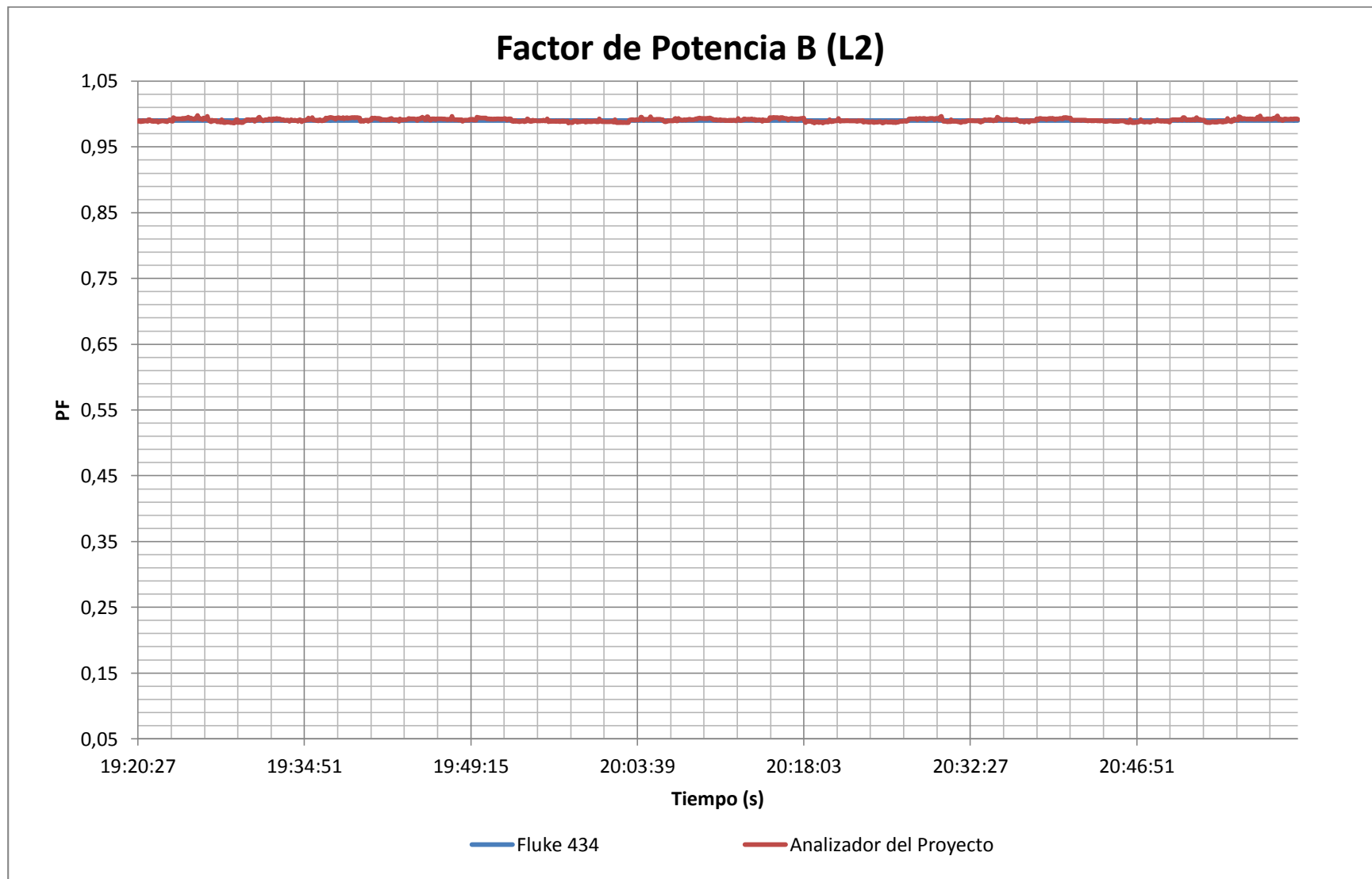


Figura 4.54. Histórico de factores de potencia B (L2) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

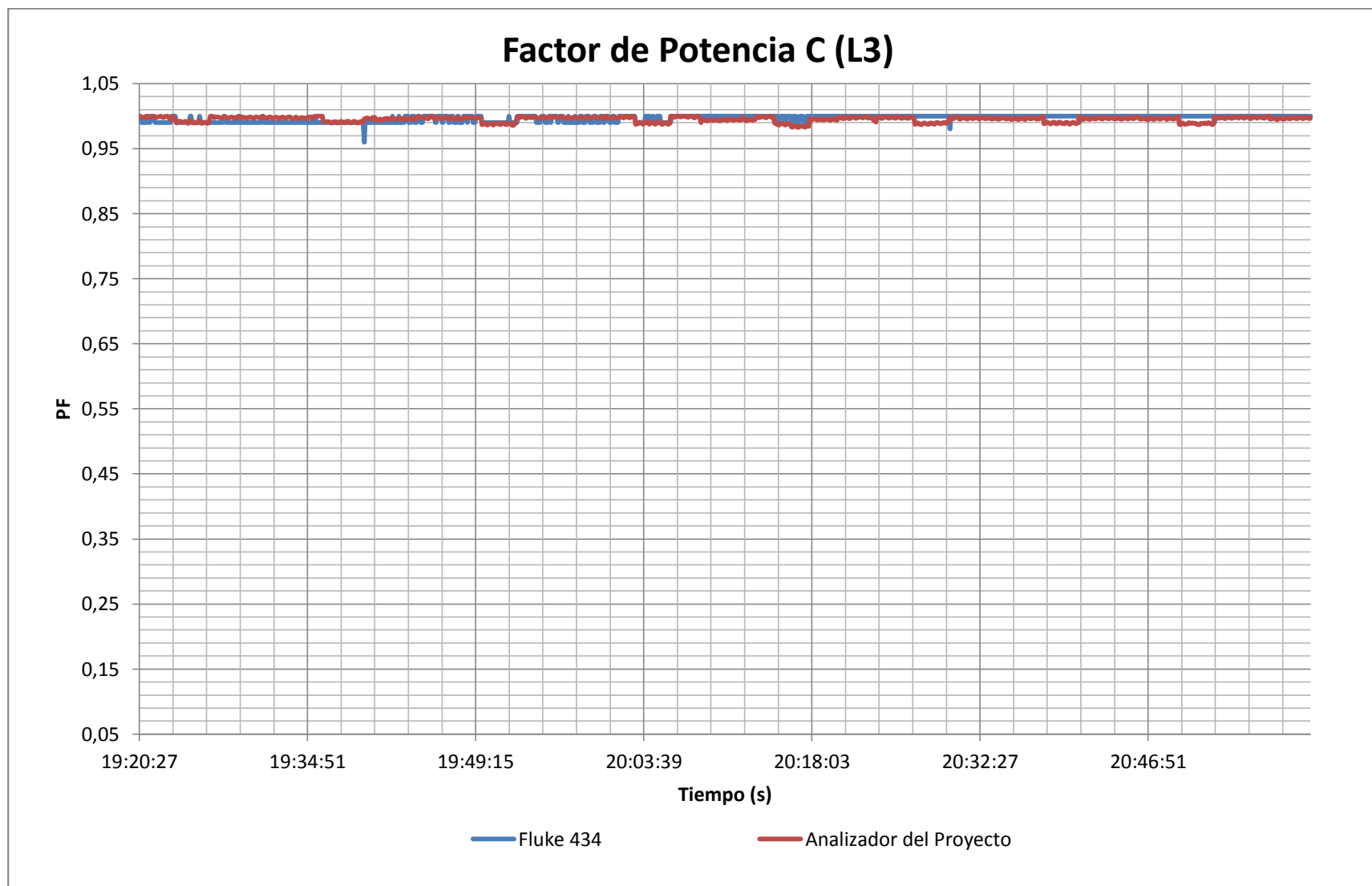


Figura 4.55. Histórico de factores de potencia C (L3) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.7. Distorsión armónica total de voltaje (THDv) de fase.

Los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de voltaje de fase, realizado en el tablero de distribución del Edificio de Unidades Productivas, se detallan en los siguientes apartados. En estos ensayos se recalca que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes distintos.

4.2.7.1. Primera prueba experimental.

La Tabla 4.19, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de voltaje de fase. En las Figuras 4.56, 4.57 y 4.58 se muestra el comportamiento durante el primer periodo de medición comprendida entre las para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.19. Resumen de variable de distorsión armónica total de voltaje (THDv's) obtenidas en el primer ensayo.

	THDv A (L1)		THDv B (L2)		THDv C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	550	550	550	550	550	550
Valor máximo registrado (%)	1.535	1.398	1.624	1.471	1.670	1.574
Valor mínimo registrado (%)	1.032	0.954	1.061	1.011	1.329	1.372
Valor promedio (%)	1.220	1.201	1.315	1.300	1.493	1.478
Error máximo (%)	16.725		18.405		9.622	
Error mínimo (%)	0.010		0.005		0.013	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 18.405%, sin embargo el 79% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%. Por lo tanto, el margen de error del 21% de las muestras adquiridas no son aceptables.

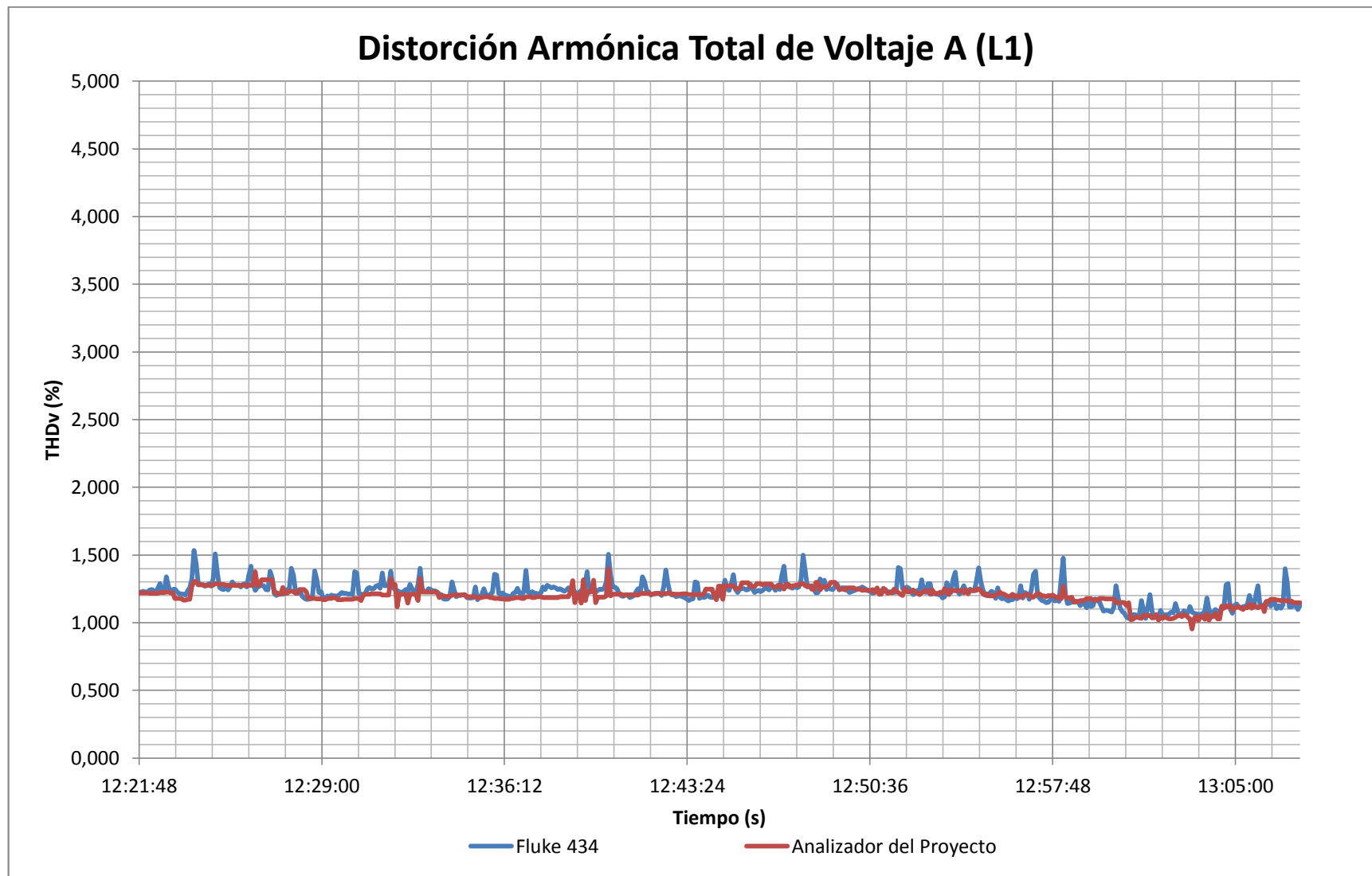


Figura 4.56. Histórico de distorsión armónica total de voltajes A (L1) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

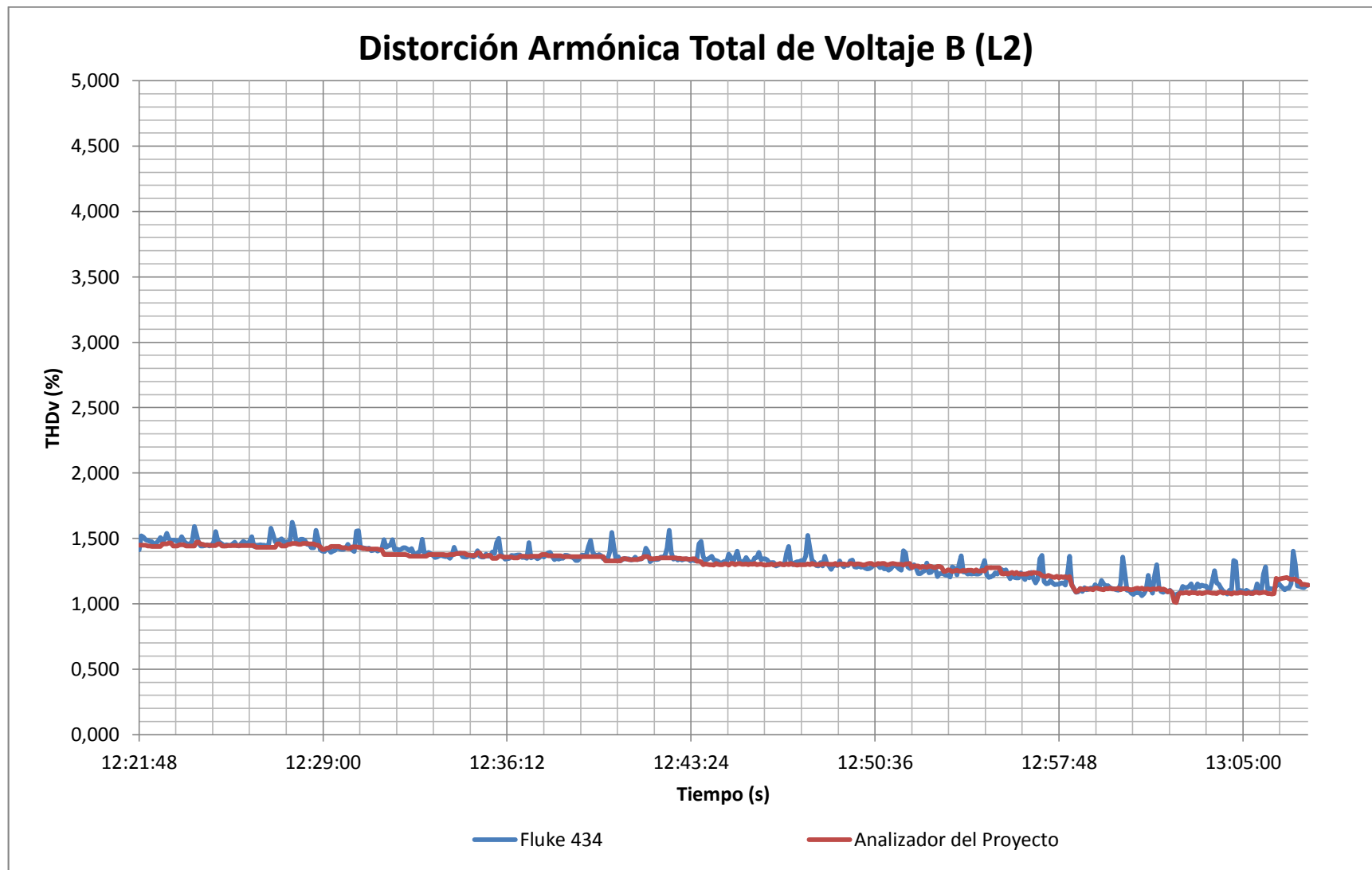


Figura 4.57. Histórico de distorsión armónica total de voltajes B (L2) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

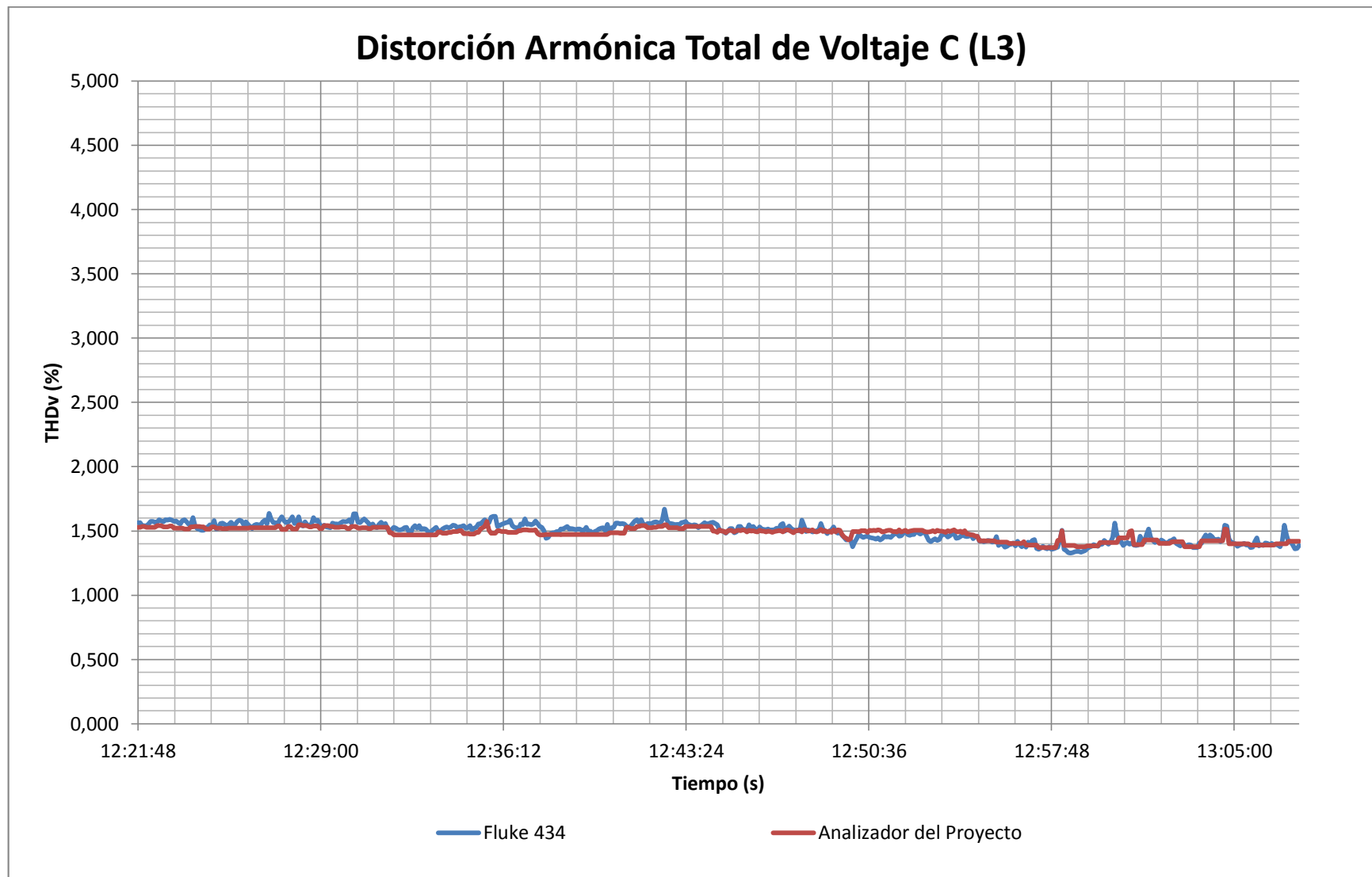


Figura 4.58. Histórico de distorsión armónica total de voltajes C (L3) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.7.2. Segunda prueba experimental.

La Tabla 4.20, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de voltaje de fase. En las Figuras 4.59, 3.60 y 3.61 se muestra el comportamiento durante el segundo periodo de medición comprendida entre las 01:43:11 p.m. y 02:13:11 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.20. Resumen de variable de distorsión armónica total de voltaje (THDv's) obtenidas en el segundo ensayo.

	THDv A (L1)		THDv B (L2)		THDv C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	361	351	361	361	361	361
Valor máximo registrado (%)	1.430	1.162	1.670	1.354	1.600	1.350
Valor mínimo registrado (%)	0.910	0.930	1.070	1.054	1.130	1.130
Valor promedio (%)	1.014	1.008	1.166	1.144	1.253	1.230
Error máximo (%)	25.874		29.817		21.019	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.000	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 29.817%, sin embargo el 86.7% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%. Por lo tanto, el margen de error del 13.3% de las muestras adquiridas no son aceptables.

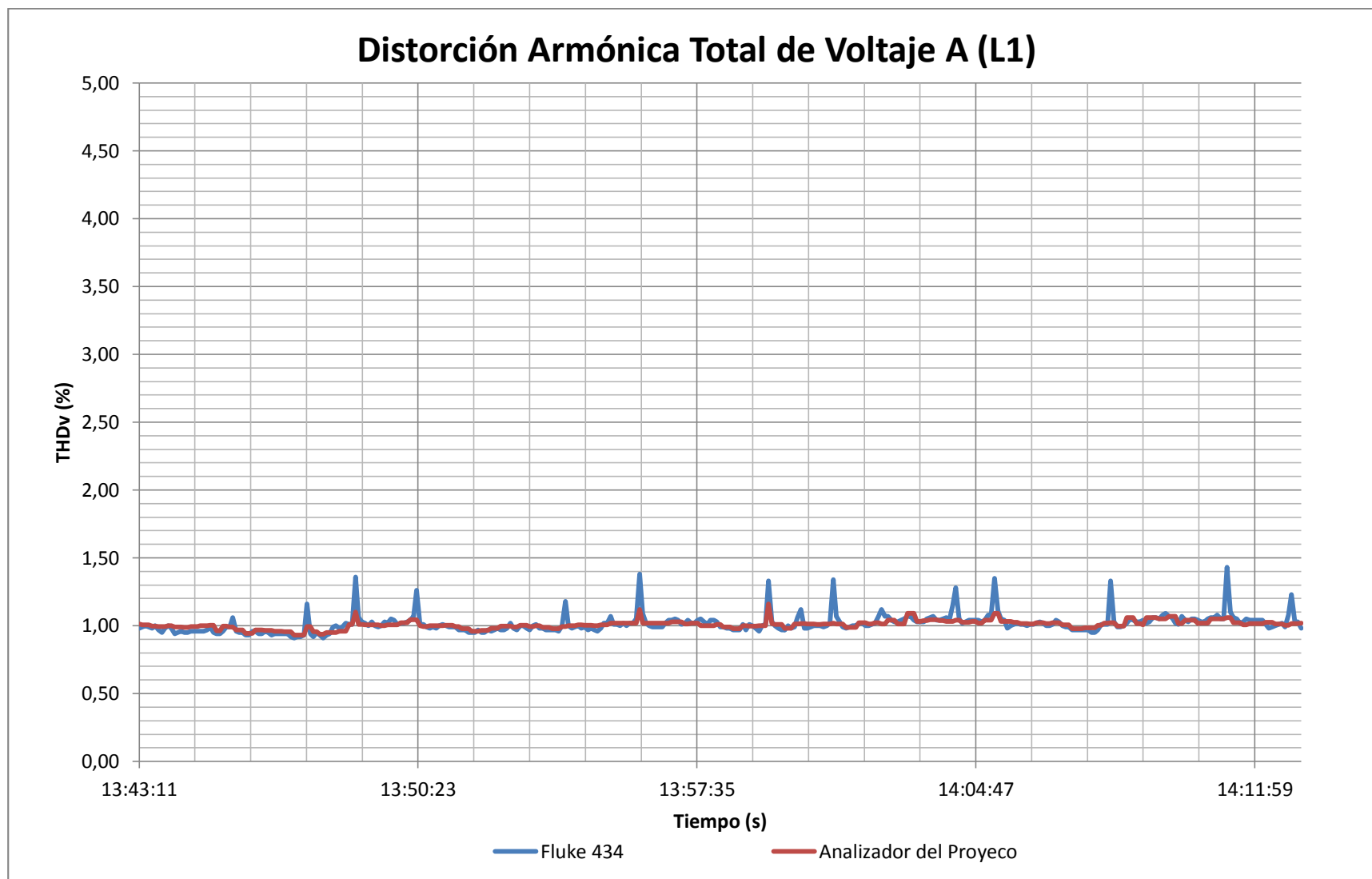


Figura 4.59. Histórico de distorsión armónica total de voltajes A (L1) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

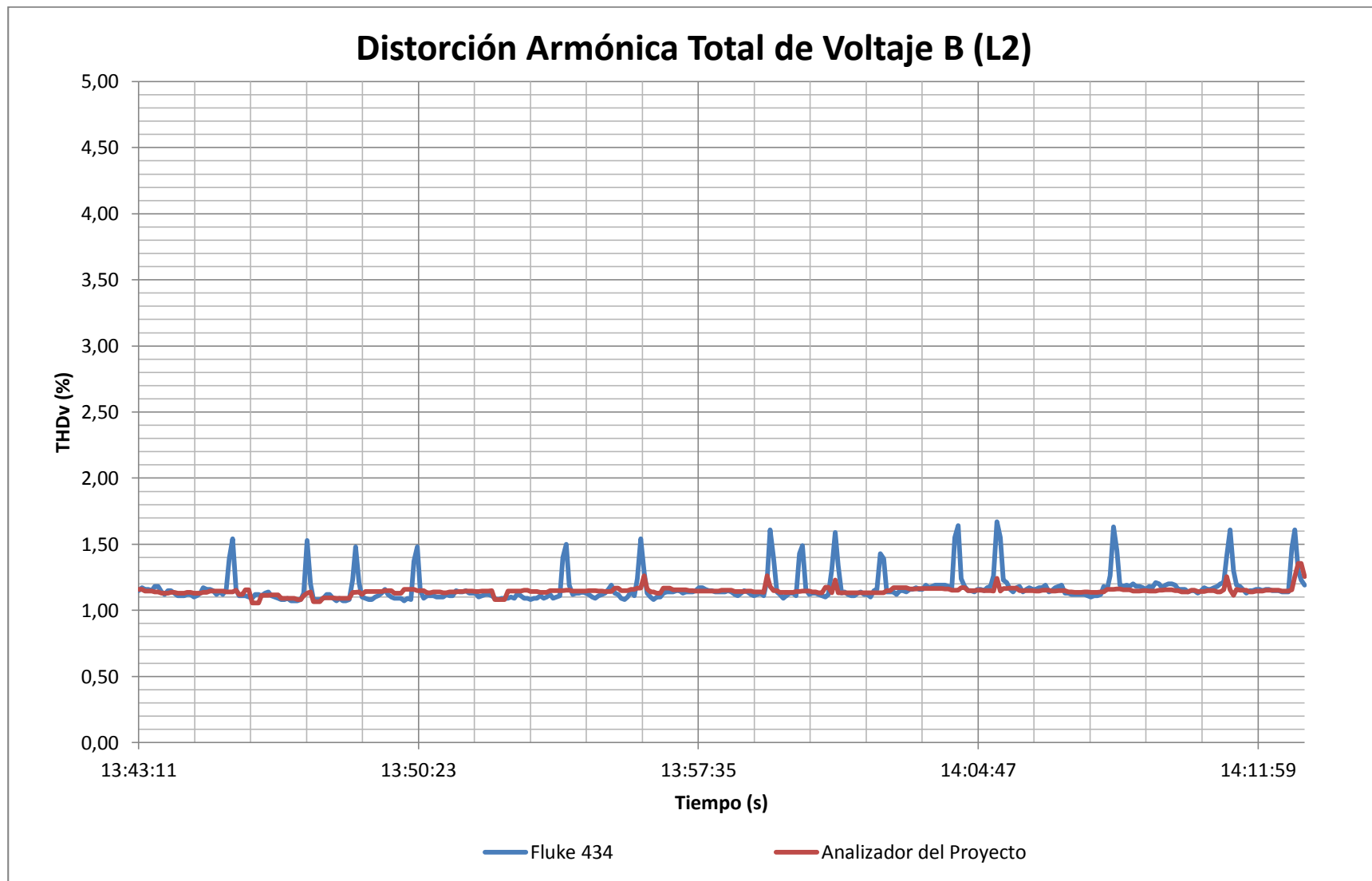


Figura 4.60. Histórico de distorsión armónica total de voltajes B (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

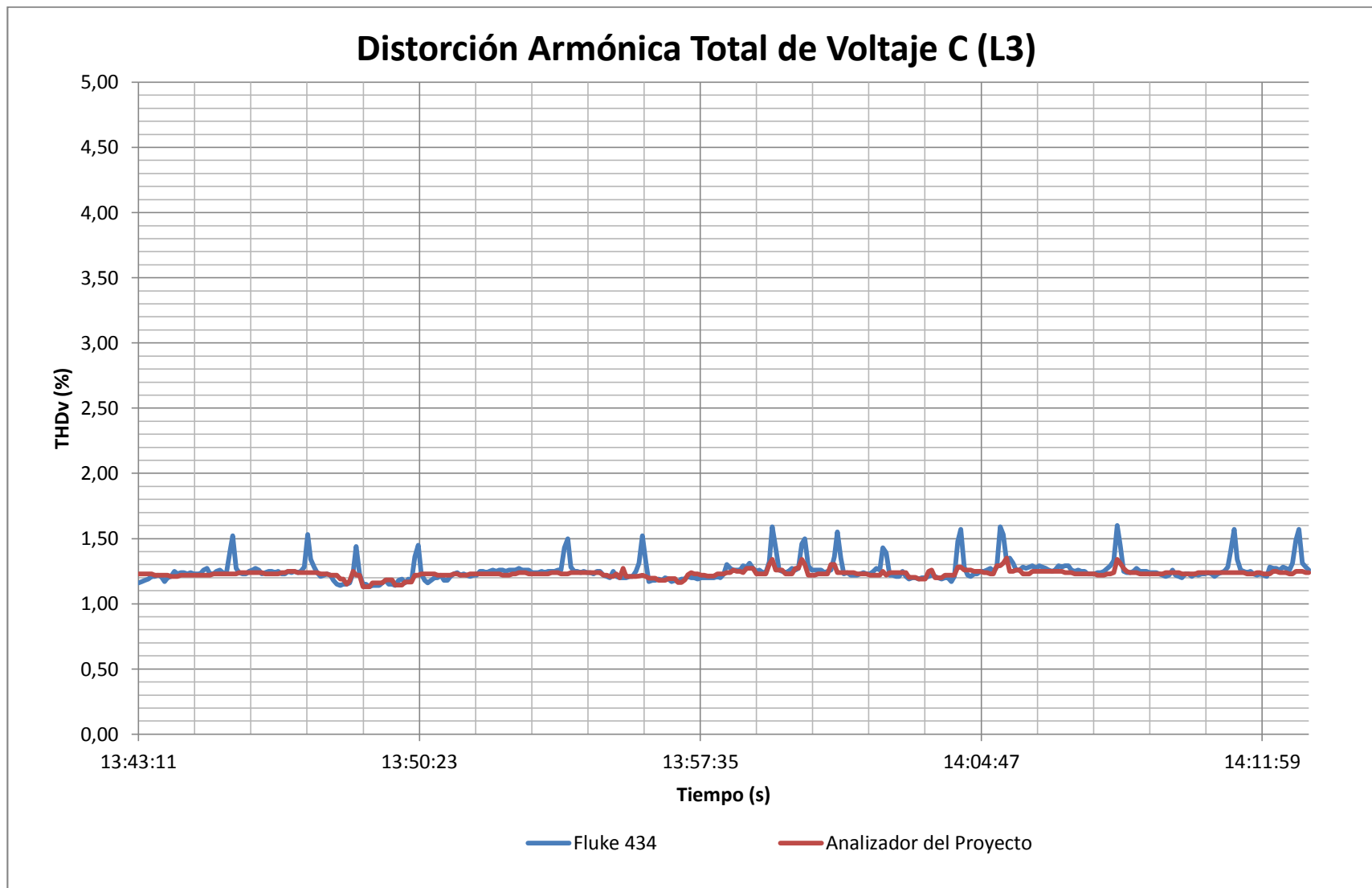


Figura 4.61. Histórico de distorsión armónica total de voltajes C (L3) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.7.3. Tercera prueba experimental.

La Tabla 4.21, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de voltaje de fase. En las Figuras 4.62, 4.63 y 4.64 se muestra el comportamiento durante el tercer periodo de medición comprendida entre las 02:56:06 p.m. y 03:25:51 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.21. Resumen de variable de distorsión armónica total de voltaje (THDv's) obtenidas en el tercer ensayo.

	THDv A (L1)		THDv B (L2)		THDv C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	358	358	358	358	358	358
Valor máximo registrado (%)	1.520	1.240	1.620	1.366	1.720	1.505
Valor mínimo registrado (%)	0.947	0.982	1.083	1.098	1.222	1.234
Valor promedio (%)	1.220	1.098	1.241	1.211	1.383	1.368
Error máximo (%)	25.395		27.528		15.361	
Error mínimo (%)	0.000		0.000		0.010	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 27.528%, sin embargo el 79% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%. Por lo tanto, el margen de error del 21% de las muestras adquiridas no son aceptables.

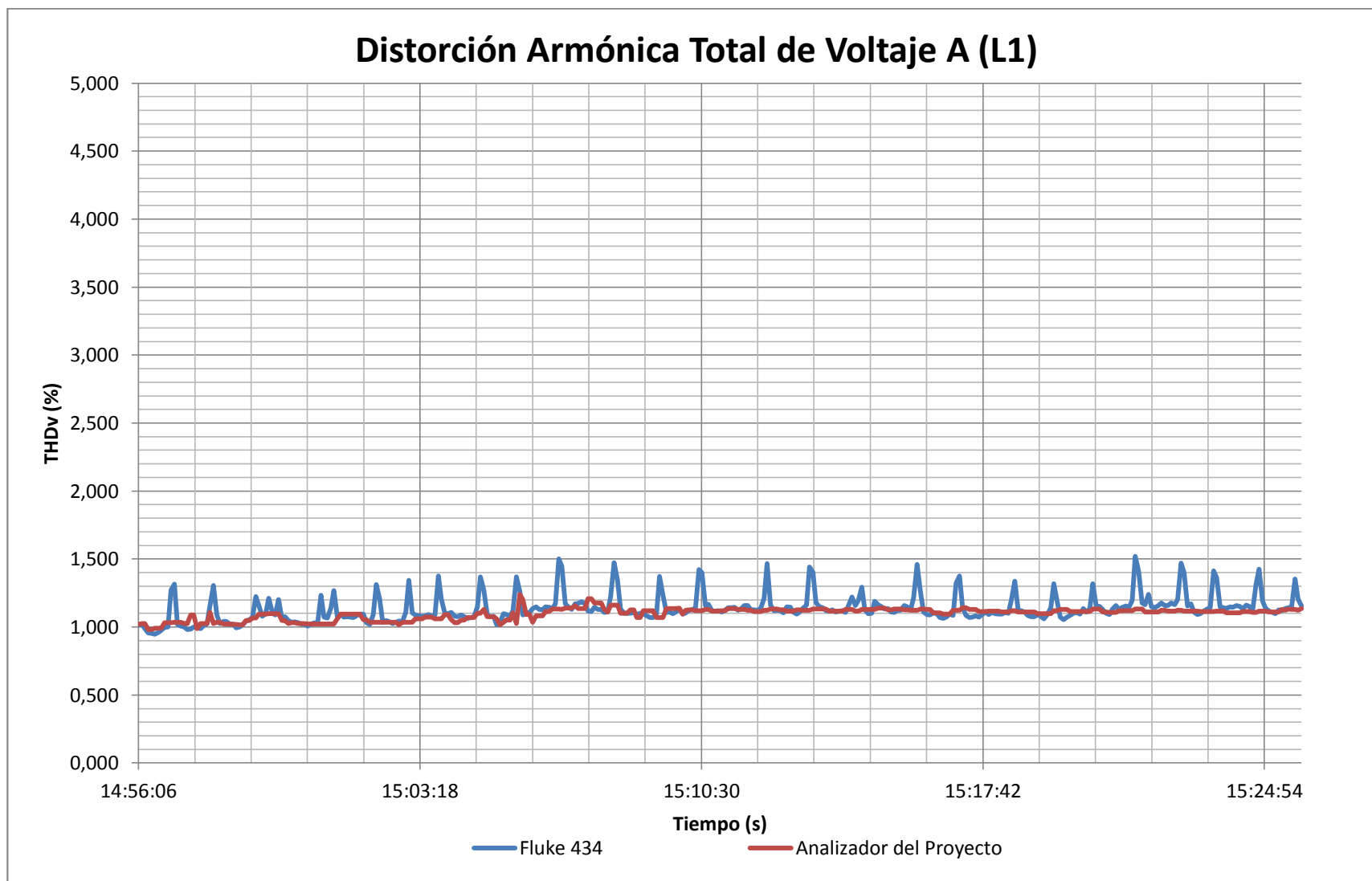


Figura 4.62. Histórico de distorsión armónica total de voltajes A (L1) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

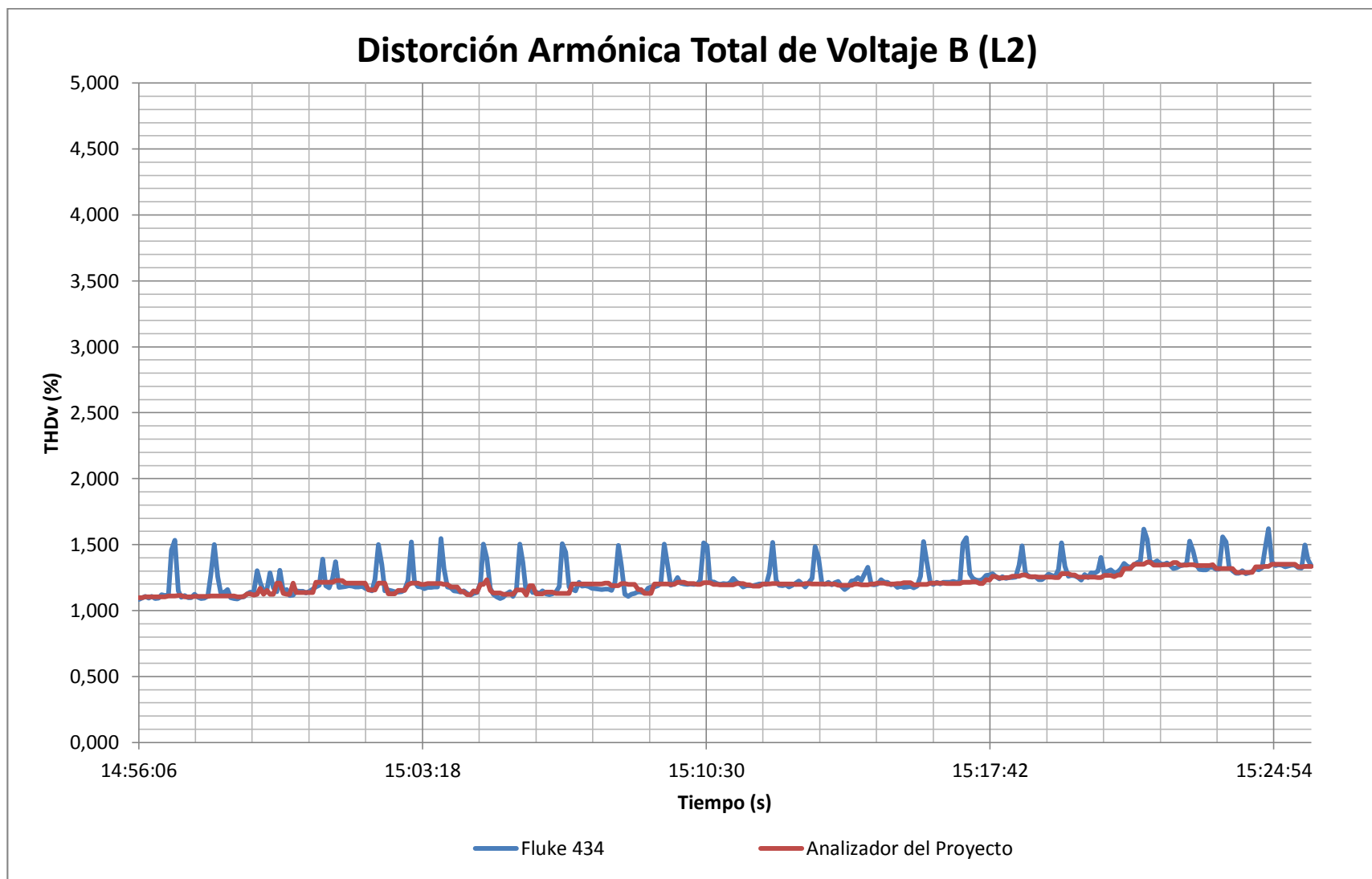


Figura 4.63. Histórico de distorsión armónica total de voltajes B (L2) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

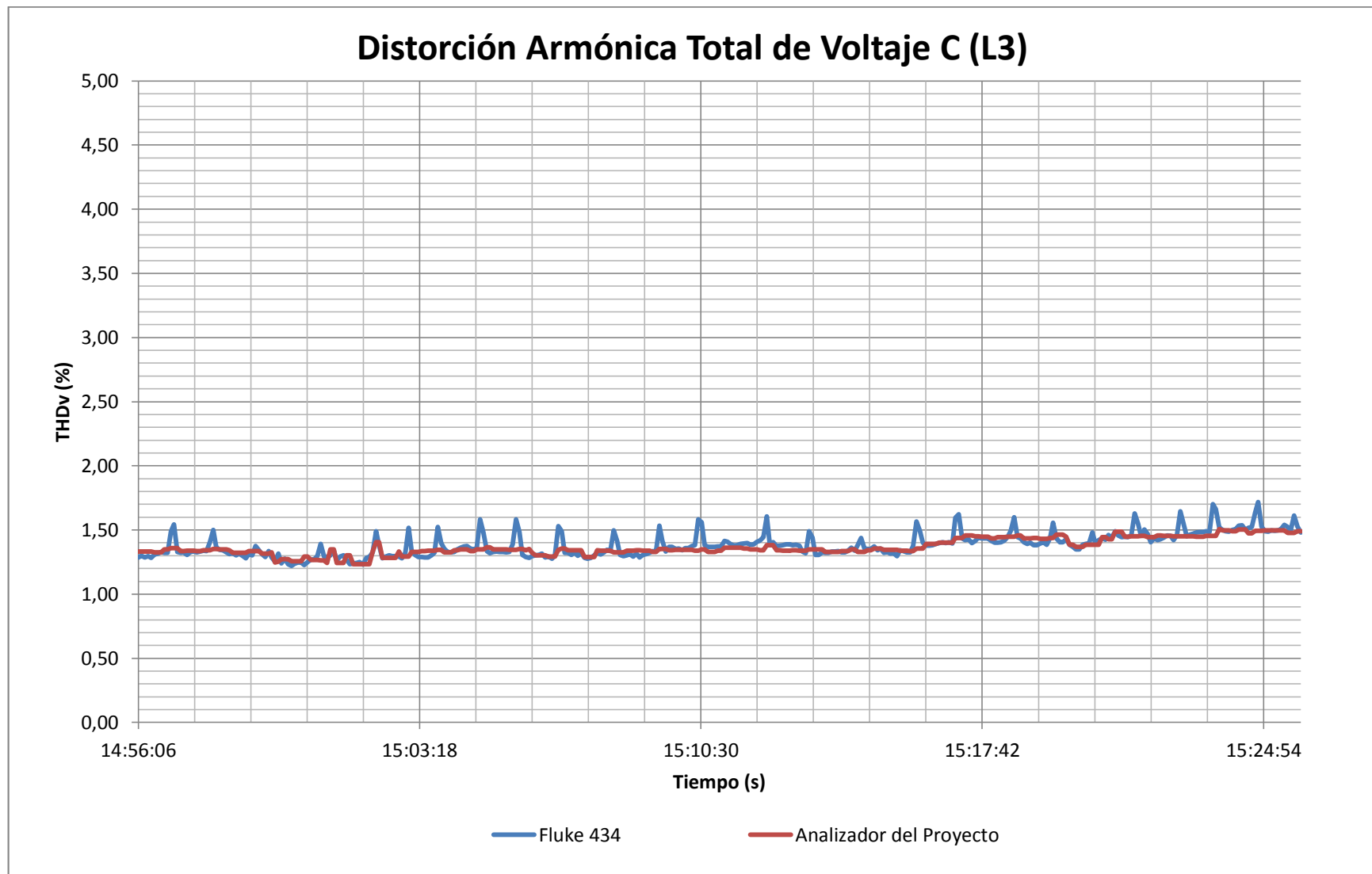


Figura 4.64. Histórico de distorsión armónica total de voltajes C (L3) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.8. Distorsión armónica total de corriente (THDi) de fase.

Los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de corriente de fase, realizado en el tablero de distribución del Edificio de Unidades Productivas, se detallan en los siguientes apartados. En estos ensayos se recalca que los periodos de medición se realizaron en tres horarios diferentes cubiertos en tres días diferentes, con el objetivo de medir el comportamiento en regímenes diferentes.

4.2.8.1. Primera prueba experimental.

La Tabla 4.22, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de corriente de fase. En las Figuras 4.65, 4.66 y 4.67 se muestra el comportamiento durante el primer periodo de medición comprendida entre las 11:32:36 a.m. y 12:19:21 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.22. Resumen de variable de distorsión armónica total de corriente (THDi's) obtenidas en el primer ensayo.

	THDi A (L1)		THDi B (L2)		THDi C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	552	552	552	552	552	552
Valor máximo registrado (%)	10.493	10.558	9.504	9.664	10.367	10.482
Valor mínimo registrado (%)	8.187	8.127	6.838	7.179	6.990	7.069
Valor promedio (%)	9.376	9.330	8.653	8.707	9.149	9.274
Error máximo (%)	9.413		10.503		11.936	
Error mínimo (%)	0.004		0.005		0.009	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 11.936%, sin embargo el 91% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

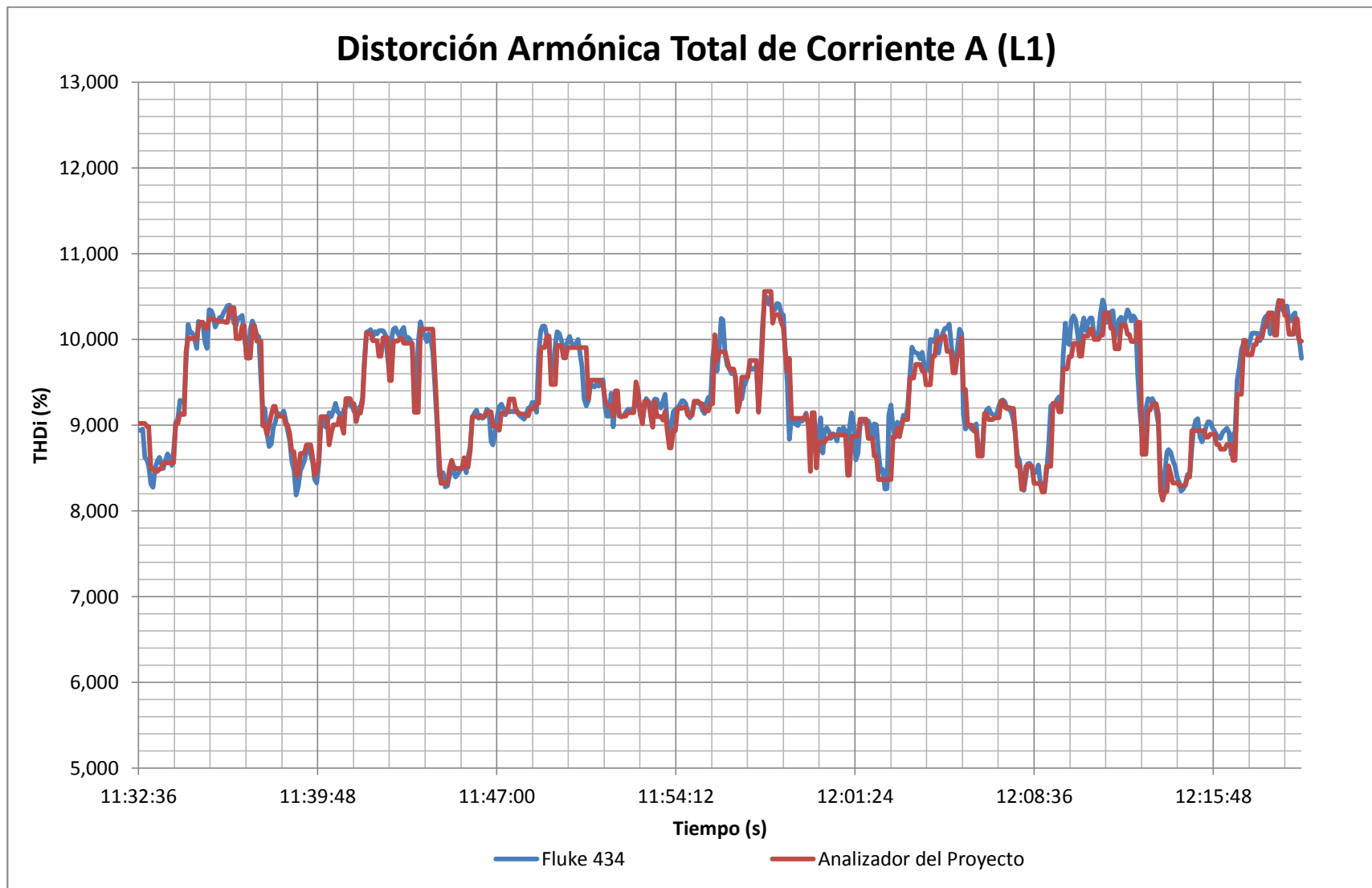


Figura 4.65. Histórico de distorsión armónica total de corriente A (L1) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

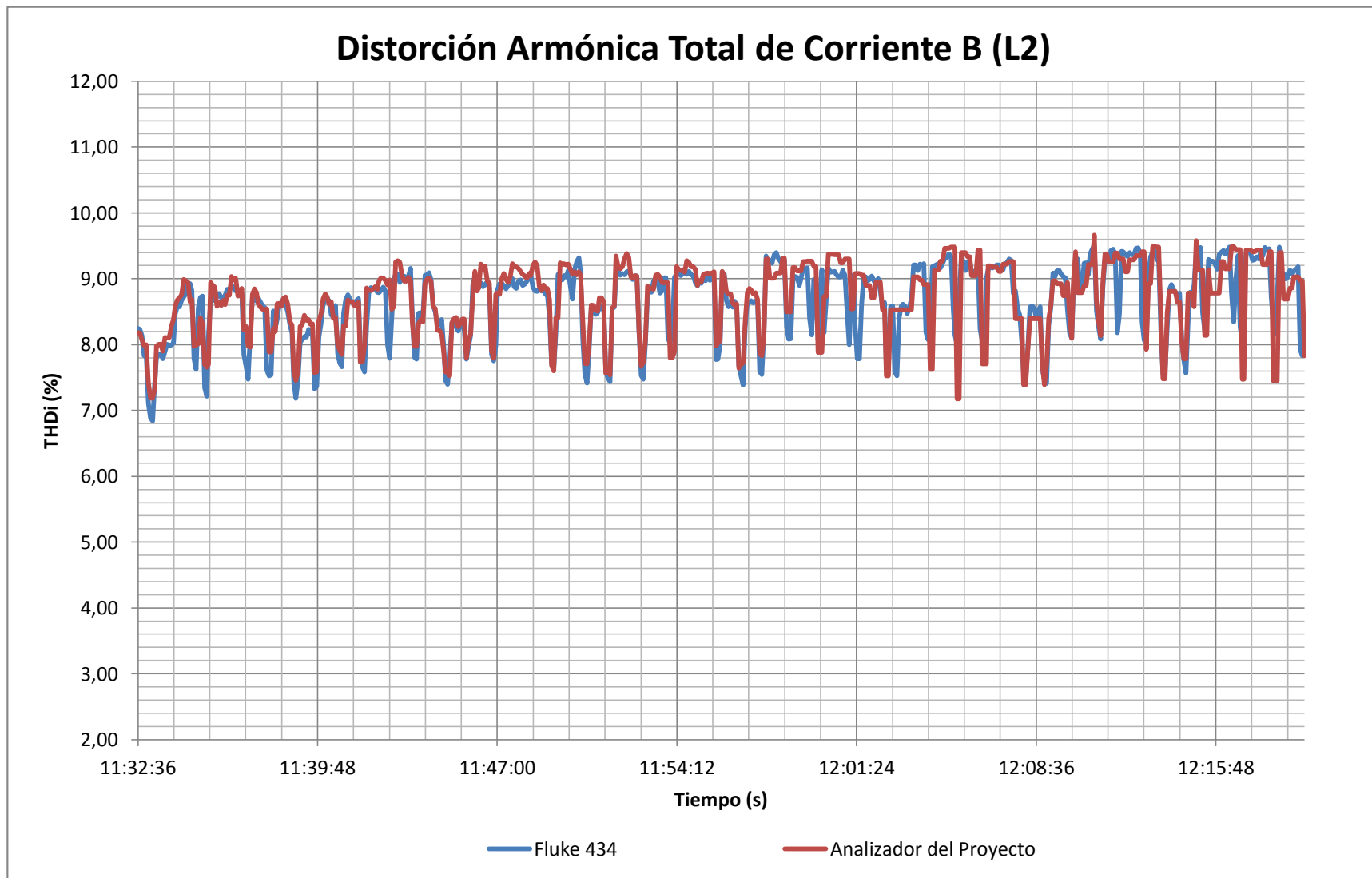


Figura 4.66. Histórico de distorsión armónica total de corriente B (L2) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

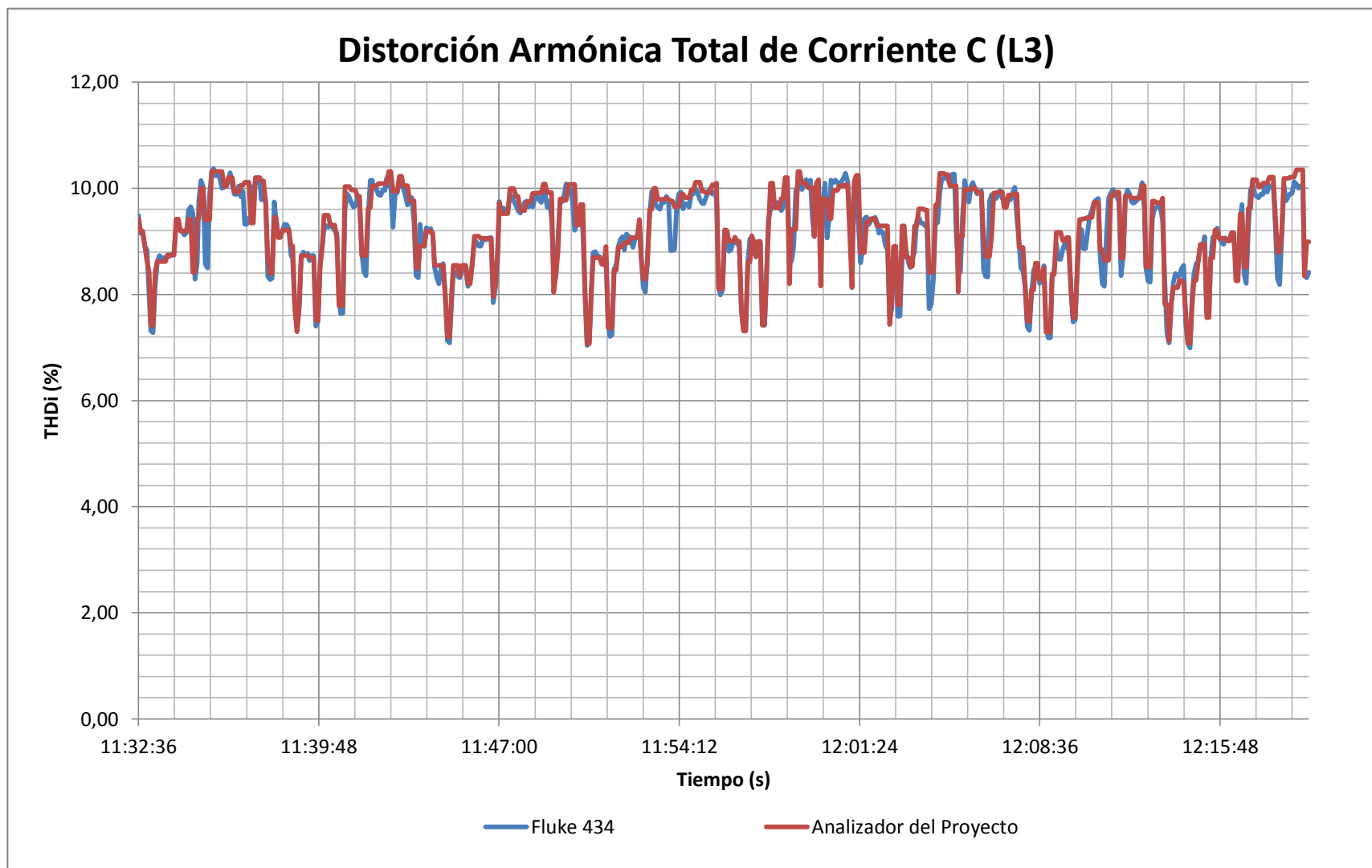


Figura 4.67. Histórico de distorsión armónica total de corriente C (L3) en el primer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.8.2. Segunda prueba experimental.

La Tabla 4.23, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de corriente de fase. En las Figuras 4.68, 4.69 y 4.70 se muestra el comportamiento durante el segundo periodo de medición comprendida entre las 01:10:27 p.m. y 01:40:52 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.23. Resumen de variable de distorsión armónica total de corriente (THDi's) obtenidas en el segundo ensayo.

	THDi A (L1)		THDi B (L2)		THDi C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	366	366	366	366	366	366
Valor máximo registrado (%)	9.061	9.088	7.787	8.003	10.361	10.148
Valor mínimo registrado (%)	6.171	6.259	6.099	6.140	6.719	6.829
Valor promedio (%)	7.508	7.504	6.836	6.840	8.779	8.750
Error máximo (%)	8.031		8.366		10.825	
Error mínimo (%)	0.0057		0.0068		0.0064	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 10.825%, sin embargo el 96% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

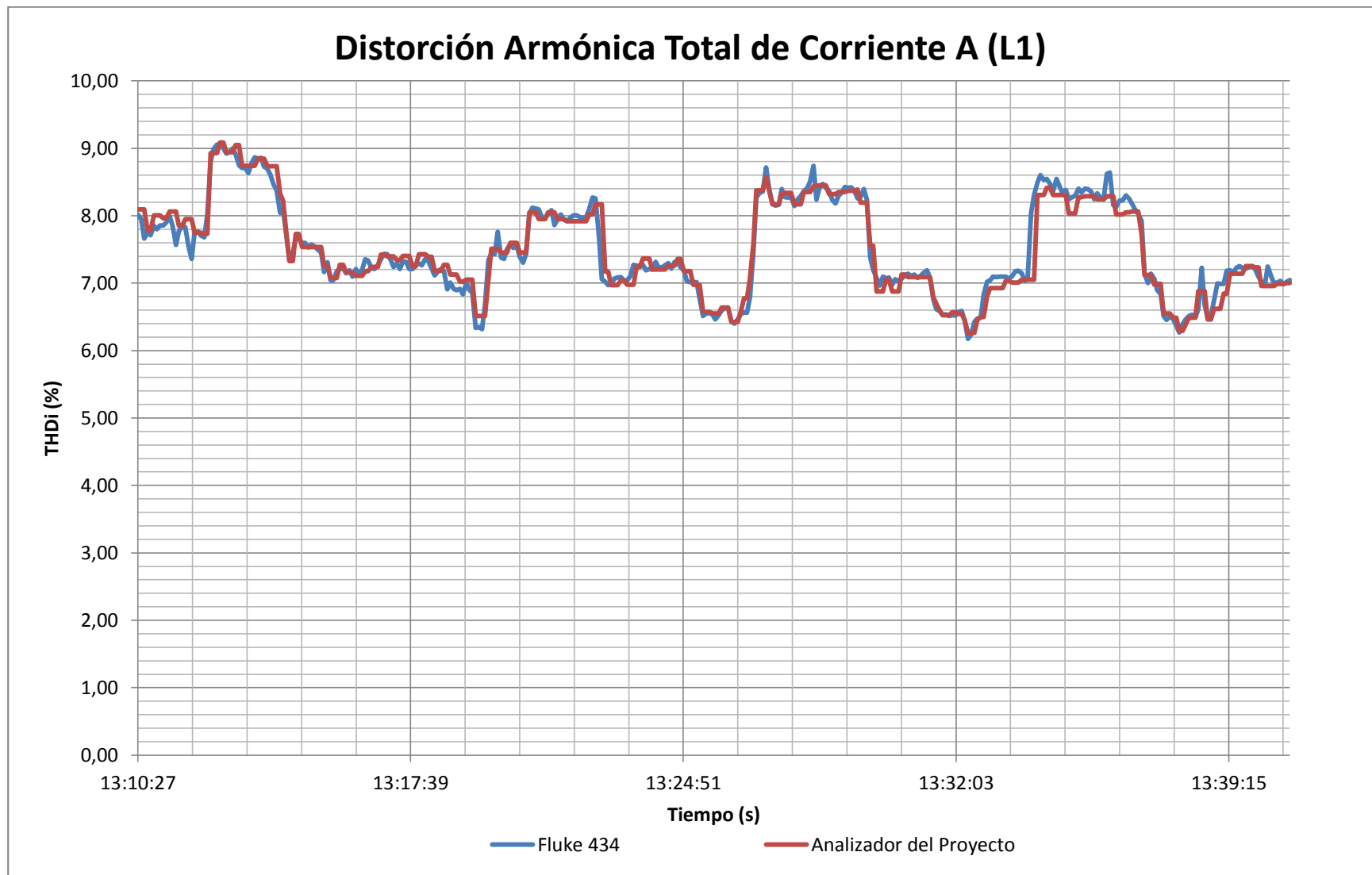


Figura 4.68. Histórico de distorsión armónica total de corriente A (L1) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

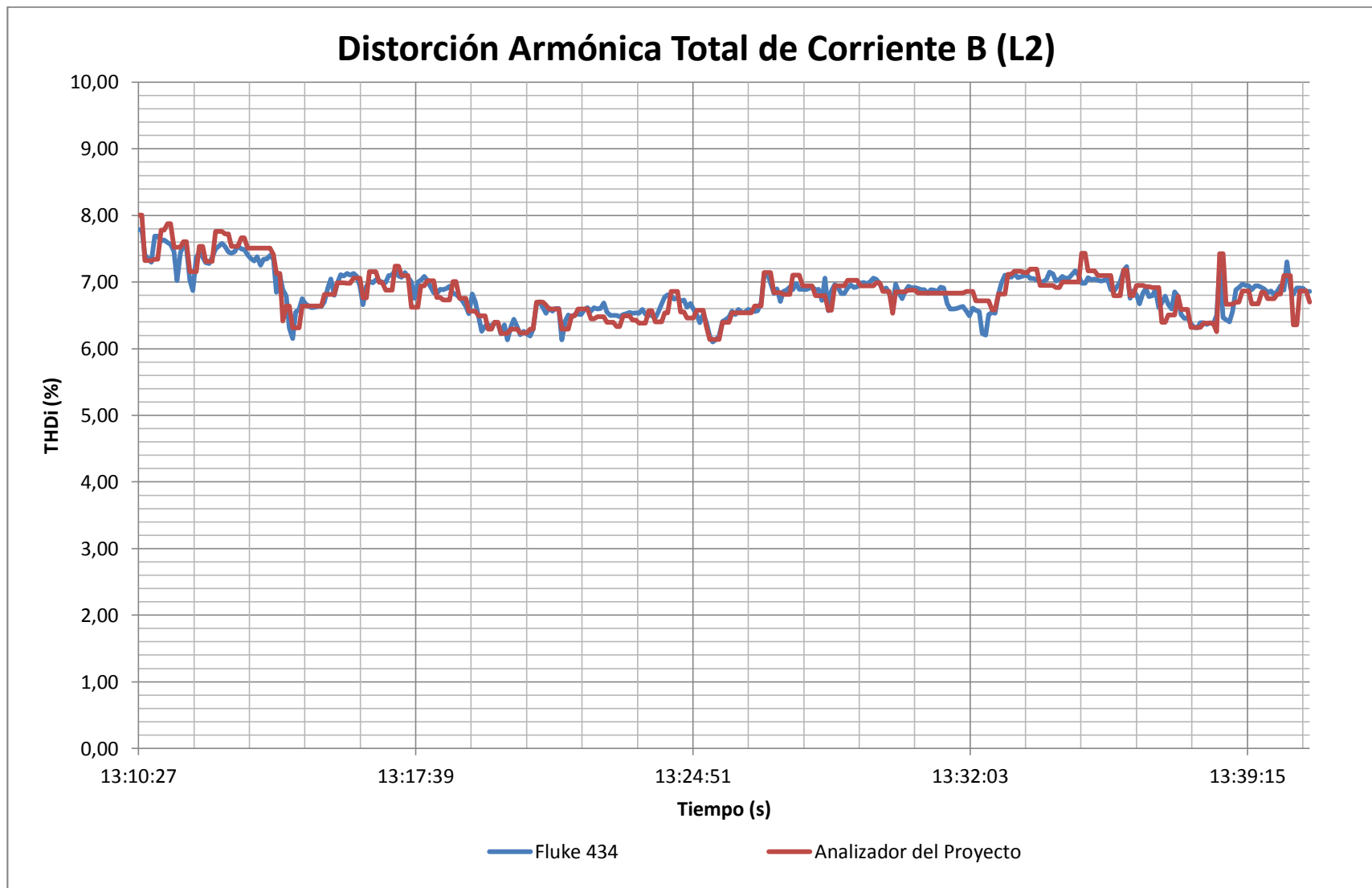


Figura 4.69. Histórico de distorsión armónica total de corriente B (L2) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

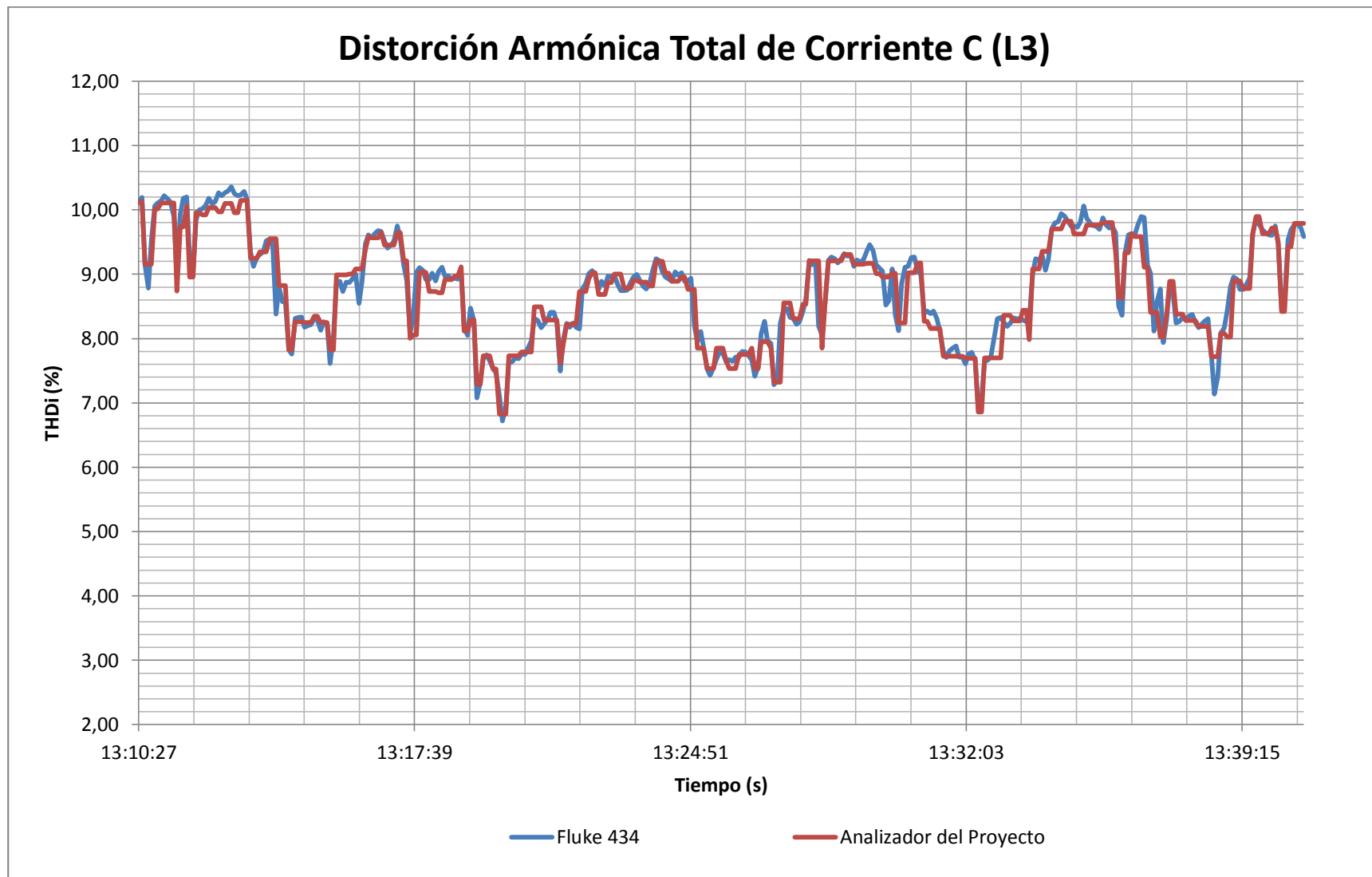


Figura 4.70. Histórico de distorsión armónica total de corriente C (L3) en el segundo ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

4.2.8.3. Tercera prueba experimental.

La Tabla 4.24, muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de corriente de fase. En las Figuras 4.71, 4.72 y 4.73 se muestra el comportamiento durante el tercer periodo de medición comprendida entre las 02:24:15 p.m. y 02:54:10 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía, el intervalo de muestreo de las señales es de 5 segundos.

Tabla 4.24. Resumen de variable de distorsión armónica total de corriente (THDi's) obtenidas en el tercer ensayo.

	THDi A (L1)		THDi B (L2)		THDi C (L3)	
	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto	FLUKE 434	Analizador del Proyecto
Total de muestras	360	360	360	360	360	360
Valor máximo registrado (%)	8.868	8.796	7.490	7.516	9.686	9.518
Valor mínimo registrado (%)	5.859	5.961	6.047	6.014	6.242	6.083
Valor promedio (%)	7.392	7.388	6.864	6.881	8.380	8.342
Error máximo (%)	8.769		8.293		9.968	
Error mínimo (%)	0.005		0.003		0.010	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye lo siguiente. El error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 9.968%, sin embargo el 96% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

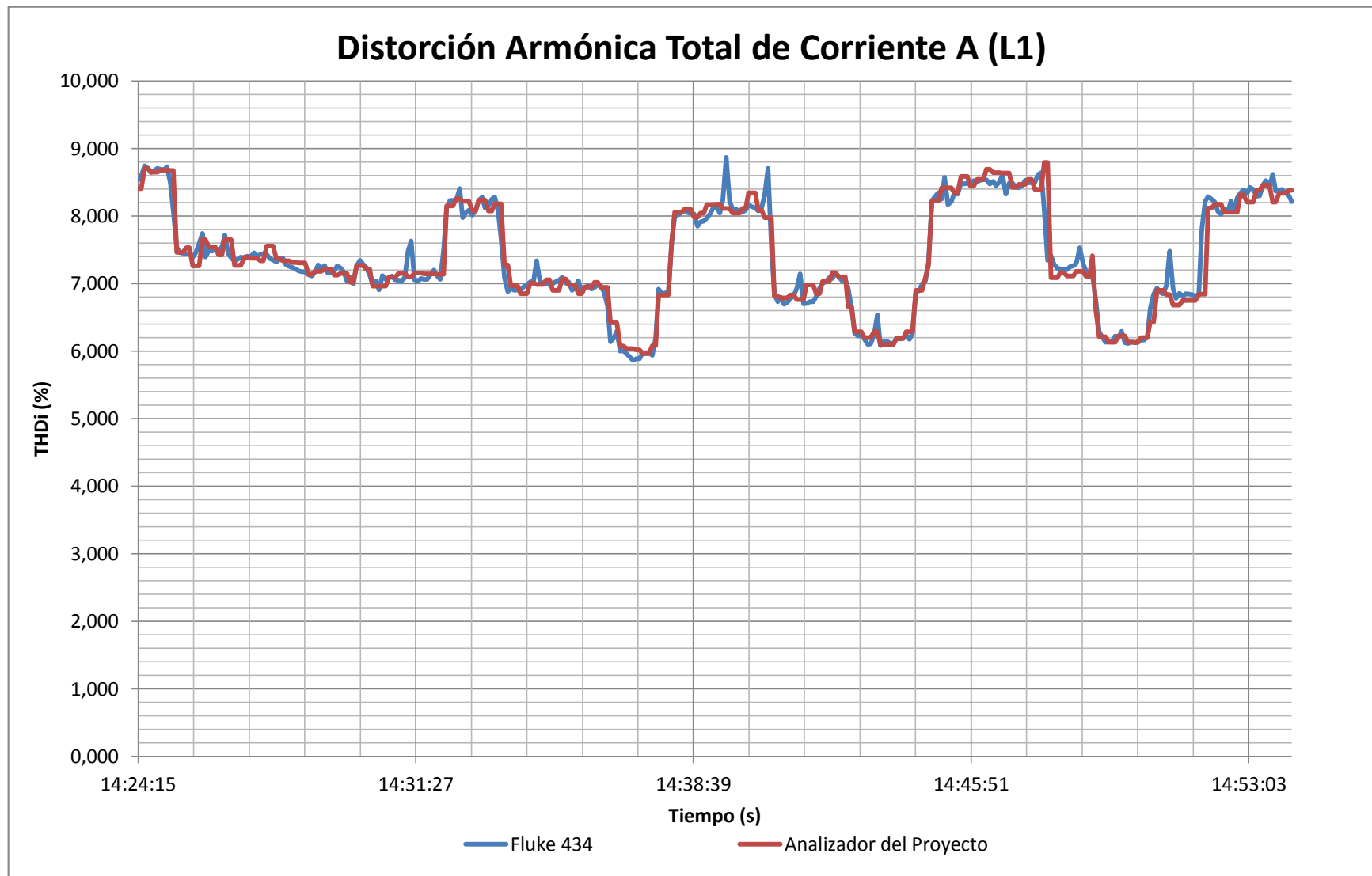


Figura 4.71. Histórico de distorsión armónica total de corriente A (L1) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

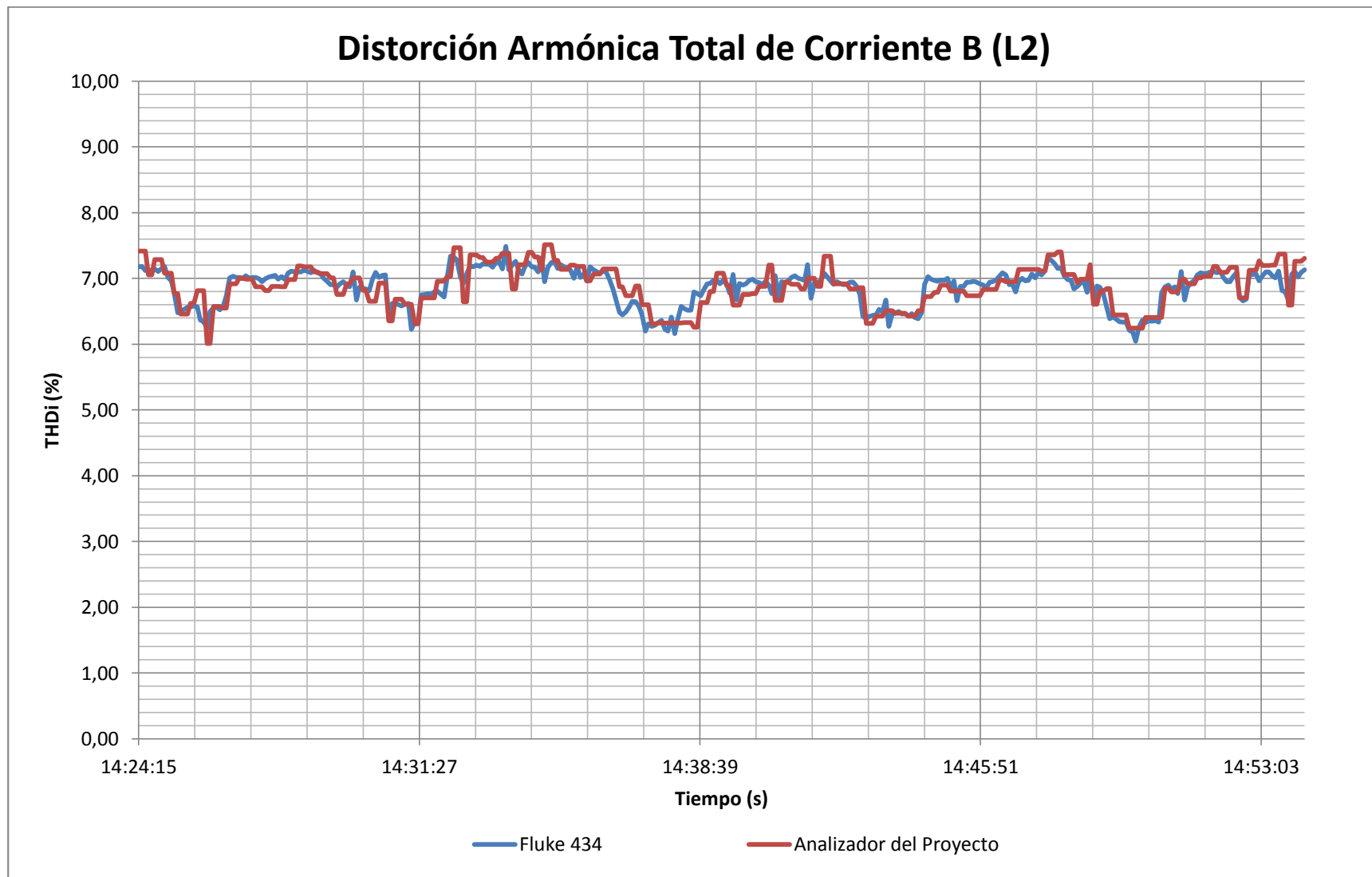


Figura 4.72. Histórico de distorsión armónica total de corriente B (L2) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

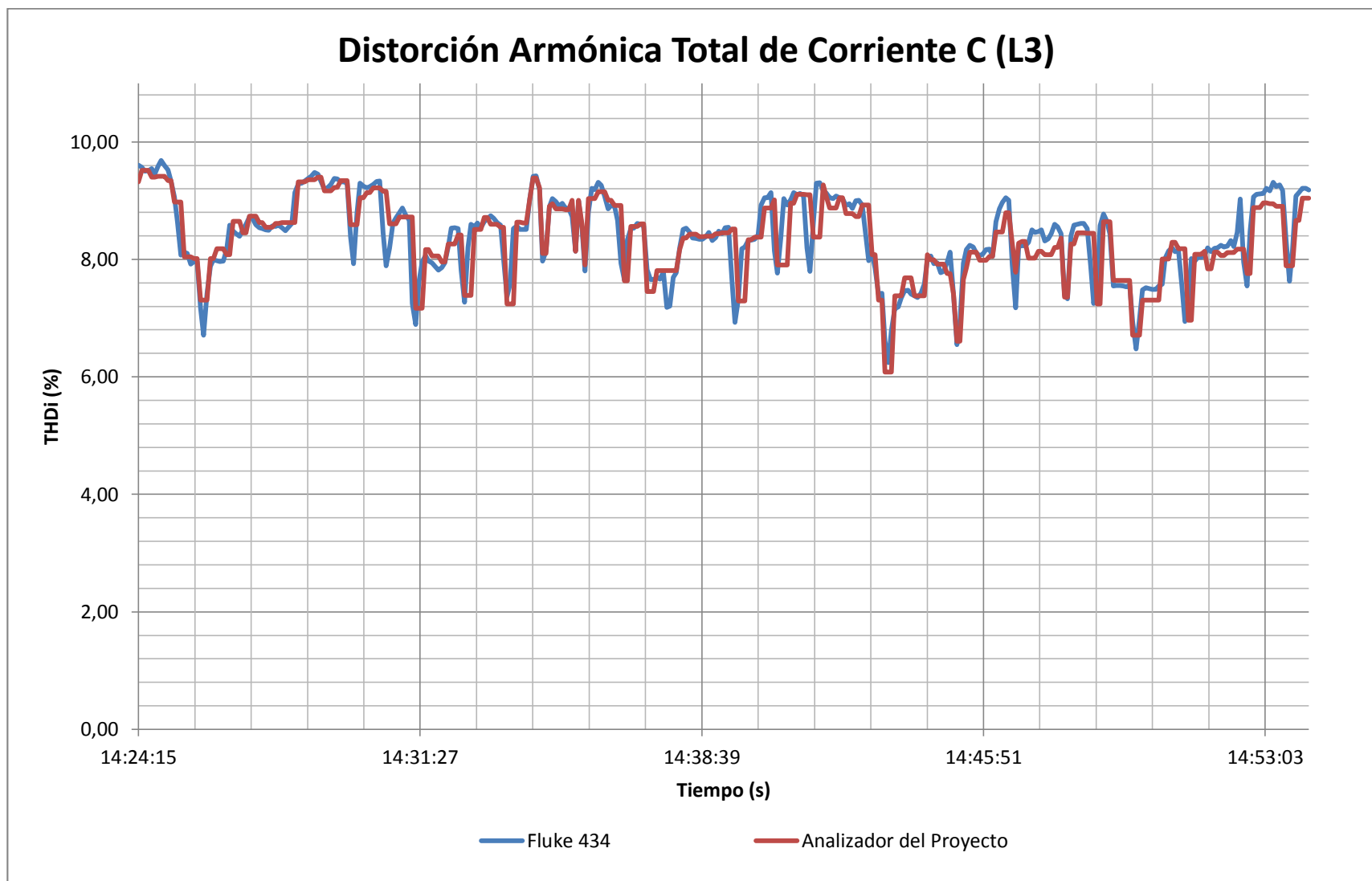


Figura 4.73. Histórico de distorsión armónica total de corriente C (L3) en el tercer ensayo.

Fuente: Diseño del autor.

CONCLUSIONES

- La metodología implementada en este proyecto pone a disposición el cálculo realizado para la determinación de parámetros de calidad de energía eléctrica en una red trifásica.
- Se cumplió con el objetivo de diseñar un analizador de calidad de energía eléctrica en plataforma de bajo coste, con transmisión de datos basado en protocolo Ethernet, satisfaciendo las necesidades requeridas para la medición de parámetros de calidad.
- La funcionalidad de los algoritmos tuvo éxito en la medida de voltaje, corriente, potencia real, aparente, factor de potencia y distorsión armónica total de corriente (THDi) por fase ubicándose dentro de un margen de error aceptable en un porcentaje mayor al 90% de las muestras adquiridas, sin embargo en el porcentaje restante de muestras se han obtenido errores superiores al 5%.
- En base a los valores correspondientes al error máximo, se puede concluir que la funcionalidad de los algoritmos no tuvo éxito en las medidas de potencia reactiva (error máximo 25.806%) y distorsión armónica total de voltaje (THDv) (error máximo 29.817%), sin embargo se atribuye este error a la sensibilidad del sistema ya que en estas jornadas de medición los rangos recorridos por la variable medida, está alrededor de la unidad, es por ello que por ejemplo una variación de 0,3 genera un valor del 30% aproximadamente.
- Para la medida de señales de voltaje, es conveniente utilizar sensores resistivos con el propósito de cumplir con la proporcionalidad a la tensión primaria fase-neutro, por poseer las mejores características con respecto a los sensores inductivos, en lo inherente a las condiciones de gran rango dinámico y alta linealidad.
- Para la medida de señales de corriente, debe utilizarse sensores de transformación que posean gran ancho de banda e incertidumbre menor al 2% según exigencias de normas internacionales como la IEC 61000-4-30 clase B. Dichos sensores no deben poseer núcleo de hierro o de ferrita, para disminuir la susceptibilidad a los fenómenos de saturación y no linealidad.

- La correcta elección de sensores de voltaje y corriente, complementado con la correcta metodología de calibración, confluye en un sistema con características óptimas en lo que respecta a exactitud y precisión de las variables adquiridas.
- Los voltajes registrados por el prototipo analizador de energía con respecto al instrumento de referencia poseen similares tendencias, luego del análisis de ambos conjuntos de datos, se registra un error máximo del 0.489%.
- Las corrientes registradas por el prototipo analizador de energía con respecto al instrumento de referencia poseen similares tendencias, luego del análisis de ambos conjuntos de datos, se registran errores inferiores al 5% para el 98% de las muestras adquiridas, así también se registran errores no aceptables para el 2% restante de las muestras adquiridas.
- El uso de sensores de tipo transformador incluye un efecto, aunque mínimo, de alteración de la señal de salida, sus características de no linealidad insertan armónicos impares, principalmente de tercer orden.
- Se realizó el cálculo de THD hasta el séptimo armónico; por la principal razón que en la red eléctrica de una edificación, las amplitudes armónicas más significativas son aquellas generadas por cargas no lineales de orden impar especialmente de 3ro, 5to y 7mo orden, ejemplos de estas cargas no lineales son: equipos electrodomésticos, ordenadores, controladores, motores y transformadores.
- Cabe recalcar que el proceso para cálculo de armónicos es el que compromete mayor cantidad de recursos computacionales del sistema, en tal sentido que cada cálculo del parámetro THD (7 armónicos) involucra un tiempo de 2 segundos aproximadamente, por señal, ese tiempo multiplicado por 6 señales a analizar, se obtiene un retardo de aproximadamente 12 segundos. En tal sentido que el intervalo de tiempo para determinar el parámetro THD por fase es de 12 segundos.
- Para evitar daños en el conversor analógico a digital debido a los efectos de baja/sobre tensión respecto al valor nominal, se realizó el acondicionamiento de señales de salida resultante, para un margen de 4.5 Voltios pico a pico, reservando 0.5 Voltios para estos efectos.
- Según la norma IEC 61000-4-30 para rendimiento clase A, la incertidumbre de la medida no debe exceder del $\pm 0.1\%$ para el valor nominal de voltaje y corriente. Para clase B, la incertidumbre no debe exceder del $\pm 0.5\%$ para el valor de voltaje y del

$\pm 2.0\%$ para el valor de corriente. Por lo tanto, según las pruebas realizadas, el 100% de las muestras adquiridas del parámetro voltaje y el 97% de las muestras adquiridas del parámetro corriente, cumplen los umbrales de un analizador Clase B.

- Las funciones que dispone LabVIEW para comunicación, facilitan el desarrollo de una aplicación con capacidad de monitoreo remoto de información, las funciones utilizadas en el presente proyecto son las de DataSocket que permiten leer y escribir datos por medio de por medio de un cliente web.

RECOMENDACIONES

- Para cumplir con las exigencias de la norma IEC 61000-4-30 clases A en la medida de voltaje eficaz, corriente eficaz y armónicos, se recomienda realizar los cálculos en base a una señal capturada que contenga 12 ciclos, para sistemas eléctricos de 60 Hz continuos y sin solapamiento.
- Es necesario realizar un estudio muy detallado para la correcta elección de sensores de voltajes y corrientes, así como también es necesaria la cuantificación de las características estáticas y dinámicas del sensor elegido, con el propósito de obtener información completa sobre la incertidumbre del sistema, ello lo exige la norma IEC 61000-4-30 clase A, para instrumentos de medida de calidad de energía eléctrica.
- Para obtener una mayor exactitud en la digitalización de una señal analógica, es importante incrementar la resolución (actual 10 bits) del conversor analógico a digital, así como también se debe incrementar la frecuencia de muestro (actual 9600 muestras/seg) de los canales de entrada analógicos.
- Para trabajos futuros en cuanto a diseño y validación de equipos analizadores de calidad de energía, es recomendable utilizar sistemas DSPs, ya que la plataforma Arduino no está pensado para aplicaciones de procesamiento de señales.

REFERENCIAS

- [1]. I. Viquez, “Elaboración de una guía práctica para la evaluación de la calidad de energía dentro de C.N.F.L. (Primera parte: Sistemas de aterrizamiento en Edificios)”, Bachiller en Ingeniería eléctrica, Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, 2007.
- [2]. G. J. López, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE Y HARDWARE DE UN REGISTRADOR DE VARIABLES ELÉCTRICAS CON COMUNICACIONES ETHERNET BASADO EN TECNOLOGÍA ARDUINO Y SISTEMA DE SUPERVISIÓN HMI”, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Del Ejército, 2013. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6135/1/T-ESPEL-ENI-0298.pdf>
- [3]. C. G. Muso, S.M. Plasencia, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DAQ Y HMI DE UN ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA PARA LA EMPRESA ELÉCTRICA BOLÍVAR EMELBO S.A.”, Escuela Politécnica Del Ejército, 2007. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3395/1/T-ESPEL-0161.pdf>
- [4]. S. Ramírez, E. A. Cano, “Calidad del Servicio de Energía Eléctrica”, Universidad Nacional de Colombia, 1ª edición, 2006. [Online]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5073/1/samuelramirezcastano.2006.pdf>
- [5]. S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta “Electric Power Quality”, in Electric Power Quality, Springer Dordrecht Heidelberg, 2010, New York, pp. 5-12.
- [6]. O. Castañeda, W Castañeda, “Análisis de Calidad de Energía acerca de la Calidad del Producto e Influencia de Armónicos de Corriente dentro del Área de Concesión de CNEL-Milagro”, Corporación Centro Nacional de Control de Energía – CENACE, Eléctrica de Guayaquil. [Online]. Disponible en: <http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/522/1/10%20An%C3%A1lisis%20de%20Calidad%20de%20Energ%C3%ADa%20acerca%20de%20la%20Calidad%20del%20P.pdf>
- [7]. N.M. Granda, R.E. Guevara, “CALIDAD DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS PÚBLICOS”, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, 2012. [Online]. Disponible en: http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/calidad_energia_eficiencia_edificios_publicos.pdf
- [8]. “CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA”, Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente. [Online]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>
- [9]. “FUNDAMENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA”, Universidad Politécnica Salesiana. [Online]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/75/7/Capitulo1.pdf>
- [10]. M.A. Silva, G. Ordoñez, “CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA: DISEÑO y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO COMO ALTERNATIVA PARA LA MONITORIZACIÓN DE INTERRUPCIONES y CAÍDAS DE TENSIÓN”, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, vol. 4, 2005.
- [11]. “Medición de Parámetros de Calidad de Energía bajo el estándar IEC61000-4-30. Primera parte. Medición de Flicker en redes eléctricas”, ECAMEC Tecnología, 2009. [Online]. Disponible en: <http://www.ecamec.com/newsletter/bajarnotab0409.pdf>

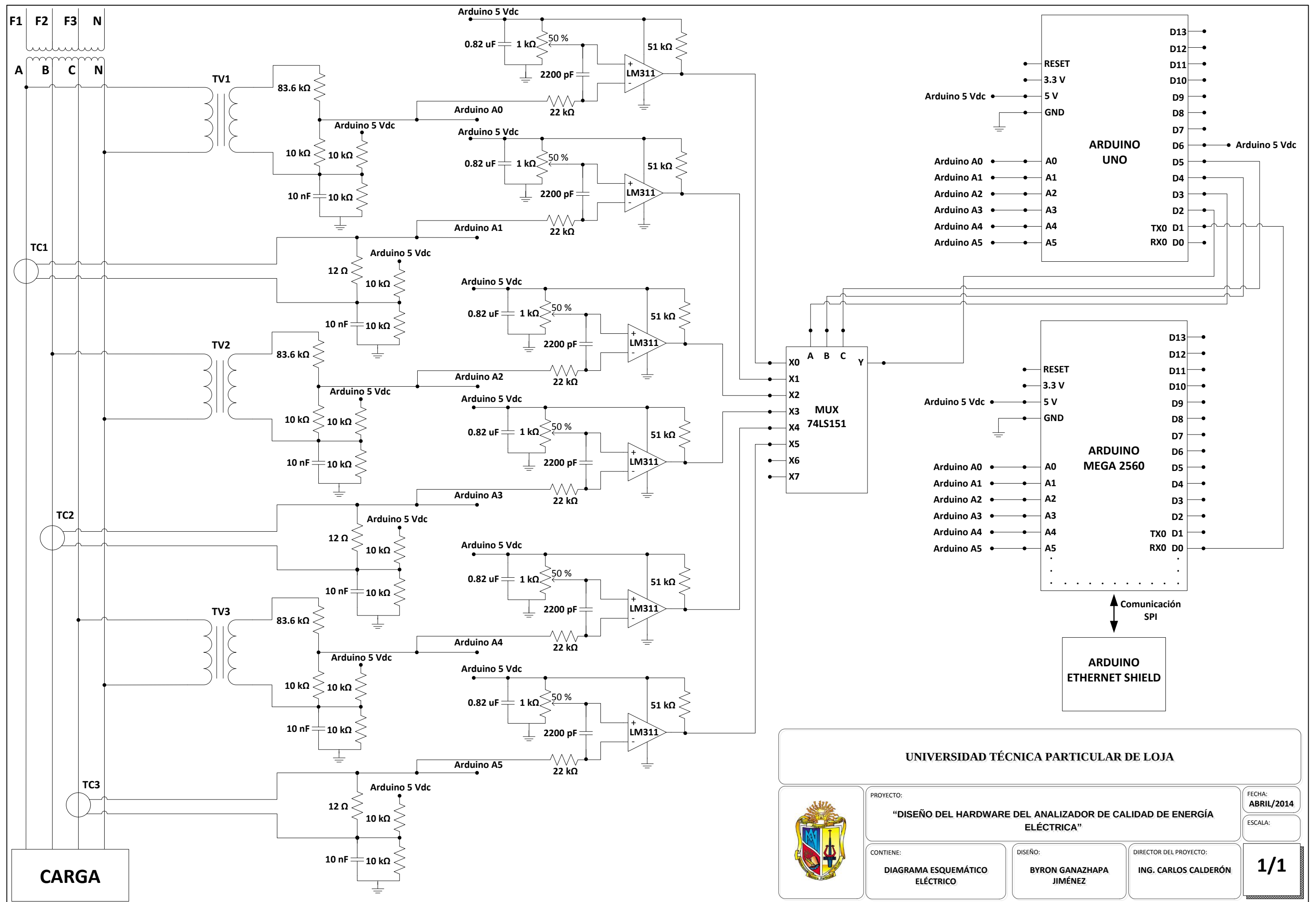
- [12]. I. Usunáriz, "NORMATIVAS APLICABLES A LA CALIDAD ELÉCTRICA", Calidad eléctrica. [Online]. Disponible en: <http://www.isotest.es/web/Soporte/Formacion/REGLAMENTOS/Normas%20PQ.pdf>
- [13]. "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE Standards 1159, 2009.
- [14]. S. Santoso, "Power Quality Requirements for Reliability: Towards 'Perfect' Power Quality", GCEP, Stanford University, University of Texas at Austin, 2007. [Online]. Disponible en: http://gcep.stanford.edu/pdfs/iq9bO_1lb0rRuH_ve0A2jA/Santoso-20071101-GCEP.pdf
- [15]. A. Abreu. "CALIDAD DE POTENCIA ELÉCTRICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN", ENELVEN C.A. Energía eléctrica de Venezuela, Jun. 2005. [online]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/189282785/LIBRO-CALIDAD-DE-POTENCIA-ELECTRICA-EN-REDES-DE-DISTRIBUCION-pdf>
- [16]. R. C. Dorf, J. A. Svoboda, "Potencia de ca de estado estable", in Circuitos Electricos, 6ª Ed. Grupo Alfaomega, John Wiley & Sons 2006, pp. 466-522.
- [17]. J. Fernández, "Calculo simplificado del valor medio y eficaz de una forma de onda". [Online]. Disponible en: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/31/40/a40.pdf>
- [18]. "Teorema del Valor Medio para integrales". [online]. Disponible en: <http://www.fca.unl.edu.ar/Intdef/TeoremaValorMedio.htm>
- [19]. J. Navalpotro, "Modulación y densidad espectral", Abacanto Digital, Nota técnica nº 3, Ago. 2004.
- [20]. E.W. Kamen, B.S. Heck, "Análisis de Fourier de las señales de tiempo discreto", in Fundamentos de Señales y Sistemas usando la Web y Matlab, 3ª Ed. Pearson Education, M.J. Horton. 2007, pp. 166-217.
- [21]. "Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica", RTR Energía. [Online]. Disponible en: http://www.rtrenergia.es/rtr/ficheros/armonicos_2012.pdf
- [22]. H. A. Roncancio, H. Cifuentes, "TUTORIAL DE LABVIEW", Laboratorio de Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2001. [Online]. Disponible en: https://www.academia.edu/5770671/TUTORIAL_Que_es_LabVIEW_LabVIEW_Laboratory_Virtual_Instrument_Engineering_Workbench
- [23]. Arduino Uno. [Online]. Disponible en: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- [24]. Arduino Mega. [Online]. Disponible en: <http://arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardMega>
- [25]. J.R. Lajara, J.P. Sebastián, "Sección I. Introducción", in LabVIEW Entorno grafico de programación, Marcombo, Grupo Alfaomega, 2007, pp. 3-63.
- [26]. J.C. Obregon, N. Sotomayor. "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA", XXII jornadas en ingeniería eléctrica y electrónica, Escuela Politécnica nacional. [Online]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1414/1/CD-2105.pdf>
- [27]. J.I. Flórez, S.P. Herrera, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN MEDIDOR DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE BASADO EN UN PROCESADOR DE SEÑALES DIGITALES (DSP)", Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander. [Online]. Disponible en: <https://23416disenouis2010.wikispaces.com/file/view/120952.PDF>
- [28]. K. Casierra, A. Iñiguez, "Monitoreo y análisis de variables eléctricas que permiten validar el estado actual para futuras correcciones en el suministro de energía eléctrica de cada uno de los edificios del campus UTPL", Escuela de electrónica y

- Telecomunicaciones, Universidad Técnica Particular de Loja, 2013. [Online]. Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec//handle/123456789/6531>
- [29]. International Standard IEC 61000-4-30, "Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods". 1st Ed. 2003. [Online]. Disponible en: http://212.175.131.171/IEC/iec61000-4-30%7Bed1.0%7Den_d.pdf
- [30]. A. Kuzmenko, "RADIX-4 FFT (integer math)", [Online]. Disponible en: <http://coolarduino.wordpress.com/2012/03/26/radix-4-fft-integer-math/>
- [31]. "Audio Spectrum Monitor", [Online]. Disponible en: http://elm-chan.org/works/akilcd/report_e.html

ANEXOS

ANEXO A

DISEÑO DEL HARDWARE PARA LA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA



ANEXO B

PROGRAMACIÓN DE LA TARJETA ARDUINO UNO

```

/*****
This program was produced by the
ARDUINO V 1.0.5
© Copyright 2012 RADIX 4 FFT Anatoly Kuzmenko
http://coolarduino.wordpress.com/2012/03/26/radix-4-fft-integer-math/
© Copyright 2014 project Byron Ganazhapa
All Rights Reserved.

Project : Algoritmo para el cálculo de THD
Version : 1.0
Date : 01/03/2014
Author : Byron Ganazhapa
Company : UTPL
Comments: Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining
a copy of this software to deal in the Software without restriction,
including without limitation the rights to use, copy, modify, merge,
publish, distribute copies of the Software, and to permit persons to
whom the Software is furnished to do so, subject to the following
conditions:
* The above copyright notice and this permission notice shall be
included in all copies or substantial portions of the Software.
* THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND,
EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF
MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT.
*****/
#include <avr/pgmspace.h>

#define FFT_SIZE 128 // Número de muestras
#define LOG2_FFT 7 /* log2 FFT_SIZE */
#define MIRROR FFT_SIZE / 2
#define NWAVE 256 // Longitud de una onda
senoidal.

#define NBINS 8 // Número de intervalos a
mostrar +1
#define IND_STEP FFT_SIZE / (2 * NBINS) // Constante de indexación de
matrices.

const uint8_t bar_Width = 7;
const uint8_t updt_Rate = 16;
uint8_t updt_Cntr = 0;

volatile uint16_t smpl_Time = 16667; // (16MHz/60Hz/128)* 8.
volatile uint16_t smpl_Nmbr = 0; // Contador de muestras.
volatile uint8_t smpl_Flag = 0;
volatile int16_t adc_Offst = 512; // Mitad de onda 512.

volatile int16_t x_r[FFT_SIZE]; // 256 Bytes
int16_t f_r[FFT_SIZE]; // 256 Bytes
int16_t f_i[FFT_SIZE]; // 256 Bytes
uint16_t t_b[NBINS];

volatile uint32_t cntr_TmrF = 0; // Contador de tiempo muestras.
uint32_t avrg_TmrF = 0; // Valor medio de N = updt_Rate
mediciones.

int num_of_chann = 0; // Selector de canales
analógicos por software.
int A = 3; // Selector A del MUX 74LS151.
int B = 4; // Selector B del MUX 74LS151.
int C = 5; // Selector C del MUX 74LS151.
int State = 6;

const prog_int16_t Sinewave[NWAVE] PROGMEM = {
+0, +6, +13, +19, +25, +31, +37, +44, +50,
+56, +62, +68, +74, +80, +86, +92,

```

```

+98, +103, +109, +115, +120, +126, +131, +136, +142,
+147, +152, +157, +162, +167, +171, +176,
+180, +185, +189, +193, +197, +201, +205, +208, +212,
+215, +219, +222, +225, +228, +231, +233,
+236, +238, +240, +242, +244, +246, +247, +249, +250,
+251, +252, +253, +254, +254, +255, +255,
+255, +255, +255, +254, +254, +253, +252, +251, +250,
+249, +247, +246, +244, +242, +240, +238,
+236, +233, +231, +228, +225, +222, +219, +215, +212,
+208, +205, +201, +197, +193, +189, +185,
+180, +176, +171, +167, +162, +157, +152, +147, +142,
+136, +131, +126, +120, +115, +109, +103,
+98, +92, +86, +80, +74, +68, +62, +56, +50,
+44, +37, +31, +25, +19, +13, +6,
+0, -6, -13, -19, -25, -31, -38, -44, -50,
-56, -62, -68, -74, -80, -86, -92,
-98, -104, -109, -115, -121, -126, -132, -137, -142,
-147, -152, -157, -162, -167, -172, -177,
-181, -185, -190, -194, -198, -202, -206, -209, -213,
-216, -220, -223, -226, -229, -231, -234,
-237, -239, -241, -243, -245, -247, -248, -250, -251,
-252, -253, -254, -255, -255, -256, -256,
-256, -256, -256, -255, -255, -254, -253, -252, -251,
-250, -248, -247, -245, -243, -241, -239,
-237, -234, -231, -229, -226, -223, -220, -216, -213,
-209, -206, -202, -198, -194, -190, -185,
-181, -177, -172, -167, -162, -157, -152, -147, -142,
-137, -132, -126, -121, -115, -109, -104,
-98, -92, -86, -80, -74, -68, -62, -56, -50,
-44, -38, -31, -25, -19, -13, -6
};

```

```

// Activa la función de interrupción del comparador B del TIMER/COUNTER 1 //
ISR(TIMER1_COMPB_vect)
{
    if ( smpl_Nmbr < FFT_SIZE )
    {
        if (num_of_chann == 1){
            ADMUX = 0x41; // Canal de corriente L1.
            digitalWrite(A,HIGH); // Abre el canal analógico A1.
            digitalWrite(B,LOW); // Multiplexa la señal del PLL de L1.
            digitalWrite(C,LOW);
        }
        else if (num_of_chann == 2){
            ADMUX = 0x42; // Canal de voltaje L2.
            digitalWrite(A,LOW); // Abre el canal analógico A2.
            digitalWrite(B,HIGH); // Multiplexa la señal del PLL de L2.
            digitalWrite(C,LOW);
        }
        else if (num_of_chann == 3){
            ADMUX = 0x43; // Canal de corriente L2.
            digitalWrite(A,HIGH); // Abre el canal analógico A3.
            digitalWrite(B,HIGH); // Multiplexa la señal del PLL de L2.
            digitalWrite(C,LOW);
        }
        else if (num_of_chann == 4){
            ADMUX = 0x44; // Canal de voltaje L3.
            digitalWrite(A,LOW); // Abre el canal analógico A4.
            digitalWrite(B,LOW); // Multiplexa la señal del PLL de L3.
            digitalWrite(C,HIGH);
        }
        else if (num_of_chann == 5){
            ADMUX = 0x45; // Canal de corriente L3.
            digitalWrite(A,HIGH); // Abre el canal analógico A5.
            digitalWrite(B,LOW); // Multiplexa la señal del PLL de L3.
            digitalWrite(C,HIGH);
        }
        else {
            // Canal de voltaje L1.

```

```

        ADMUX      = 0x40;                // Abre el canal analógico A0.
        digitalWrite(A,LOW);              // Multiplexa la señal del PLL de I1.
        digitalWrite(B,LOW);
        digitalWrite(C,LOW);
    }
    x_r[smpl_Nmbr] = ADC - adc_Offst;      // Almacena 128 muestras por señal.
}
smpl_Nmbr++;                             // Sumatoria hasta N=128 muestras.
}

// Activa la función de interrupción externa INT0 //
ISR(INT0_vect) {                          // Entrada de las señales PLL.
    static int8_t delt_Bins = 0;

    delt_Bins++;
    if ( delt_Bins >= NBINS )
    {
        delt_Bins = 0;

        int16_t cntr_Tmr1 = TCNT1;

        cntr_TmrF = cntr_Tmr1 + (long) smpl_Time * smpl_Nmbr;    // Periodo del reloj

        if ( smpl_Nmbr > FFT_SIZE ) smpl_Time++; //Sincronización de periodo
        if ( smpl_Nmbr < FFT_SIZE ) smpl_Time--;

        OCR1A = smpl_Time;
        OCR1B = smpl_Time;
        TCNT1 = 0;

        smpl_Nmbr = 0;
        smpl_Flag = 1;                                // Nueva bandera de datos
    }
}

// Cargar Librería FFT para cada onda senoidal en 8-Bits //
#define mult_shf_s16x16( a, b)      \
({                                   \
    int prod, val1=a, val2=b; \
    __asm__ volatile ( \
        "muls %B1, %B2      \n\t" \
        "mov %B0, r0      \n\t" \
        "mul %A1, %A2      \n\t" \
        "mov %A0, r1      \n\t" \
        "mulsu %B1, %A2     \n\t" \
        "add %A0, r0      \n\t" \
        "adc %B0, r1      \n\t" \
        "mulsu %B2, %A1     \n\t" \
        "add %A0, r0      \n\t" \
        "adc %B0, r1      \n\t" \
        "clr r1            \n\t" \
        : "=&d" (prod) \
        : "a" (val1), "a" (val2) \
        ); \
    prod; \
})

static inline void mult_shf_I( int c, int s, int x, int y, int &u, int &v)
__attribute__((always_inline));
static inline void mult_shf_I( int c, int s, int x, int y, int &u, int &v)
{
    u = (mult_shf_s16x16(x, c) - mult_shf_s16x16(y, s));
    v = (mult_shf_s16x16(y, c) + mult_shf_s16x16(x, s));    // Hardcoded >>8 bits,
use with 8-bits Sinewave ONLY.
}

static inline void sum_dif_I(int a, int b, int &s, int &d)
__attribute__((always_inline));

```

```

static inline void sum_dif_I(int a, int b, int &s, int &d)
{
    s = (a+b);
    d = (a-b);
}

void rev_bin( int *fr, int fft_n)
{
    int m, mr, nn, l;
    int tr;

    mr = 0;
    nn = fft_n - 1;

    for (m=1; m<=nn; ++m) {
        l = fft_n;
        do {
            l >>= 1;
        } while (mr+l > nn);

        mr = (mr & (l-1)) + 1;

        if (mr <= m)
            continue;
        tr = fr[m];
        fr[m] = fr[mr];
        fr[mr] = tr;
    }
}

void fft8_dit_core_p1(int *fr, int *fi)
{
    int plus1a, plus2a, plus3a, plus4a, plus1b, plus2b;
    int mins1a, mins2a, mins3a, mins4a, mins1b, mins2b, mM1a, mM2a;

    sum_dif_I(fr[0], fr[1], plus1a, mins1a);
    sum_dif_I(fr[2], fr[3], plus2a, mins2a);
    sum_dif_I(fr[4], fr[5], plus3a, mins3a);
    sum_dif_I(fr[6], fr[7], plus4a, mins4a);

    sum_dif_I(plus1a, plus2a, plus1b, mins1b);
    sum_dif_I(plus3a, plus4a, plus2b, mins2b);

    sum_dif_I(plus1b, plus2b, fr[0], fr[4]);
    sum_dif_I(mins3a, mins4a, mM1a, mM2a);

    int prib1a, prib2a, prib3a, prib4a, prib1b, prib2b;
    int otnt1a, otnt2a, otnt3a, otnt4a, otnt1b, otnt2b, oT1a, oT2a;

    sum_dif_I(fi[0], fi[1], prib1a, otnt1a);
    sum_dif_I(fi[2], fi[3], prib2a, otnt2a);
    sum_dif_I(fi[4], fi[5], prib3a, otnt3a);
    sum_dif_I(fi[6], fi[7], prib4a, otnt4a);

    sum_dif_I(prib1a, prib2a, prib1b, otnt1b);
    sum_dif_I(prib3a, prib4a, prib2b, otnt2b);

    sum_dif_I(prib1b, prib2b, fi[0], fi[4]);
    sum_dif_I(otnt3a, otnt4a, oT1a, oT2a);

    mM2a = mult_shf_s16x16(mM2a, 181);
    sum_dif_I(mins1a, mM2a, plus1a, plus2a);

    prib2b = mult_shf_s16x16(oT1a, 181);
    sum_dif_I(otnt2a, prib2b, mins3a, plus3a);

    sum_dif_I(plus1a, mins3a, fr[7], fr[1]);
    sum_dif_I(mins1b, otnt2b, fr[6], fr[2]);

```

```

    sum_dif_I(plus2a, plus3a, fr[3], fr[5]);

    oT2a = mult_shf_s16x16(oT2a, 181);
    sum_dif_I( otnt1a, oT2a, plus1a, plus2a);

    plus2b = mult_shf_s16x16(mM1a, 181);
    sum_dif_I(-mins2a, plus2b, plus3a, mins3a);

    sum_dif_I(plus1a, mins3a, fi[7], fi[1]);
    sum_dif_I(otnt1b, -mins2b, fi[6], fi[2]);
    sum_dif_I(plus2a, plus3a, fi[3], fi[5]);
}

void fft_radix4_I( int *fr, int *fi, int ldn)
{
    const int n = (1UL<<ldn);
    int ldm = 0, rdx = 2;

    ldm = (ldn&1);
    if ( ldm!=0 )
    {
        for (int i0=0; i0<n; i0+=8)
        {
            fft8_dit_core_p1(fr+i0, fi+i0);
        }
    }
    else
    {
        for (int i0 = 0; i0 < n; i0 += 4)
        {
            int xr,yr,ur,vr, xi,yi,ui,vi;

            int i1 = i0 + 1;
            int i2 = i1 + 1;
            int i3 = i2 + 1;

            sum_dif_I(fr[i0], fr[i1], xr, ur);
            sum_dif_I(fr[i2], fr[i3], yr, vi);
            sum_dif_I(fi[i0], fi[i1], xi, ui);
            sum_dif_I(fi[i3], fi[i2], yi, vr);

            sum_dif_I(ui, vi, fi[i1], fi[i3]);
            sum_dif_I(xi, yi, fi[i0], fi[i2]);
            sum_dif_I(ur, vr, fr[i1], fr[i3]);
            sum_dif_I(xr, yr, fr[i0], fr[i2]);
        }
    }
    for (ldm += 2 * rdx; ldm <= ldn; ldm += rdx)
    {
        int m = (1UL<<ldm);
        int m4 = (m>>rdx);

        int phI0 = NWAVE / m;
        int phI = 0;

        for (int j = 0; j < m4; j++)
        {
            int c,s,c2,s2,c3,s3;

            s = pgm_read_word(&Sinewave[ phI]);
            s2 = pgm_read_word(&Sinewave[ 2*phI]);
            s3 = pgm_read_word(&Sinewave[ 3*phI]);

            c = pgm_read_word(&Sinewave[ phI + NWAVE/4]);
            c2 = pgm_read_word(&Sinewave[ 2*phI + NWAVE/4]);
            c3 = pgm_read_word(&Sinewave[ 3*phI + NWAVE/4]);

            for (int r = 0; r < n; r += m)

```

```

    {
        int i0 = j + r;
        int i1 = i0 + m4;
        int i2 = i1 + m4;
        int i3 = i2 + m4;

        int xr,yr,ur,vr, xi,yi,ui,vi;

        mult_shf_I( c2, s2, fr[i1], fi[i1], xr, xi);
        mult_shf_I( c, s, fr[i2], fi[i2], yr, vr);
        mult_shf_I( c3, s3, fr[i3], fi[i3], vi, yi);

        int t = yi - vr;
        yi += vr;
        vr = t;

        ur = fr[i0] - xr;
        xr += fr[i0];

        sum_dif_I(ur, vr, fr[i1], fr[i3]);

        t = yr - vi;
        yr += vi;
        vi = t;

        ui = fi[i0] - xi;
        xi += fi[i0];

        sum_dif_I(ui, vi, fi[i1], fi[i3]);
        sum_dif_I(xr, yr, fr[i0], fr[i2]);
        sum_dif_I(xi, yi, fi[i0], fi[i2]);
    }
    phI += phI0;
}
}

// Configuración de parámetros de inicialización //
void setup()
{
    Serial.begin(57600); //Configuración Serial.

    pinMode(A,OUTPUT); // Configuración de Pines de salida.
    pinMode(B,OUTPUT);
    pinMode(C,OUTPUT);
    pinMode(State,INPUT); // Configuración de Pin de entrada.

    // Configuración de puertos ADC //
    ADMUX = 0x40; // Inicializar con el PIN Analog. 0.
    ADCSRA = ((1<< ADEN) | // Activa el ADC en 1.
              (0<< ADSC) | // Inicia conversión ADC.
              (1<< ADIF) | // Configura auto disparo ADC = 1.
              (0<< ADIF) | // Bandera de interrupción del ADC.
              (0<< ADIE) | // Activa la interrupción ADC.
              (1<< ADPS2) | // ADPS2=ADPS1=ADPS0=1(prescale 128)
              (1<< ADPS1) | // Define la frecuencia de muestreo.
              (1<< ADPS0)); // Por defecto es 16Mhz/128=125kHz.

    // Establece la fuente de auto disparo del Timer/Counter1 Compare Match B //
    ADCSRB = ((1<< ADTS2) |
              (0<< ADTS1) |
              (1<< ADTS0));

    // Configura el muestreo ADC del TIMER 1 //
    TIMSK0 = 0x00;
    TIMSK1 = 0x00;
    TIMSK2 = 0x00;

```

```

TCCR1A = 0;
TCCR1B = 0;
TCCR1C = 0;

TCCR1A = ((1<<WGM11) | (1<<WGM10)); // Modo 15, Fast PWM
TCCR1B = ((1<<WGM13) | (1<<WGM12)); // Modo 15, Fast PWM
TCCR1B |= (1<<CS10); // Preescalar de clk/1

OCR1A = smpl_Time;
OCR1B = smpl_Time;

TCNT1 = 0;
TIFR1 |= (1<<OCF1B);
TIMSK1 |= (1<<OCIE1B);

EICRA |= (1<<ISC01); //Pin 2 (interrupción externa).
EICRA &= ~(1<<ISC00); // Falling edge del INT0.
EIMSK |= (1<<INT0);
}

// Bucle Principal //
void loop()
{
    int16_t temp;
    if ( smpl_Flag ) {
        for ( uint8_t i = 0; i < FFT_SIZE; i++){
            f_r[i] = x_r[i];
            f_i[i] = 0;
        }
        rev_bin( f_r, FFT_SIZE); // Calculo de la FFT de cada señal.
        fft_radix4_I( f_r, f_i, LOG_2_FFT);

        // Dimensionamiento de magnitudes para cada señal //
        for ( uint8_t i = 0, indx = 0; i < MIRROR; i += IND_STEP, indx++ ) {
            int16_t real = f_r[i] / NBINS;
            int16_t imag = f_i[i] / NBINS;
            temp = sqrt((long)real * real + (long)imag * imag);
            t_b[indx] += temp;
        }
        // Desplazamiento Offset ADC: Basado en la parte real (cos) BIN=0 -/- Madnitud
        DC //
        temp = f_r[0];
        if ( temp > 0)
            adc_Offst++;
        if ( temp < 0 )
            adc_Offst--;

        avrg_TmrF += cntr_TmrF; // Sumatoria para obtener exactitud.
        updt_Cntr++;
        if( updt_Cntr >= updt_Rate) {
            updt_Cntr = 0;
            float frequency = 0.0;
            float total_thd = 0.0;
            float Ampl_ac = 0.0;

            avrg_TmrF >>= 4;
            if ( avrg_TmrF != 0 )
                frequency = ( 8.0 * 16000000.0 ) / avrg_TmrF;
            avrg_TmrF = 0;

            uint32_t total1 = 0; // Todas las amplitudes armonicas.
            uint32_t total2 = 0; // todas Excepto la Fundamental.
            uint16_t fnd = 0; // Fundamental
            float V2=0; // Segundo Armónico.
            float V3=0; // Tercer Armónico.
            float V4=0; // Cuarto Armónico.
            float V5=0; // Quinto Armónico.
            float V6=0; // Sexto Armónico.

```

```

float V7=0; // Séptimo Armónico.

for ( int i = 1; i < NBINS; i++ ) {
    int st1 = (i * 10) + 15; // k=70/(NBINS-1)
    uint32_t vremn1 = t_b[i]>>4; // V(i)/updt_Rate
    uint32_t vremn2 = vremn1 * vremn1; // V(i)^2
    total1 += vremn2; // V1^2+V2^2+V3^2+V4^2+V5^2+V6^2+V7^2
    if ( i != 1 )
        total2 += vremn2; // V2^2+V3^2+V4^2+V5^2+V6^2+V7^2
    else
        fnd = vremn1; // Fundamental = V1

    if(i==2) V2=vremn1;
    if(i==3) V3=vremn1;
    if(i==4) V4=vremn1;
    if(i==5) V5=vremn1;
    if(i==6) V6=vremn1;
    if(i==7) V7=vremn1;

    t_b[i] = 0;
}

Ampl_ac = sqrt( total1 ); // Amplitud AC total.

// Acondicionamiento de señales de Voltaje //
if ((num_of_chann==0)|| (num_of_chann==2)|| (num_of_chann==4)){
    Ampl_ac = Ampl_ac/30.563917;
    V2 = V2/30.563917;
    V3 = V3/30.563917;
    V4 = V4/30.563917;
    V5 = V5/30.563917;
    V6 = V6/30.563917;
    V7 = V7/30.563917;
}
// Acondicionamiento de señales de corriente //
else{
    Ampl_ac = Ampl_ac/ 10.81908;
    V2 = V2/ 10.81908;
    V3 = V3/ 10.81908;
    V4 = V4/ 10.81908;
    V5 = V5/9 10.81908;
    V6 = V6/ 10.81908;
    V7 = V7/ 10.81908;
}

total_thd = 100.0 * sqrt(total2) / fnd; // Cálculo de THD para cada señal

// constantes de calibración corriente A
if(num_of_chann == 1){
    Ampl_ac = Ampl_ac/1.165889;
    V2 = V2/7.3091;
    V3 = V3/3.0329;
    V4 = V4/5.7477;
    V5 = V5/1.8566;
    V6 = V6/2.2614;
    V7 = V7/0.2917;
    total_thd = (total_thd/3.45887)*3.62362908;
}
// constantes de calibración Voltaje B
else if (num_of_chann == 2){
    Ampl_ac = Ampl_ac/1.11304;
    V2 = V2/7.3091;
    V3 = V3/3.0329;
    V4 = V4/5.7477;
    V5 = V5/1.8566;
    V6 = V6/2.2614;
    V7 = V7/0.2917;
    total_thd = (total_thd/3.45887)*0.39265719;
}

```

```

    }
    // constantes de calibración corriente B
    else if (num_of_chann == 3){
        Ampl_ac = Ampl_ac/1.184404;
        V2 = V2/7.3091;
        V3 = V3/3.0329;
        V4 = V4/5.7477;
        V5 = V5/1.8566;
        V6 = V6/2.2614;
        V7 = V7/0.2917;
        total_thd = (total_thd/3.45887)*4.554265527;
    }
    // constantes de calibración Voltaje C
    else if (num_of_chann == 4){
        Ampl_ac = Ampl_ac/1.10335;
        V2 = V2/7.3091;
        V3 = V3/3.0329;
        V4 = V4/5.7477;
        V5 = V5/1.8566;
        V6 = V6/2.2614;
        V7 = V7/0.2917;
        total_thd = (total_thd/3.45887)*0.409862199;
    }
    // constantes de calibración corriente C
    else if (num_of_chann == 5){
        Ampl_ac = Ampl_ac/1.13497;
        V2 = V2/7.3091;
        V3 = V3/3.0329;
        V4 = V4/5.7477;
        V5 = V5/1.8566;
        V6 = V6/2.2614;
        V7 = V7/0.2917;
        total_thd = (total_thd/3.45887)*3.00258285;
    }
    // constantes de calibración Voltaje A
    else{
        Ampl_ac = Ampl_ac/1.052957;
        V2 = V2/7.3091;
        V3 = V3/3.0329;
        V4 = V4/5.7477;
        V5 = V5/1.8566;
        V6 = V6/2.2614;
        V7 = V7/0.2917;
        total_thd = (total_thd/3.45887)*0.37057854;
    }

    // Transmisión Serial de variables de fre, armón y THD para cada señal //
    int rx=0;
    rx = digitalRead(State);
    if(rx==HIGH){

        if(num_of_chann == 1){
            Serial.print("CH1");
        }
        else if (num_of_chann == 2){
            Serial.print("CH2");
        }
        else if (num_of_chann == 3){
            Serial.print("CH3");
        }
        else if (num_of_chann == 4){
            Serial.print("CH4");
        }
        else if (num_of_chann == 5){
            Serial.print("CH5");
        }
        else{
            Serial.print("CH0");
        }
    }

```

```

}

Serial.print(":");
if ( frequency < 100 ){
    Serial.print(frequency, 2);
}
else{
    Serial.print(frequency, 1);
}

Serial.print(":");
if ( Ampl_ac < 100 ){
    Serial.print(Ampl_ac, 3);
}
else{
    Serial.print(Ampl_ac, 2);
}

Serial.print(":");
if ( V2 < 10 ){
    Serial.print(V2, 2);
}
else{
    Serial.print(V2, 1);
}

Serial.print(":");
if ( V3 < 10 ){
    Serial.print(V3, 2);
}
else{
    Serial.print(V3, 1);
}

Serial.print(":");
if ( V4 < 10 ){
    Serial.print(V4, 2);
}
else{
    Serial.print(V4, 1);
}

Serial.print(":");
if ( V5 < 10 ){
    Serial.print(V5, 2);
}
else{
    Serial.print(V5, 1);
}

Serial.print(":");
if ( V6 < 10 ){
    Serial.print(V6, 2);
}
else{
    Serial.print(V6, 1);
}

Serial.print(":");
if ( V7 < 10 ){
    Serial.print(V7, 2);
}
else{
    Serial.print(V7, 1);
}

Serial.print(":");
if ( total_thd < 10 ){

```

```

        Serial.print(total_thd, 3);
    }
    else{
        Serial.print(total_thd, 2);
    }
}

// Cambio de canal 0->1->2->3->4->5->0
if(num_of_chann >= 5){
    num_of_chann = 0;
}
else{
    num_of_chann++;
}
}
smpl_Flag = 0;
}
}

```

ANEXO C

PROGRAMACIÓN DE LA TARJETA ARDUINO MEGA 2560

```

/*****
This program was produced by the
ARDUINO V 1.0.5
© Copyright 2014 project Byron Ganazhapa
All Rights Reserved.

```

```

Project : Algoritmo para el cálculo de parámetros de calidad de energía
Version : 1.0
Date : 01/03/2014
Author : Byron Ganazhapa
Company : UTPL
Comments: Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining
a copy of this software to deal in the Software without restriction,
including without limitation the rights to use, copy, modify, merge,
publish, distribute copies of the Software, and to permit persons to
whom the Software is furnished to do so, subject to the following
conditions:
* The above copyright notice and this permission notice shall be
included in all copies or substantial portions of the Software.
* THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND,
EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF
MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT.

```

```

*****/

```

```

#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include <EthernetClient.h>
#include <EthernetServer.h>
#include <EthernetUdp.h>

```

```

/* Escribir una dirección MAC y la dirección IP para el controlador.
La dirección IP será dependiente de la red local: */

```

```

byte mac[]={0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED};
IPAddress ip(192,168,11,1);
IPAddress subnet(255,255,255,0);

```

```

/* Inicializar la librería de servidor Ethernet
Con la dirección IP y el puerto que desee utilizar
(Puerto 80 es el puerto predeterminado para HTTP) */
EthernetServer server(80);
char ARD[52];

```

```

/* Pines de entrada analógico de 0 al 5 */
const int Sen_pin_0 = 0;
const int Sen_pin_1 = 1;
const int Sen_pin_2 = 2;
const int Sen_pin_3 = 3;
const int Sen_pin_4 = 4;
const int Sen_pin_5 = 5;

```

```

/* Variables para capturar el valor desde el sensor */
volatile float analog_input_0 = 0.0;
volatile float analog_input_1 = 0.0;
volatile float analog_input_2 = 0.0;
volatile float analog_input_3 = 0.0;
volatile float analog_input_4 = 0.0;
volatile float analog_input_5 = 0.0;

```

```

/* Numero de muestras a adquirir */
// 16000000/128/13= 9615 muestras/s; 9615/60Hz = 160,25 muestras por onda
completa
const int N_samples = 1923; //160 muestras por cada onda completa para un total
de 12 ciclos

```

```

/* Variables de voltajes y corrientes reales de los sensores */
float Sen_Volt_1 = 0.0;
float Sen_Corr_1 = 0.0;
float Sen_Volt_2 = 0.0;

```

```

float Sen_Corr_2 = 0.0;
float Sen_Volt_3 = 0.0;
float Sen_Corr_3 = 0.0;

/* Variables de voltajes y corrientes instantáneos del sistema AC */
float Inst_Volt_1 = 0.0;
float Inst_Corr_1 = 0.0;
float Inst_Volt_2 = 0.0;
float Inst_Corr_2 = 0.0;
float Inst_Volt_3 = 0.0;
float Inst_Corr_3 = 0.0;

/* Variables de Volt. y Corr. cuadradas */
float Squared_Volt_1 = 0.0;
float Squared_Corr_1 = 0.0;
float Squared_Volt_2 = 0.0;
float Squared_Corr_2 = 0.0;
float Squared_Volt_3 = 0.0;
float Squared_Corr_3 = 0.0;

/* Variables de Volt. y corr. cuadráticas promedias */
float Mean_squared_Volt_1 = 0.0;
float Mean_squared_Corr_1 = 0.0;
float Mean_squared_Volt_2 = 0.0;
float Mean_squared_Corr_2 = 0.0;
float Mean_squared_Volt_3 = 0.0;
float Mean_squared_Corr_3 = 0.0;

/* Variables de volt. y Corr. RMS */
float V_rms_1 = 0.0;
float C_rms_1 = 0.0;
float V_rms_2 = 0.0;
float C_rms_2 = 0.0;
float V_rms_3 = 0.0;
float C_rms_3 = 0.0;

/* Variables de Potencias instantáneas */
float Inst_Power_1 = 0.0;
float Inst_Power_2 = 0.0;
float Inst_Power_3 = 0.0;

/* Variables de Potencias reales */
float Real_Power_1 = 0.0;
float Real_Power_2 = 0.0;
float Real_Power_3 = 0.0;

/* Variables de potencias Aparentes */
float Apparent_Power_1 = 0.0;
float Apparent_Power_2 = 0.0;
float Apparent_Power_3 = 0.0;

/* Variables de potencias Reactiva */
float Reactive_Power_1 = 0.0;
float Reactive_Power_2 = 0.0;
float Reactive_Power_3 = 0.0;

/* Variables de Factores de Potencia */
float Power_Factor_1 = 0.0;
float Power_Factor_2 = 0.0;
float Power_Factor_3 = 0.0;

/* Configuración de parámetros de inicialización */
void setup() {
    Serial.begin(57600);          //Configuración Serial.
    /* Inicia la conexión y el servidor: */
    Ethernet.begin(mac, ip, subnet);
    server.begin();

```

```

}

/* Bucle Principal */
void loop(){

    /* Detectar los clientes entrantes */
    EthernetClient client = server.available();
    if(client){
        /*Una petición HTTP termina con una línea en blanco */
        boolean currentLineIsBlank = true;
        while(client.connected()){
            if(client.available()){
                char c = client.read();
                /* Si se ha llegado al final de la línea (recibirá una nueva línea
                con un carácter en blanco, la petición HTTP ha terminado.
                Para que pueda enviar una respuesta */
                if(c == '\n' && currentLineIsBlank){

/* Variables de Volt. y Corr. cuadráticas sumadas */
                float Sum_squared_Volt_1 = 0.0;
                float Sum_squared_Corr_1 = 0.0;
                float Sum_squared_Volt_2 = 0.0;
                float Sum_squared_Corr_2 = 0.0;
                float Sum_squared_Volt_3 = 0.0;
                float Sum_squared_Corr_3 = 0.0;

                /* Variables de sumatoria de potencias instantáneas */
                float Sum_inst_Power_1 = 0.0;
                float Sum_inst_Power_2 = 0.0;
                float Sum_inst_Power_3 = 0.0;

                for (int i=0;i<N_samples;i++){
                    analog_input_0 = analogRead(Sen_pin_0);
                    analog_input_1 = analogRead(Sen_pin_1);
                    analog_input_2 = analogRead(Sen_pin_2);
                    analog_input_3 = analogRead(Sen_pin_3);
                    analog_input_4 = analogRead(Sen_pin_4);
                    analog_input_5 = analogRead(Sen_pin_5);

                    Sen_Volt_1 = analog_input_0 * (5.0/1023.0);
                    Sen_Corr_1 = analog_input_1 * (5.0/1023.0);
                    Sen_Volt_2 = analog_input_2 * (5.0/1023.0);
                    Sen_Corr_2 = analog_input_3 * (5.0/1023.0);
                    Sen_Volt_3 = analog_input_4 * (5.0/1023.0);
                    Sen_Corr_3 = analog_input_5 * (5.0/1023.0);

                    Inst_Volt_1 = (Sen_Volt_1 - 2.5) * 75.55555;    // ((83.6+9.9)/9.9)*8 =
75.55555
                    Inst_Corr_1 = (Sen_Corr_1 - 2.5) * 213.11475;  // 2600/11.5 =
226.28372; Resis1=11.5 ≈ 12.2; 2600 constante de acoplo del sensor de corriente
                    Inst_Volt_2 = (Sen_Volt_2 - 2.5) * 75.55555;
                    Inst_Corr_2 = (Sen_Corr_2 - 2.5) * 213.11475;  // Resis2=11.5 ≈ 12.35
                    Inst_Volt_3 = (Sen_Volt_3 - 2.5) * 75.55555;
                    Inst_Corr_3 = (Sen_Corr_3 - 2.5) * 213.11475;  // Resis3=11.5 ≈ 12.45

                    // Constantes de calibración.
                    Inst_Volt_1 = Inst_Volt_1/1.018206;    // 1.011664
                    Inst_Corr_1 = Inst_Corr_1/1.076190;    // 1.121847
                    Inst_Volt_2 = Inst_Volt_2/1.019842;    //1.017357
                    Inst_Corr_2 = Inst_Corr_2/1.099696;    //1.070320
                    Inst_Volt_3 = Inst_Volt_3/1.026304;    //1.018897
                    Inst_Corr_3 = Inst_Corr_3/1.100690;    //1.090360

                    Squared_Volt_1 = Inst_Volt_1 * Inst_Volt_1;
                    Squared_Corr_1 = Inst_Corr_1 * Inst_Corr_1;
                    Squared_Volt_2 = Inst_Volt_2 * Inst_Volt_2;
                    Squared_Corr_2 = Inst_Corr_2 * Inst_Corr_2;

```

```

Squared_Volt_3 = Inst_Volt_3 * Inst_Volt_3;
Squared_Corr_3 = Inst_Corr_3 * Inst_Corr_3;

Sum_squared_Volt_1 += Squared_Volt_1;
Sum_squared_Corr_1 += Squared_Corr_1;
Sum_squared_Volt_2 += Squared_Volt_2;
Sum_squared_Corr_2 += Squared_Corr_2;
Sum_squared_Volt_3 += Squared_Volt_3;
Sum_squared_Corr_3 += Squared_Corr_3;

Inst_Power_1 = Inst_Volt_1 * Inst_Corr_1;
Inst_Power_2 = Inst_Volt_2 * Inst_Corr_2;
Inst_Power_3 = Inst_Volt_3 * Inst_Corr_3;

Sum_inst_Power_1 += Inst_Power_1;
Sum_inst_Power_2 += Inst_Power_2;
Sum_inst_Power_3 += Inst_Power_3;

V_rms_1 = 0.0;
C_rms_1 = 0.0;
V_rms_2 = 0.0;
C_rms_2 = 0.0;
V_rms_3 = 0.0;
C_rms_3 = 0.0;

Real_Power_1 = 0.0;
Real_Power_2 = 0.0;
Real_Power_3 = 0.0;

Apparent_Power_1 = 0.0;
Apparent_Power_2 = 0.0;
Apparent_Power_3 = 0.0;

Reactive_Power_1 = 0.0;
Reactive_Power_2 = 0.0;
Reactive_Power_3 = 0.0;
}

Mean_squared_Volt_1 = Sum_squared_Volt_1 / N_samples;
Mean_squared_Corr_1 = Sum_squared_Corr_1 / N_samples;
Mean_squared_Volt_2 = Sum_squared_Volt_2 / N_samples;
Mean_squared_Corr_2 = Sum_squared_Corr_2 / N_samples;
Mean_squared_Volt_3 = Sum_squared_Volt_3 / N_samples;
Mean_squared_Corr_3 = Sum_squared_Corr_3 / N_samples;

V_rms_1 = sqrt(Mean_squared_Volt_1);
C_rms_1 = sqrt(Mean_squared_Corr_1);
V_rms_2 = sqrt(Mean_squared_Volt_2);
C_rms_2 = sqrt(Mean_squared_Corr_2);
V_rms_3 = sqrt(Mean_squared_Volt_3);
C_rms_3 = sqrt(Mean_squared_Corr_3);

Real_Power_1 = Sum_inst_Power_1 / N_samples;
Real_Power_2 = Sum_inst_Power_2 / N_samples;
Real_Power_3 = Sum_inst_Power_3 / N_samples;

Apparent_Power_1 = V_rms_1 * C_rms_1;
Apparent_Power_2 = V_rms_2 * C_rms_2;
Apparent_Power_3 = V_rms_3 * C_rms_3;

Reactive_Power_1 = (Apparent_Power_1*Apparent_Power_1) -
(Real_Power_1*Real_Power_1);
Reactive_Power_2 = (Apparent_Power_2*Apparent_Power_2) -
(Real_Power_2*Real_Power_2);
Reactive_Power_3 = (Apparent_Power_3*Apparent_Power_3) -
(Real_Power_3*Real_Power_3);
Reactive_Power_1 = sqrt(Reactive_Power_1);
Reactive_Power_2 = sqrt(Reactive_Power_2);

```

```

Reactive_Power_3 = sqrt(Reactive_Power_3);

Power_Factor_1 = Real_Power_1 / Apparent_Power_1;
Power_Factor_2 = Real_Power_2 / Apparent_Power_2;
Power_Factor_3 = Real_Power_3 / Apparent_Power_3;

Sum_squared_Volt_1=0.0;
Sum_squared_Corr_1=0.0;
Sum_squared_Volt_2=0.0;
Sum_squared_Corr_2=0.0;
Sum_squared_Volt_3=0.0;
Sum_squared_Corr_3=0.0;

Sum_inst_Power_1=0.0;
Sum_inst_Power_2=0.0;
Sum_inst_Power_3=0.0;

/* Transmisión de datos mediante comunicación Ethernet */
/* Transmisión en código HTML por Protocolo HTTP */
//client.println("HTTP/1.1 200 OK");
//client.println("Content-Type: text/html");
client.println("<html>");
client.println("<h2> <p align=center>VARIABLES DE CALIDAD DE ENERGIA</p>
</h2>"); //<h2> y </h2> colocar negrita al texto
client.println("</p>");
//Añadir una etiqueta para conseguir que el navegador se actualice cada 1
seg.
client.println("<meta http-equiv=\"refresh\" content=\"1.0\">");

client.print("<font face=courier>"); // Estilo de letra

client.print("Voltaje rms A:");
client.print(V_rms_1);
client.print("&nbsp;"); // crear espacios en la línea
client.print("Corriente rms A:");
client.print(C_rms_1);
client.println("<br/>"); //Saltar de linea
client.print("Potencia Real A:");
client.print(Real_Power_1/1000);
client.print("&nbsp; ");
client.print("Potencia Aparente A:");
client.print(Apparent_Power_1/1000);
client.print("&nbsp; ");
client.print("Potencia Reactiva A:");
client.print(Reactive_Power_1/1000);
client.println("<br/>"); //Saltar de línea
client.print("Factor de Potencia A:");
client.print(Power_Factor_1);
client.println("<br/>");
client.println("<br/>");

client.print("Voltaje rms B:");
client.print(V_rms_2);
client.print("&nbsp;");
client.print("Corriente rms B:");
client.print(C_rms_2);
client.println("<br/>");
client.print("Potencia Real B:");
client.print(Real_Power_2/1000);
client.print("&nbsp; ");
client.print("Potencia Aparente B:");
client.print(Apparent_Power_2/1000);
client.print("&nbsp; ");
client.print("Potencia Reactiva B:");
client.print(Reactive_Power_2/1000);
client.println("<br/>");

```

```

client.print("Factor de Potencia B:");
client.print(Power_Factor_2);
client.println("<br/>");
client.println("<br/>");

client.print("Voltaje rms C:");
client.print(V_rms_3);
client.print("&nbsp;");
client.print("Voltaje rms C:");
client.print(C_rms_3);
client.println("<br/>");
client.print("Potencia Real C:");
client.print(Real_Power_3/1000);
client.print("&nbsp; ");
client.print("Potencia Aparente C:");
client.print(Apparent_Power_3/1000);
client.print("&nbsp; ");
client.print("Potencia Reactiva C:");
client.print(Reactive_Power_3/1000);
client.println("<br/>");
client.print("Factor de Potencia C:");
client.print(Power_Factor_3);
client.println("<br/>");
client.println("<br/>");

/* Leer Puerto Serial del Arduino UNO para la recepción de la trama */
if (Serial.available()){
    for(int i=0;i<=51;i++){
        char input_data = Serial.read();
        ARD[i]=input_data;
    }
}

client.print("Distorsión Armónica");
client.println("<br/>");
client.print(ARD);

client.println("<br/>");
client.println("</code>");

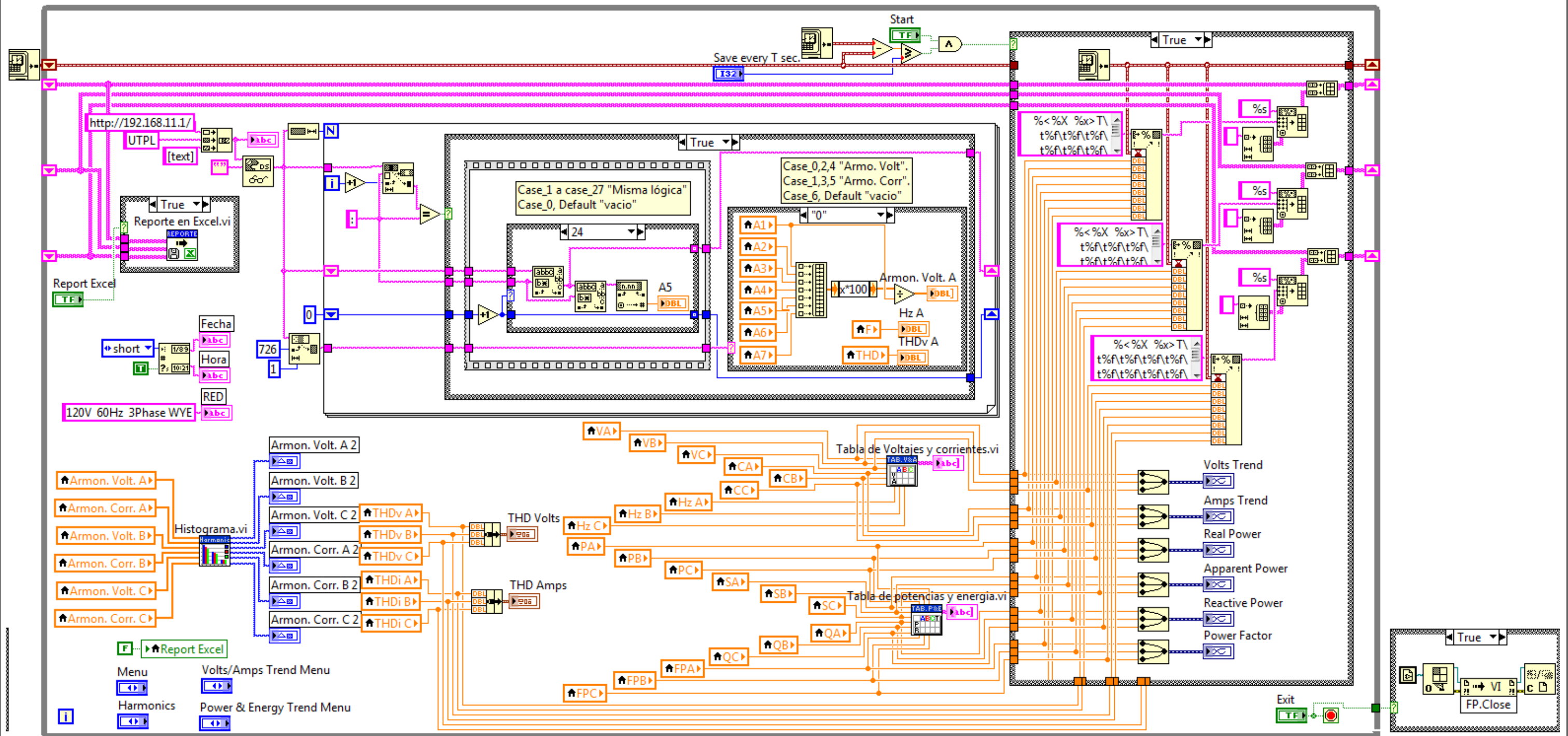
client.print("</FONT>");
client.println("</html>");
break;

}
if(c=='\n'){
    /* se inicia una nueva línea */
    currentLineIsBlank = true;
}
else if(c!='\r'){
    /* ha llegado un caracter en la línea actual */
    currentLineIsBlank = false;
}
}
}
/* Facilita al navegador web un tiempo para recibir los datos
Cierra la conexión */
client.stop();
}
}

```

ANEXO D

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MONITOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LABVIEW



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA



PROYECTO:
"DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MONITOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA"

FECHA:
ABRIL/2014

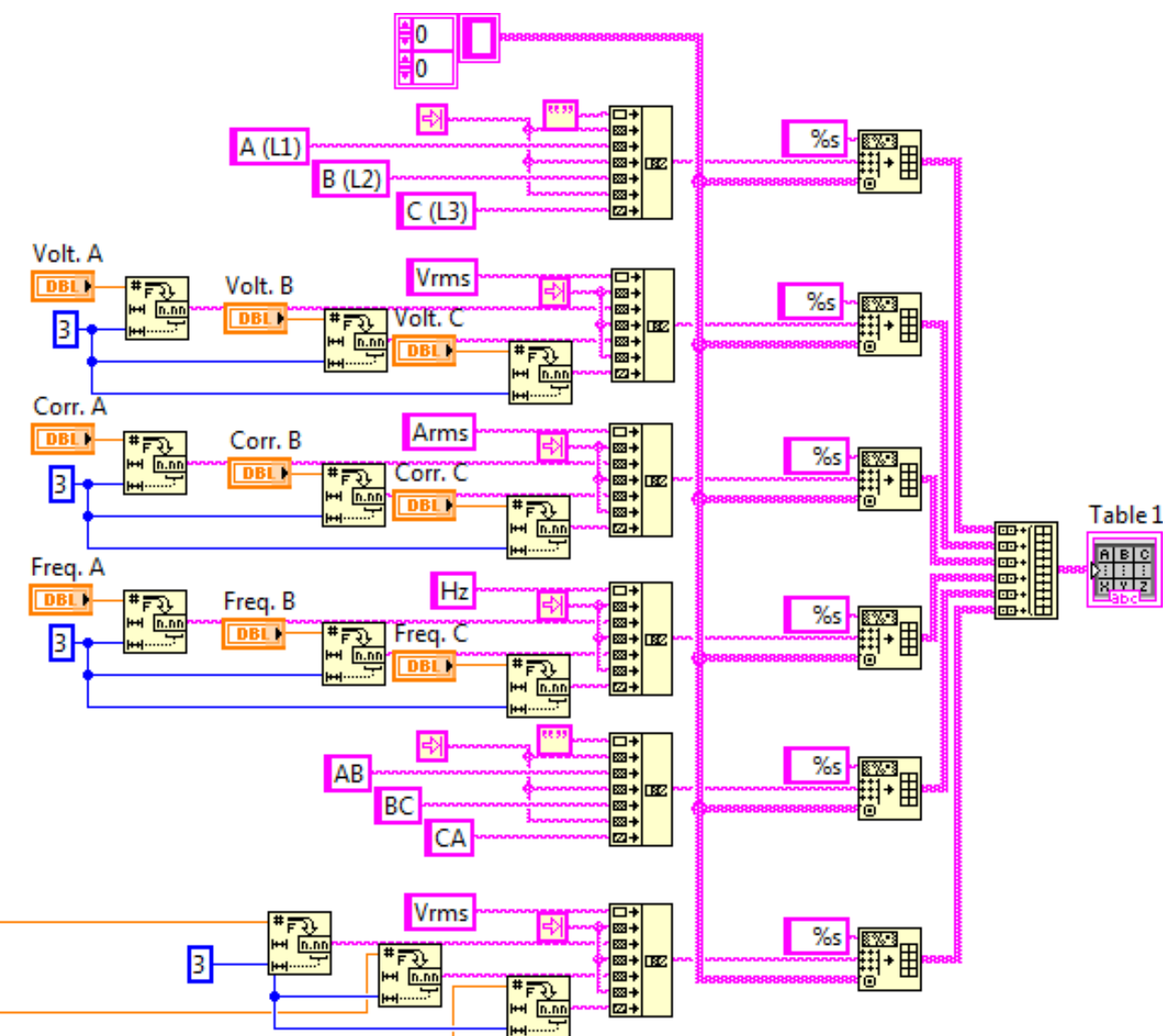
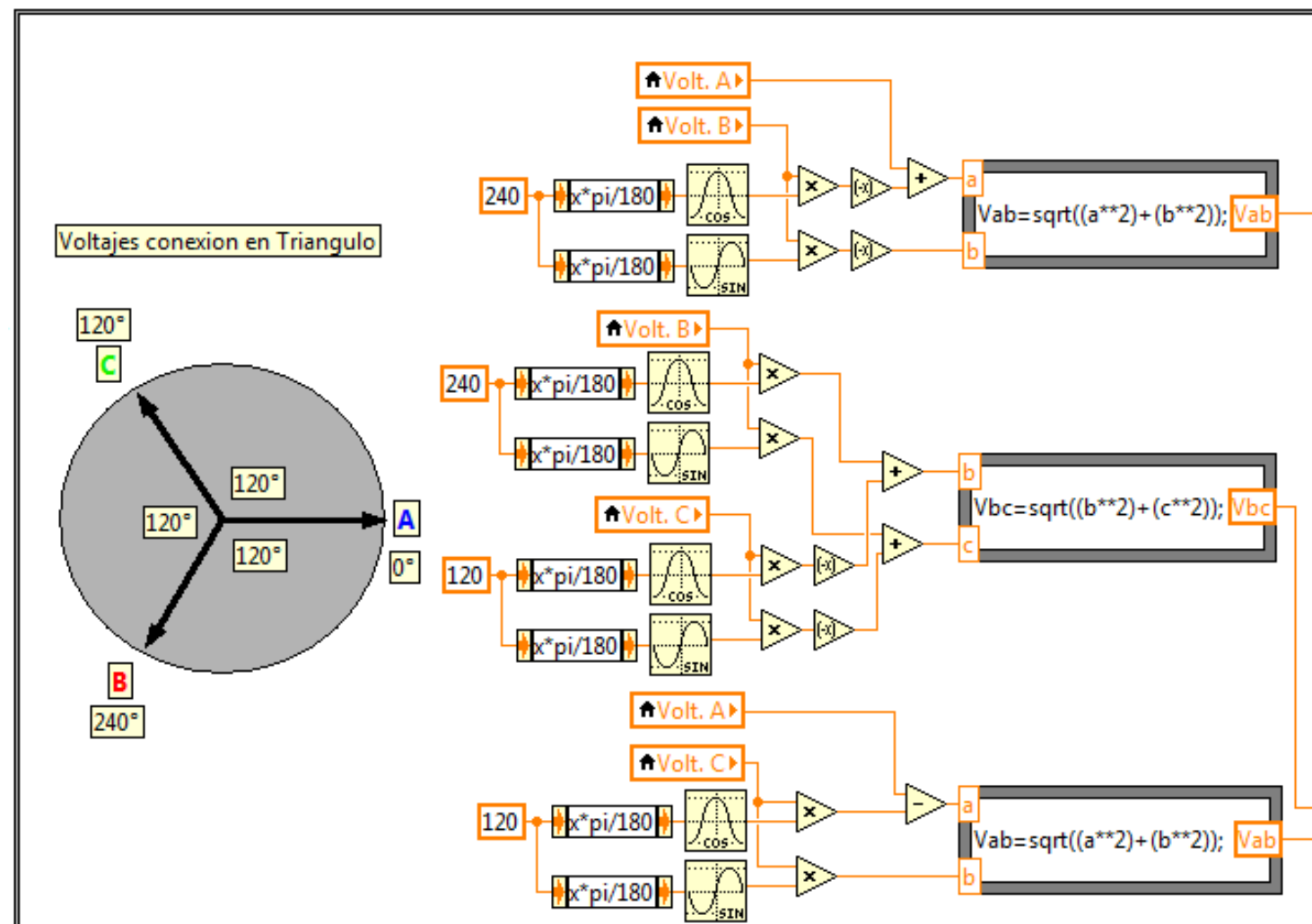
CONTIENE:
DIAGRAMA DE BLOQUES

DISEÑO:
BYRON GANAZHAPA
JIMÉNEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO:
ING. CARLOS CALDERÓN

ESCALA:

1/6



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA



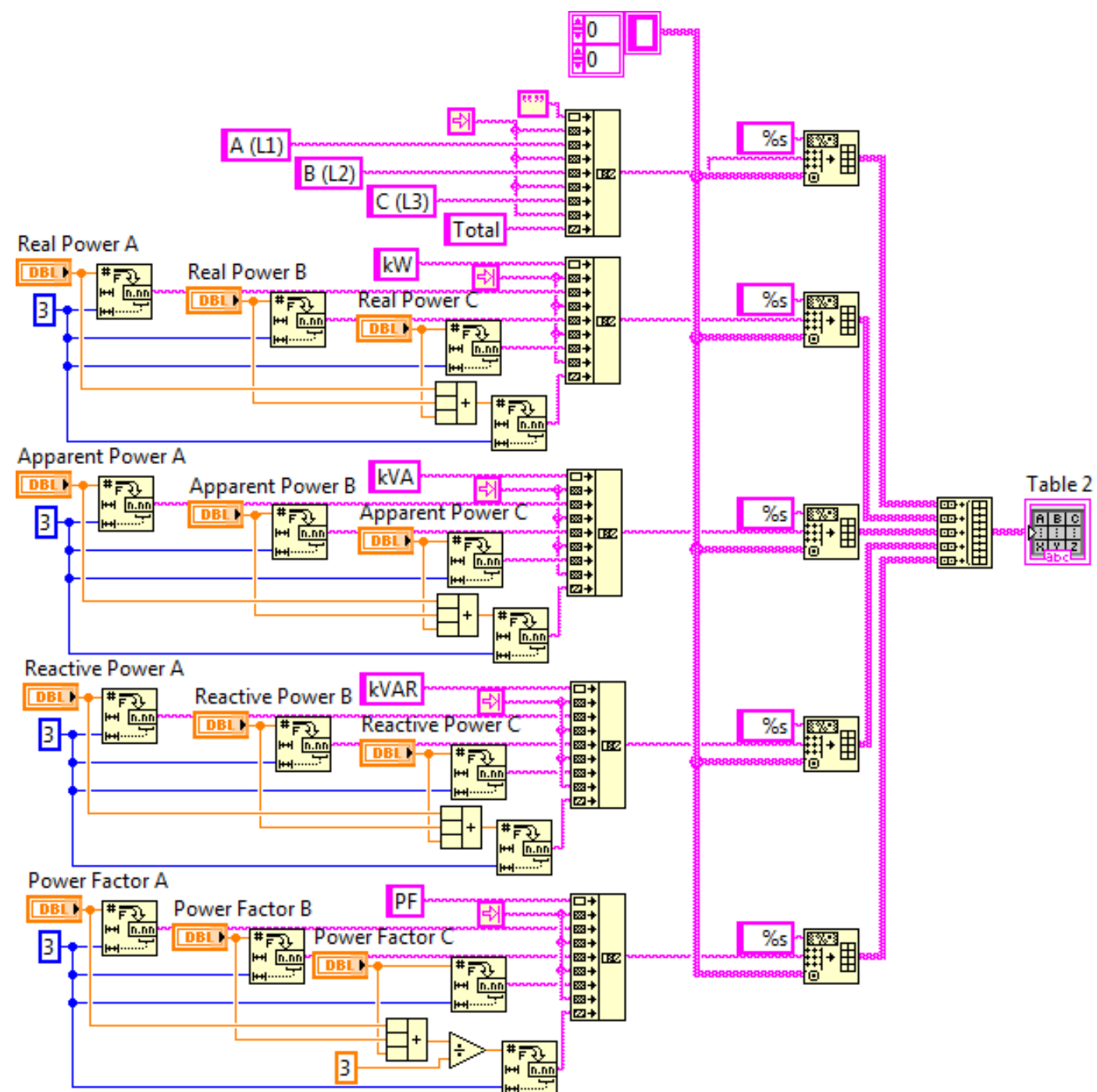
PROYECTO:
"DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MONITOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA"

FECHA:
ABRIL/2014
ESCALA:

CONTIENE:
DIAGRAMA DE BLOQUES DEL
SubVI TABLA DE VOLTAJES Y
CORRIENTES

DISEÑO:
BYRON GANAZHAPA
JIMÉNEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO:
ING. CARLOS CALDERÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA



PROYECTO:
"DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MONITOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA"

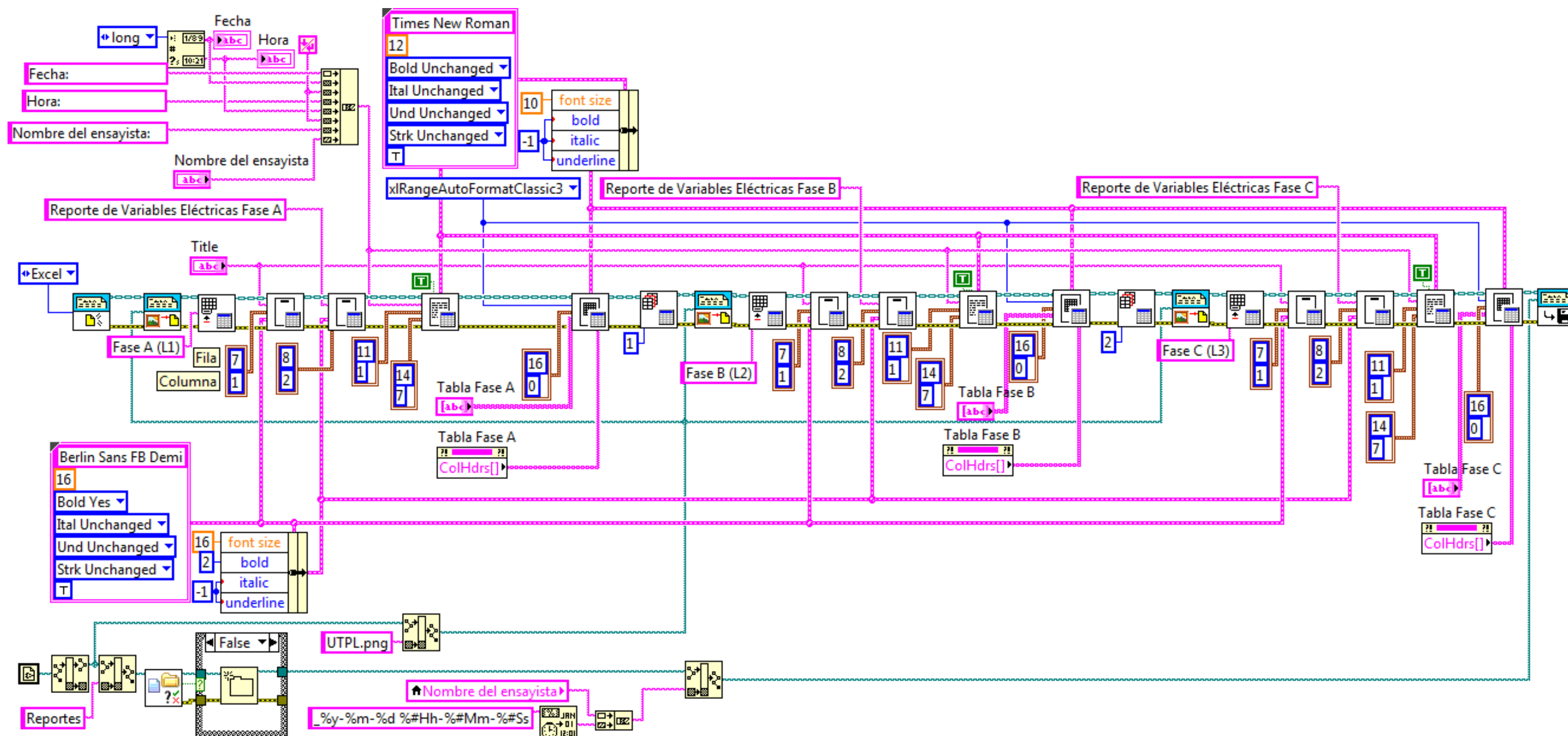
FECHA:
ABRIL/2014
ESCALA:

CONTIENE:
DIAGRAMA DE BLOQUES DEL
SubVI TABLA DE POTENCIAS Y
ENERGÍA

DISEÑO:
BYRON GANAZHAPA
JIMÉNEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO:
ING. CARLOS CALDERÓN

3/6



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA



PROYECTO:
"DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MONITOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA"

FECHA:
ABRIL/2014

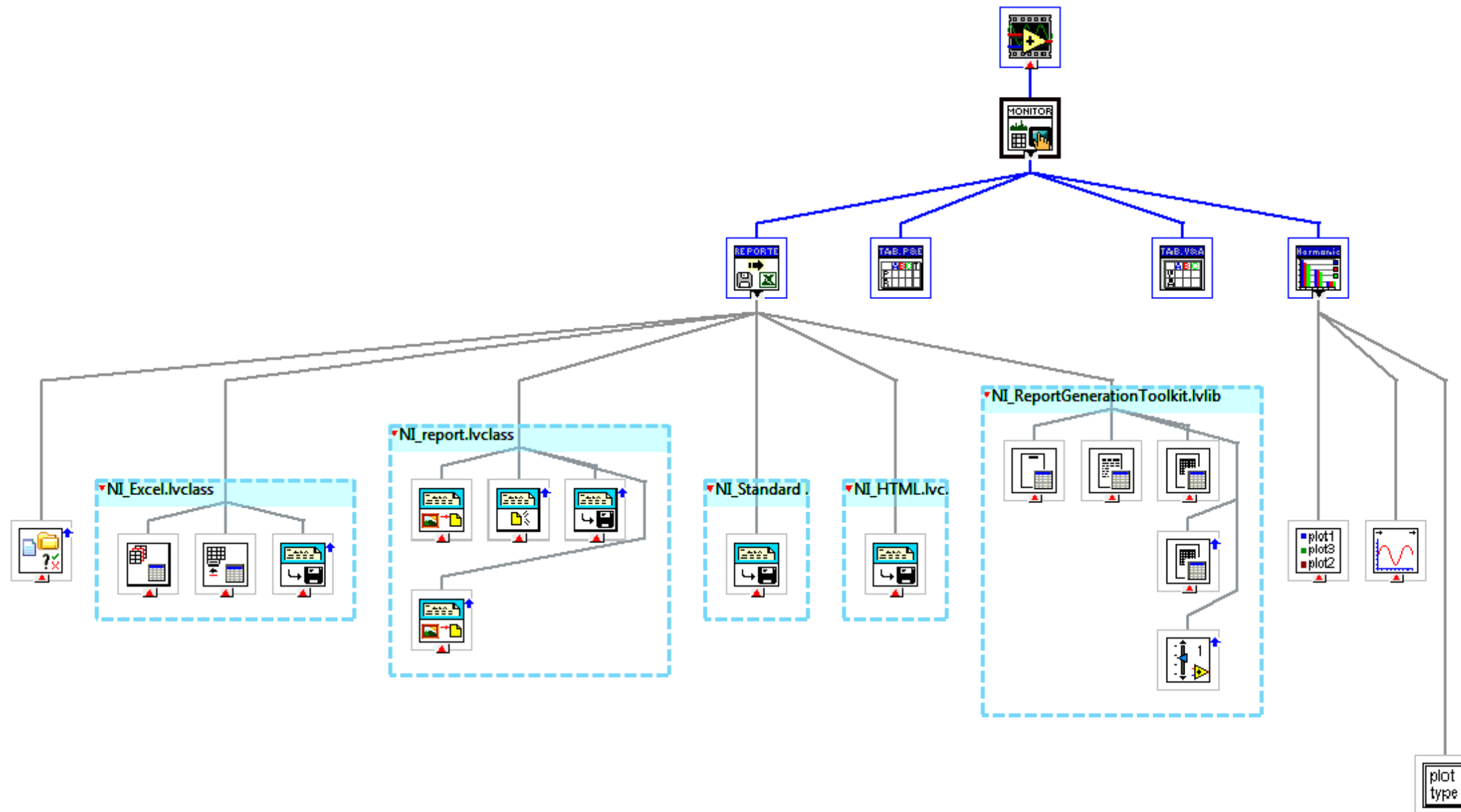
ESCALA:

CONTIENE:
DIAGRAMA DE BLOQUES DEL
SubVI REPORTE EN EXCEL

DISEÑO:
BYRON GANAZHAPA
JIMÉNEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO:
ING. CARLOS CALDERÓN

5/6



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA



PROYECTO:

“DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MONITOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA”

FECHA:
ABRIL/2014

ESCALA:

CONTIENE:

DIAGRAMA JERÁRQUICO DEL
MONITOR CALIDAD DE ENERGÍA

DISEÑO:

BYRON GANAZHAPA
JIMÉNEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO:

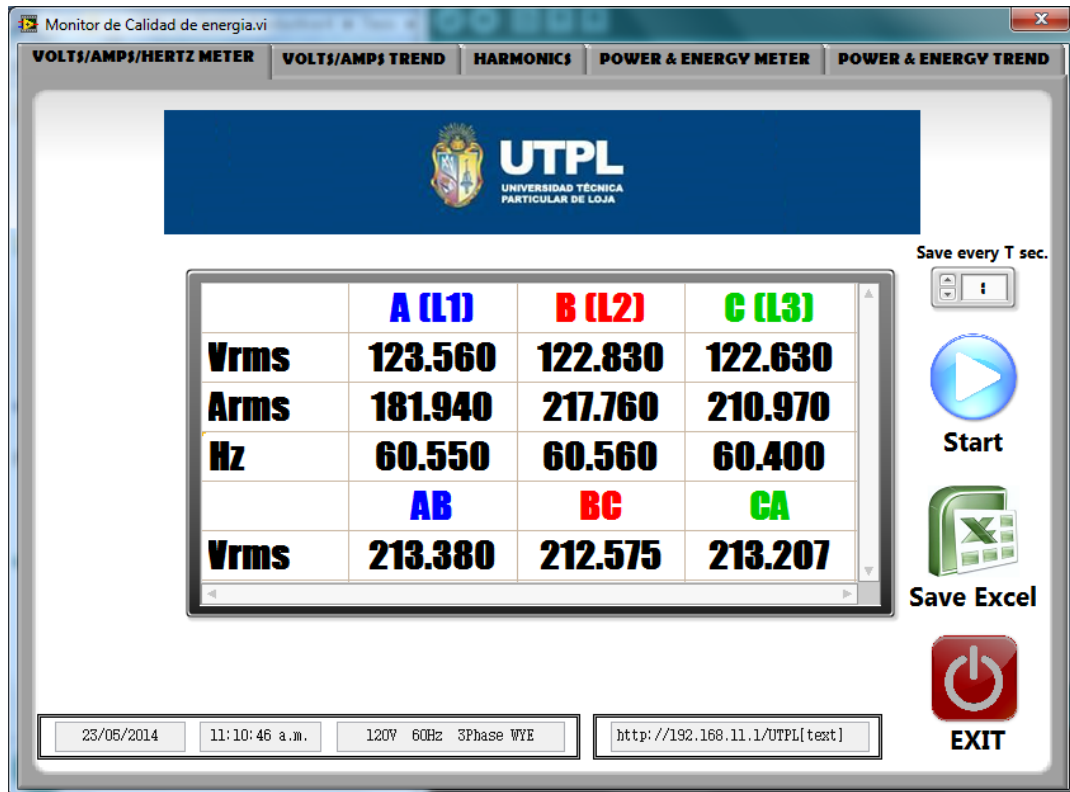
ING. CARLOS CALDERÓN

6/6

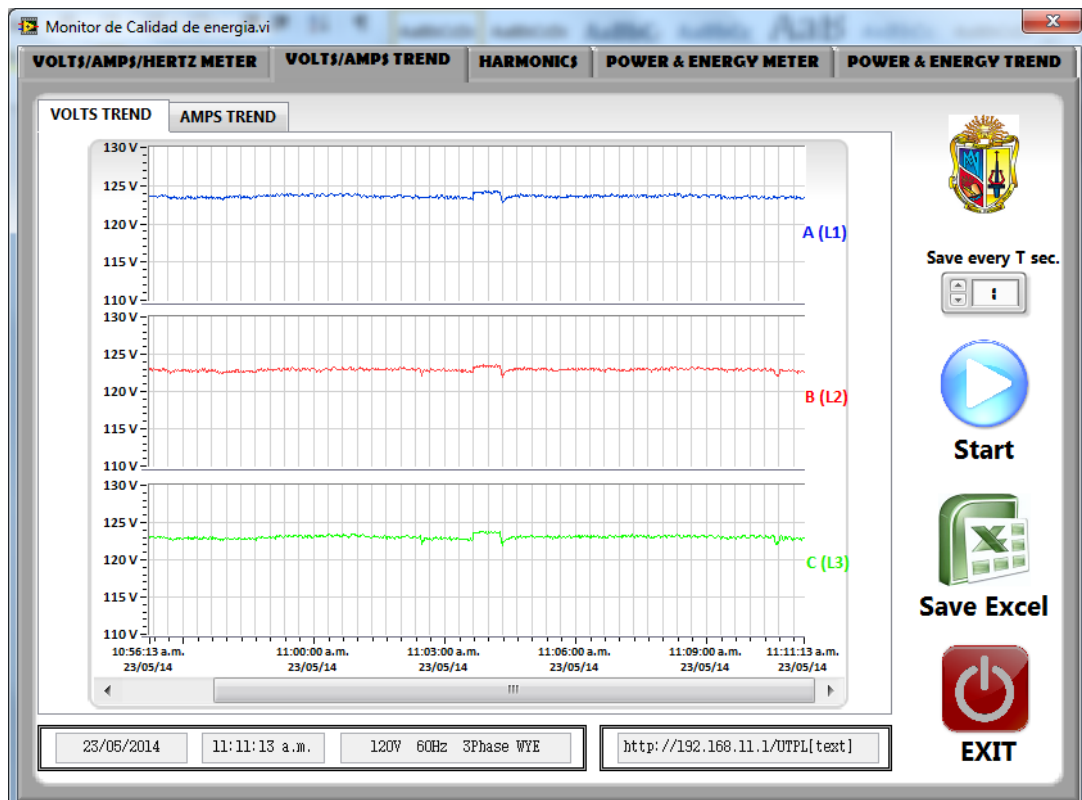
ANEXO E

INTERFAZ DE USUARIO DEL MONITOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

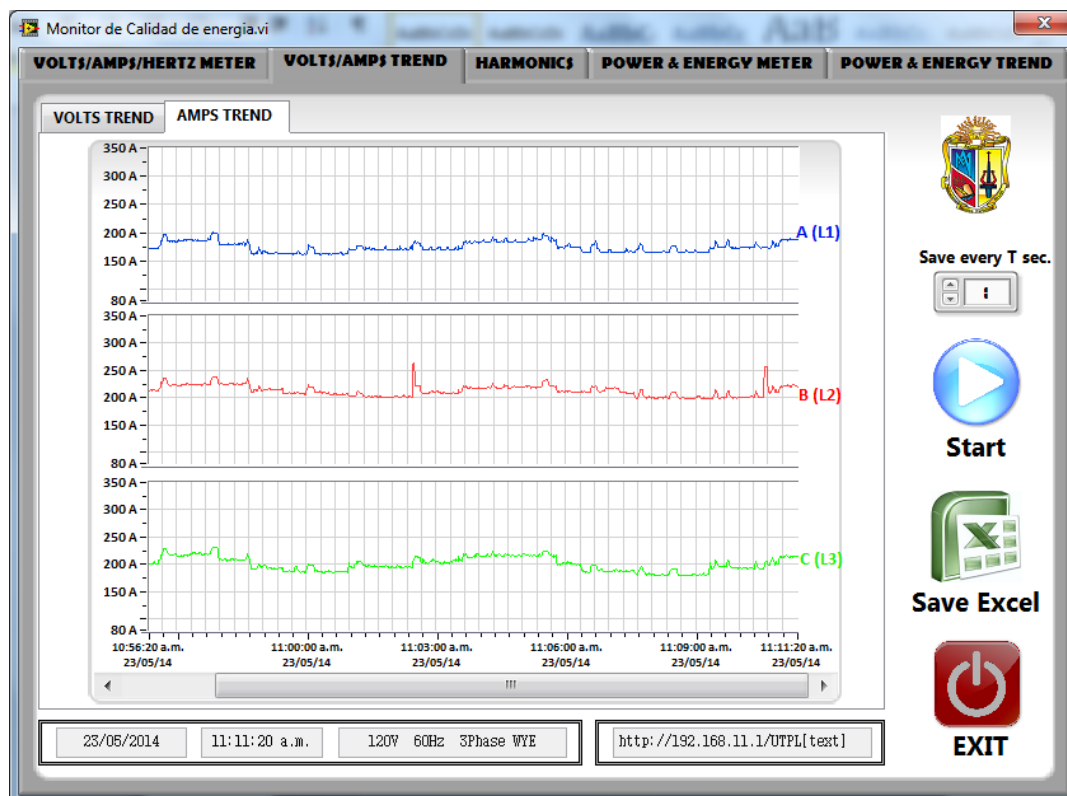
E.1. Pantalla de voltajes y corrientes



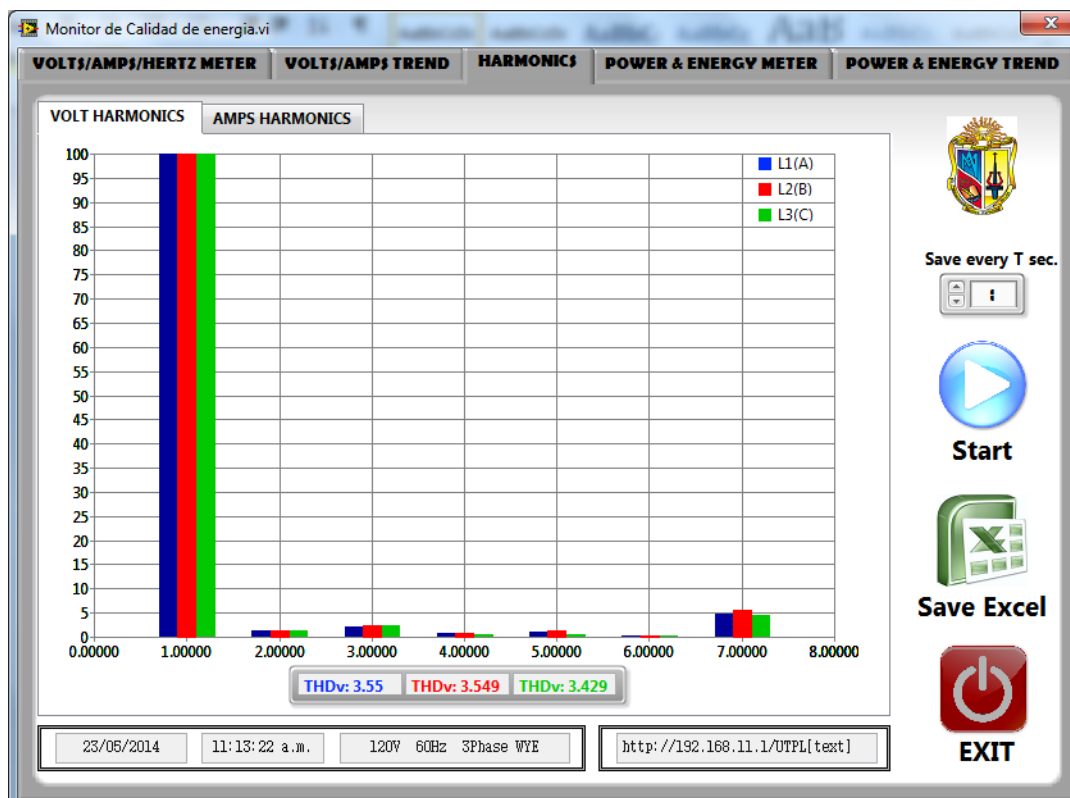
E.2. Pantalla de Voltajes en función del tiempo



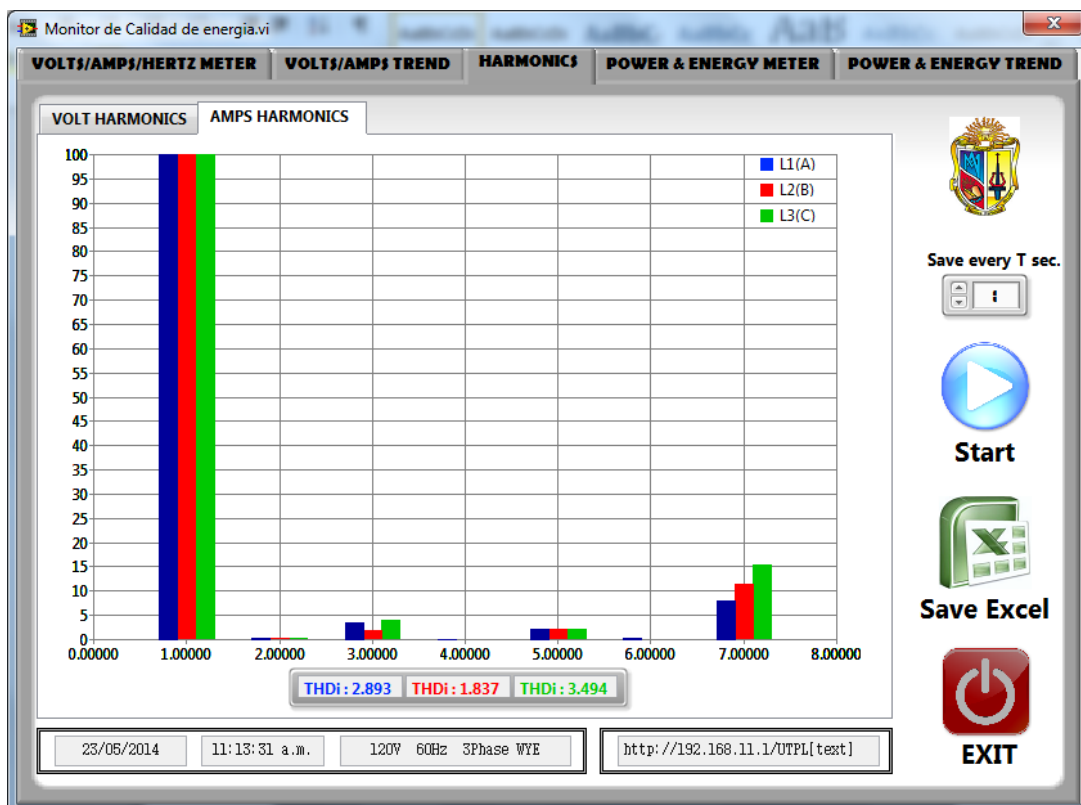
E.3. Pantalla de corrientes en función del tiempo



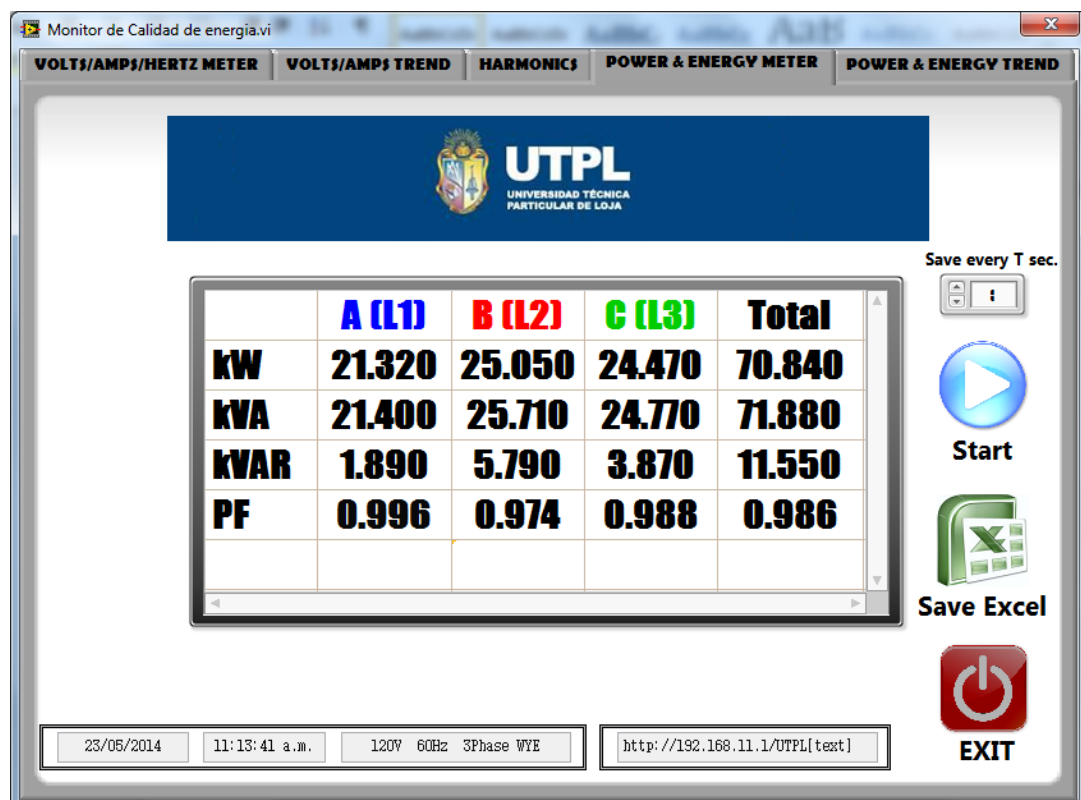
E.4. Pantalla histograma de amplitudes armónicas de voltaje



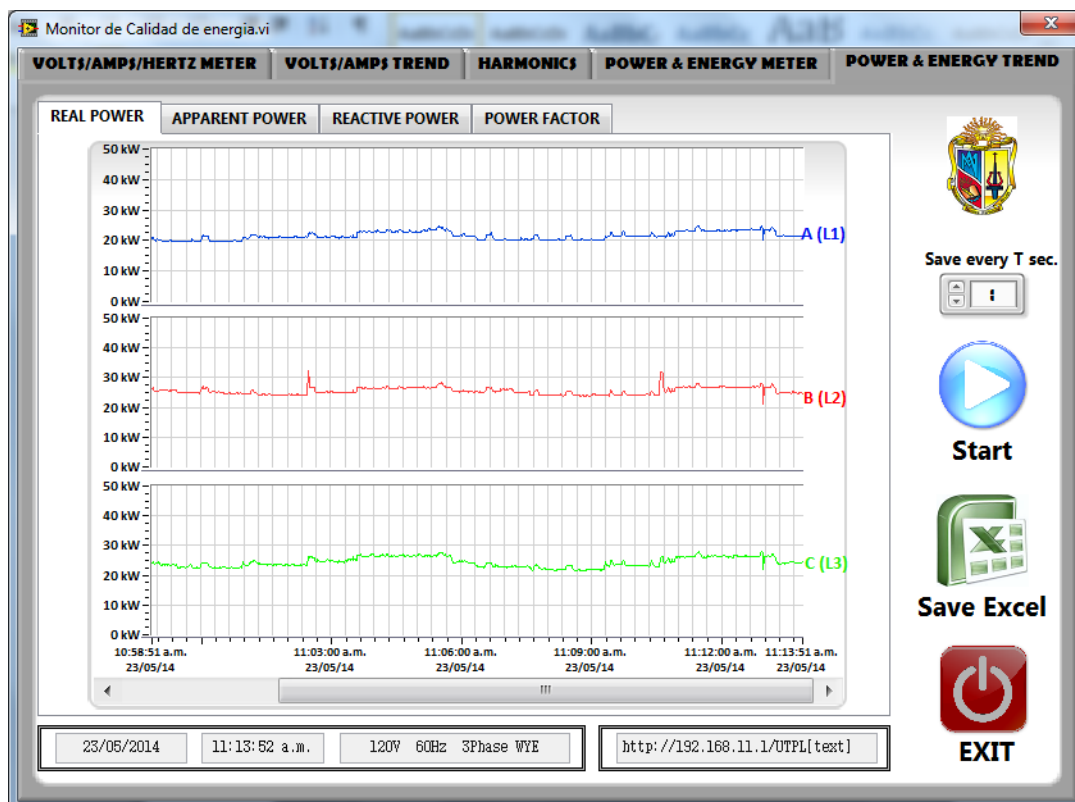
E.5. Pantalla histograma de amplitudes armónicas de corriente



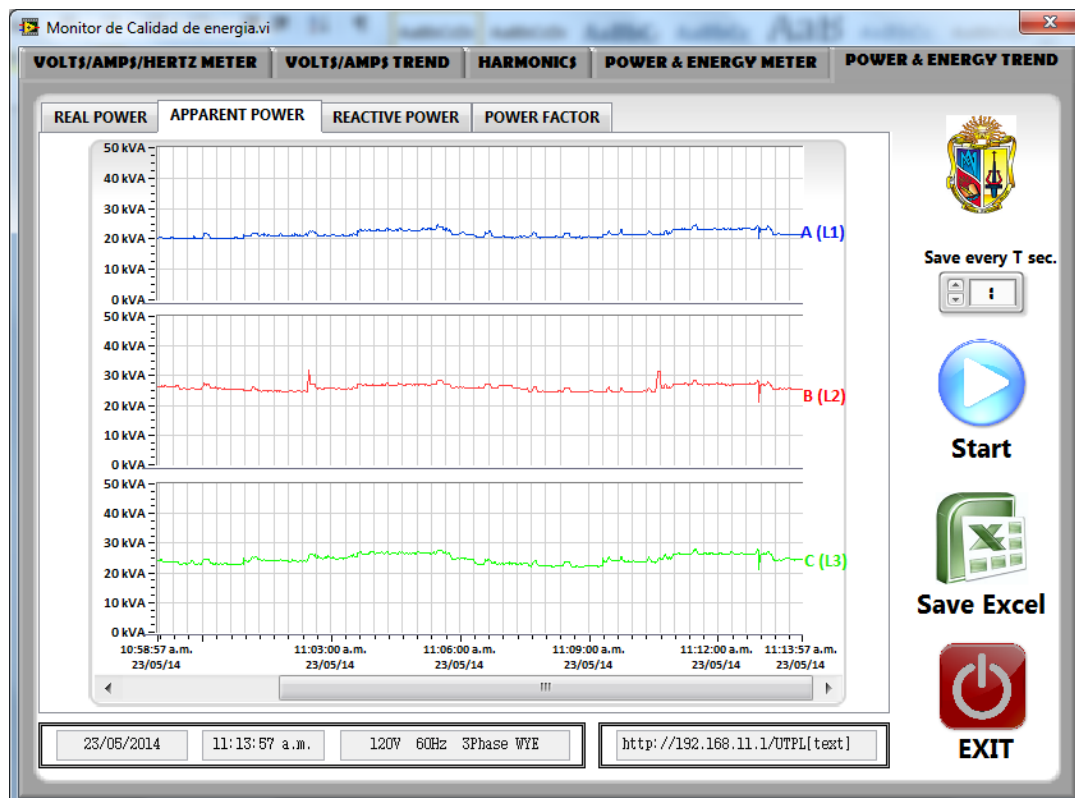
E.6. Pantalla de Potencias y Energía



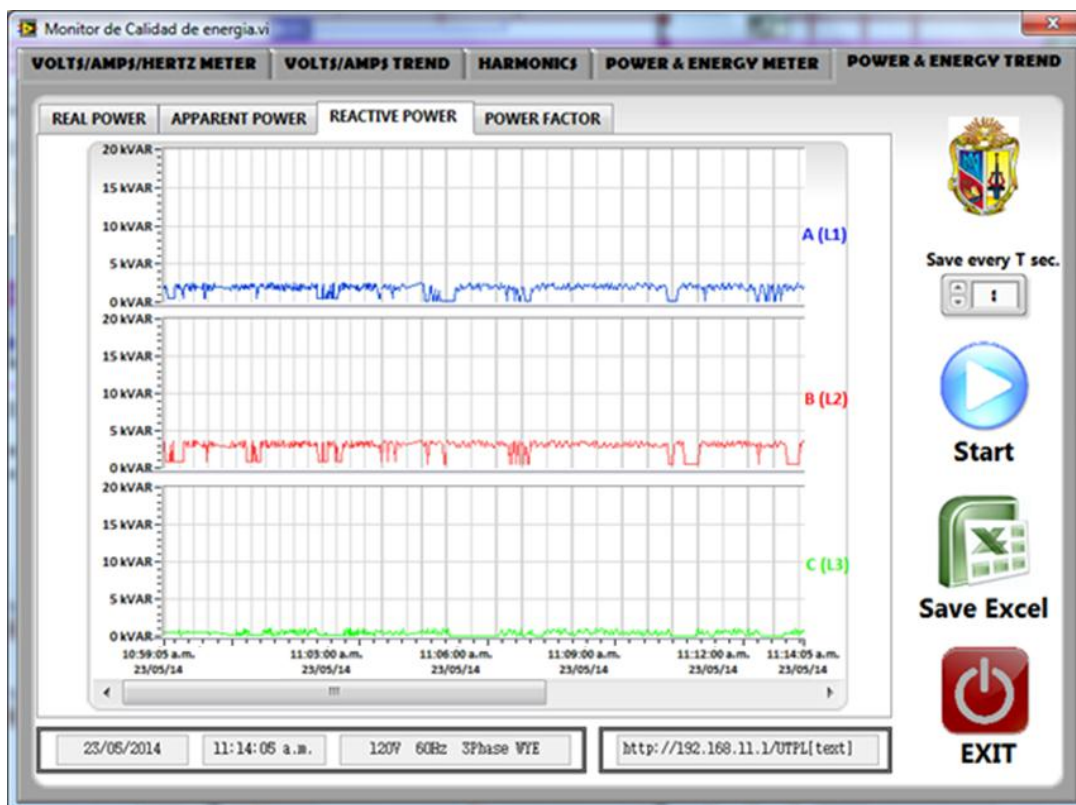
E.7. Pantalla de potencias activas en función del tiempo



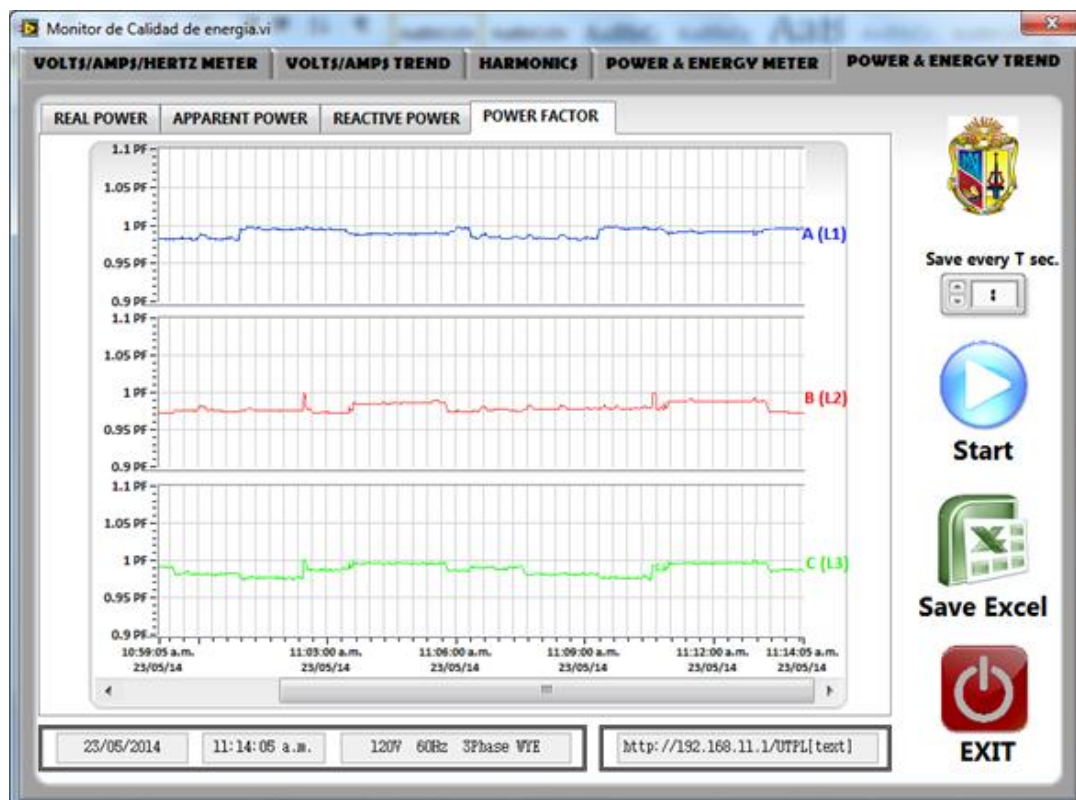
E.8. Pantalla de potencias aparentes en función del tiempo



E.9. Pantalla de potencias reactivas en función del tiempo



E.10. Pantalla de factores de potencia en función del tiempo



ANEXO F

REPORTES GENERADOS EN EXCEL POR FASE

ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Reporte de Variables Eléctricas Fase A

Fecha: martes, 27 de mayo de 2014

Hora: 08:42 a.m.

Nombre del ensayista: Byron Ganazhapa

<i>Fecha/Hora</i>	<i>Voltaje Eficaz (Vrms)</i>	<i>Corriente Eficaz (Arms)</i>	<i>Potencia Real (kW)</i>	<i>Potencia Aparente (kVA)</i>	<i>Potencia Reactiva (kVAR)</i>	<i>Factor de Potencia (cos phi)</i>	<i>Distorsion Armonica Total de Voltaje (THDv)</i>	<i>Distorsion Armonica Total de Corriente (THDi)</i>
08:42:25 a.m. 27/05/2014	121.89	172.73	20.99	21.04	1.39	0.9978	1.042	9.019
08:42:26 a.m. 27/05/2014	121.68	171.42	20.79	20.84	1.41	0.9977	1.042	9.019
08:42:27 a.m. 27/05/2014	121.67	165.44	19.9	20.11	2.91	0.9895	1.042	9.018
08:42:28 a.m. 27/05/2014	121.86	166.01	20	20.21	2.94	0.9893	1.042	9.018
08:42:29 a.m. 27/05/2014	122.08	166.34	20.08	20.29	2.89	0.9898	1.042	8.985
08:42:30 a.m. 27/05/2014	121.9	166.1	20.02	20.23	2.94	0.9894	1.042	8.985
08:42:32 a.m. 27/05/2014	121.78	164.02	19.72	19.96	3.09	0.988	1.042	8.491
08:42:33 a.m. 27/05/2014	121.97	164.59	19.83	20.06	3.02	0.9886	1.042	8.491
08:42:34 a.m. 27/05/2014	122.09	164.27	19.81	20.04	3.04	0.9884	1.042	8.462
08:44:29 a.m. 27/05/2014	122.58	176.02	21.15	21.56	4.18	0.9811	1.042	8.462
08:44:30 a.m. 27/05/2014	122.46	175.55	21.07	21.48	4.18	0.9809	1.042	8.491
08:44:31 a.m. 27/05/2014	122.58	175.91	21.14	21.55	4.17	0.9811	1.042	8.491
08:44:32 a.m. 27/05/2014	122.73	175.87	21.16	21.57	4.16	0.9812	1.042	8.561
08:44:33 a.m. 27/05/2014	122.39	175.15	21	21.42	4.23	0.9803	1.042	8.561
08:44:34 a.m. 27/05/2014	122.57	176.39	21.19	21.6	4.19	0.981	1.042	8.561
08:44:36 a.m. 27/05/2014	122.72	178.06	21.44	21.83	4.12	0.982	1.042	8.561
08:44:37 a.m. 27/05/2014	122.37	177.02	21.25	21.64	4.13	0.9817	1.042	8.561
08:44:38 a.m. 27/05/2014	122.58	175.73	21.12	21.52	4.14	0.9813	1.042	8.561
08:44:39 a.m. 27/05/2014	122.84	174.88	21.06	21.46	4.16	0.9811	1.042	9.014
08:44:40 a.m. 27/05/2014	122.55	177.34	21.31	21.72	4.18	0.9813	1.042	9.018
08:44:41 a.m. 27/05/2014	122.58	178.22	21.45	21.83	4.04	0.9827	1.042	9.134
08:44:42 a.m. 27/05/2014	122.72	181.21	21.89	22.22	3.81	0.9852	1.042	9.124
08:44:43 a.m. 27/05/2014	122.39	181	21.81	22.13	3.8	0.9851	1.042	9.124
08:44:45 a.m. 27/05/2014	122.34	181.23	21.83	22.15	3.77	0.9855	1.042	9.856

ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Reporte de Variables Eléctricas Fase B

Fecha: martes, 27 de mayo de 2014

Hora: 12:19 p.m.

Nombre del ensayista: Byron Ganazhapa

Fecha/Hora	Voltaje Eficaz (Vrms)	Corriente Eficaz (Arms)	Potencia Real (kW)	Potencia Aparente (kVA)	Potencia Reactiva (kVAR)	Factor de Potencia (cos phi)	Distorsion Armonica Total de Voltaje (THDv)	Distorsion Armonica Total de Corriente (THDi)
11:32:35 a.m. 27/05/2014	122.36	202.65	23.98	24.78	6.23	0.9679	1.444	8.829
11:32:36 a.m. 27/05/2014	122.2	204.46	24.19	24.96	6.18	0.9689	1.444	8.829
11:32:37 a.m. 27/05/2014	122.16	205.84	24.35	25.12	6.19	0.9691	1.444	8.829
11:32:38 a.m. 27/05/2014	122.23	203.58	24.08	24.86	6.2	0.9684	1.444	8.829
11:32:39 a.m. 27/05/2014	122.43	202.73	24.01	24.8	6.2	0.9683	1.444	8.829
11:32:40 a.m. 27/05/2014	122.23	203.53	24.06	24.86	6.24	0.968	1.444	8.829
11:32:42 a.m. 27/05/2014	122.21	210.16	25.09	25.66	5.39	0.9777	1.444	8.829
11:32:43 a.m. 27/05/2014	122.28	206.46	24.52	25.22	5.92	0.9721	1.444	8.829
11:32:44 a.m. 27/05/2014	122.27	207.2	24.61	25.31	5.91	0.9724	1.444	8.829
11:32:45 a.m. 27/05/2014	122.3	205.33	24.38	25.09	5.93	0.9716	1.444	8.829
11:32:46 a.m. 27/05/2014	122.31	205.65	24.46	25.13	5.77	0.9733	1.444	8.829
11:32:47 a.m. 27/05/2014	122.21	209.82	25.13	25.62	4.98	0.9809	1.444	8.829
11:32:48 a.m. 27/05/2014	122.21	210.5	25.21	25.7	5.03	0.9806	1.444	8.829
11:32:50 a.m. 27/05/2014	122.2	212.94	25.52	26	5	0.9814	1.444	8.829
11:32:51 a.m. 27/05/2014	122.06	216.1	25.87	26.36	5.02	0.9817	1.444	8.829
11:32:52 a.m. 27/05/2014	122.14	215.5	25.82	26.3	5.01	0.9817	1.444	8.829
11:32:53 a.m. 27/05/2014	122.02	211.96	25.34	25.84	5.09	0.9804	1.444	8.829
11:32:54 a.m. 27/05/2014	122.09	211.22	25.26	25.77	5.08	0.9804	1.444	8.829
11:32:55 a.m. 27/05/2014	122.17	211.5	25.32	25.82	5.05	0.9807	1.444	8.829
11:32:56 a.m. 27/05/2014	122.06	213.19	25.52	26	5	0.9813	1.444	8.829
11:32:57 a.m. 27/05/2014	122.09	214.08	25.64	26.12	4.97	0.9818	1.444	8.829
11:32:59 a.m. 27/05/2014	122	213.17	25.5	25.98	4.99	0.9814	1.444	8.829
11:33:00 a.m. 27/05/2014	122.05	209.95	25.1	25.6	5.04	0.9804	1.444	8.829

ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Reporte de Variables Eléctricas Fase C

Fecha: martes, 27 de mayo de 2014

Hora: 11:32 a.m.

Nombre del ensayista: Byron Ganazhapa

Fecha/Hora	Voltaje Eficaz (Vrms)	Corriente Eficaz (Arms)	Potencia Real (kW)	Potencia Aparente (kVA)	Potencia Reactiva (kVAR)	Factor de Potencia (cos phi)	Distorsion Armonica Total de Voltaje (THDv)	Distorsion Armonica Total de Corriente (THDi)
11:32:35 a.m. 27/05/2014	122.77	176.63	21.62	21.67	0.17	0.9976	1.381	9.019
11:32:36 a.m. 27/05/2014	122.75	176.93	21.65	21.7	0.16	0.9975	1.381	9.019
11:32:37 a.m. 27/05/2014	122.77	177.24	21.7	21.74	0.16	0.9981	1.381	9.019
11:32:38 a.m. 27/05/2014	122.9	177.39	21.74	21.78	0.14	0.9982	1.381	9.019
11:32:39 a.m. 27/05/2014	122.75	177.03	21.67	21.71	0.05	0.9982	1.381	9.019
11:32:40 a.m. 27/05/2014	122.78	176.69	21.63	21.68	0.12	0.9977	1.381	9.019
11:32:42 a.m. 27/05/2014	122.82	184.18	22.68	22.6	0.12	1.0033	1.381	9.019
11:32:43 a.m. 27/05/2014	122.74	178.86	21.93	21.94	0.29	0.9999	1.381	9.019
11:32:44 a.m. 27/05/2014	122.76	178.45	21.88	21.89	0.98	0.9995	1.381	9.019
11:32:45 a.m. 27/05/2014	122.86	177.24	21.74	21.76	0.98	0.9991	1.381	9.019
11:32:46 a.m. 27/05/2014	122.73	179.26	21.95	21.98	1.11	0.9983	1.381	9.019
11:32:47 a.m. 27/05/2014	122.69	184.73	22.81	22.65	0.91	1.0073	1.381	9.019
11:32:48 a.m. 27/05/2014	122.71	184.9	22.81	22.67	0.70	1.006	1.381	9.019
11:32:50 a.m. 27/05/2014	122.58	185.31	22.83	22.7	0.03	1.0059	1.381	9.019
11:32:51 a.m. 27/05/2014	122.76	185.72	22.92	22.78	0.01	1.0063	1.381	9.019
11:32:52 a.m. 27/05/2014	122.75	185.52	22.9	22.76	0.06	1.0062	1.381	9.019
11:32:53 a.m. 27/05/2014	122.69	185.14	22.83	22.7	0.06	1.0058	1.381	9.019
11:32:54 a.m. 27/05/2014	122.81	184.95	22.83	22.7	0.20	1.006	1.381	9.019
11:32:55 a.m. 27/05/2014	122.68	184.92	22.8	22.67	0.14	1.0057	1.381	9.019
11:32:56 a.m. 27/05/2014	122.77	184.89	22.81	22.68	0.01	1.0057	1.381	9.019
11:32:57 a.m. 27/05/2014	122.67	184.95	22.8	22.67	0.00	1.0058	1.381	9.019
11:32:59 a.m. 27/05/2014	122.72	185.06	22.82	22.69	0.04	1.0056	1.381	9.019
11:33:00 a.m. 27/05/2014	122.65	185.47	22.86	22.73	0.05	1.0059	1.381	9.019

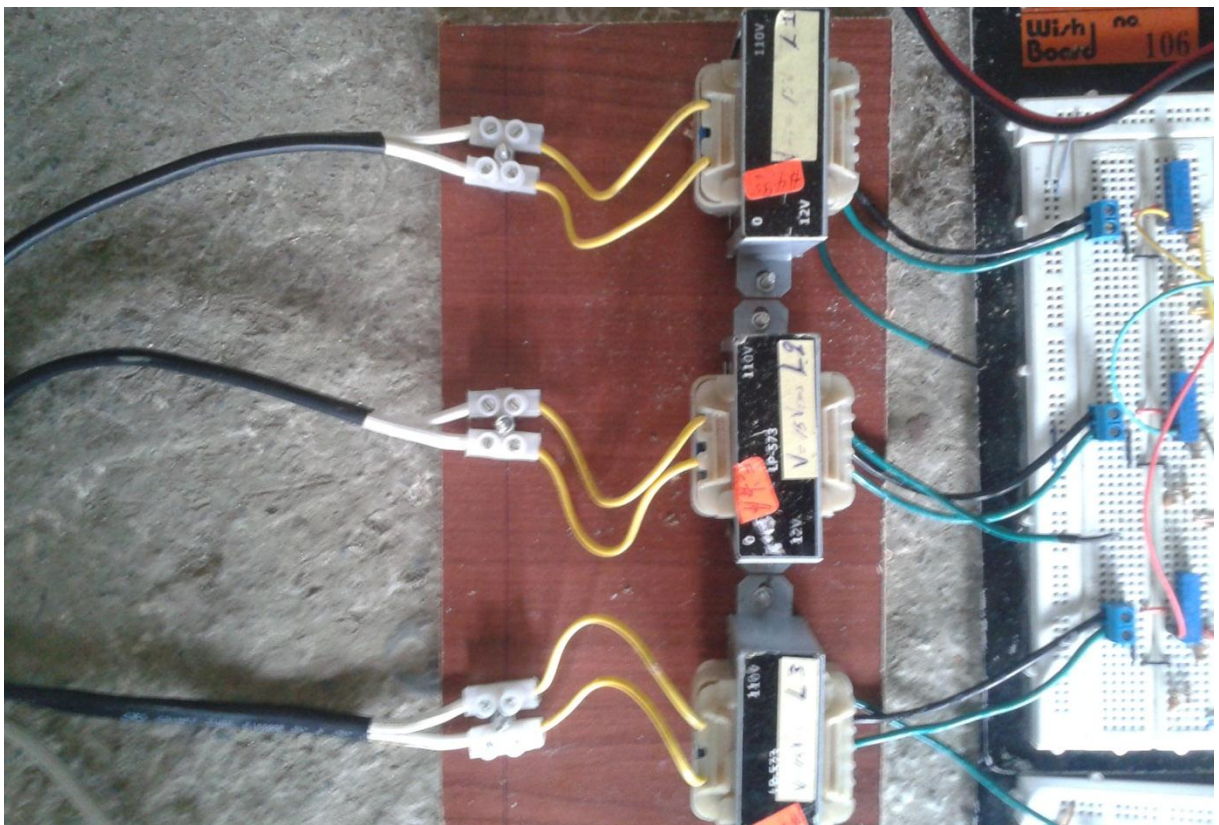
ANEXO G

MEMORIA FOTOGRÁFICA DEL PROCESO DE VALIDACIÓN

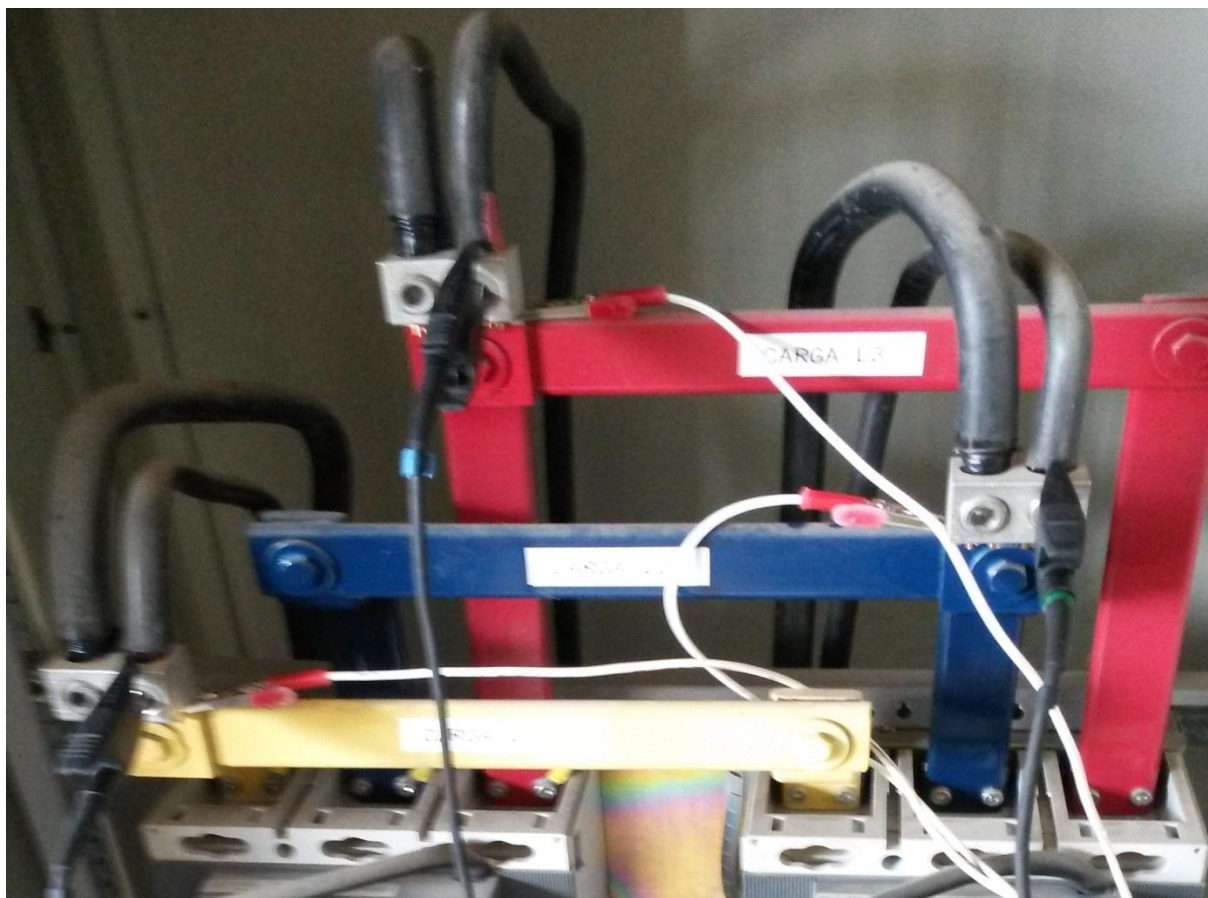
G.1. Pinzas Amperimétrica



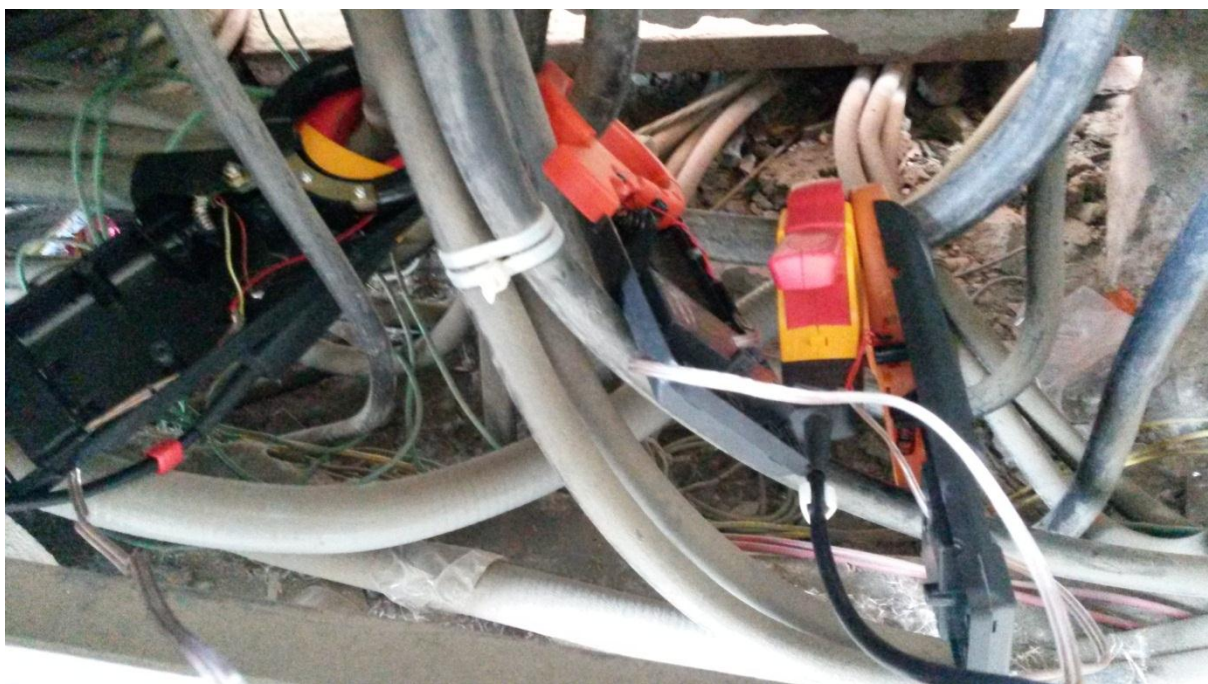
G.2. Transformadores de voltaje



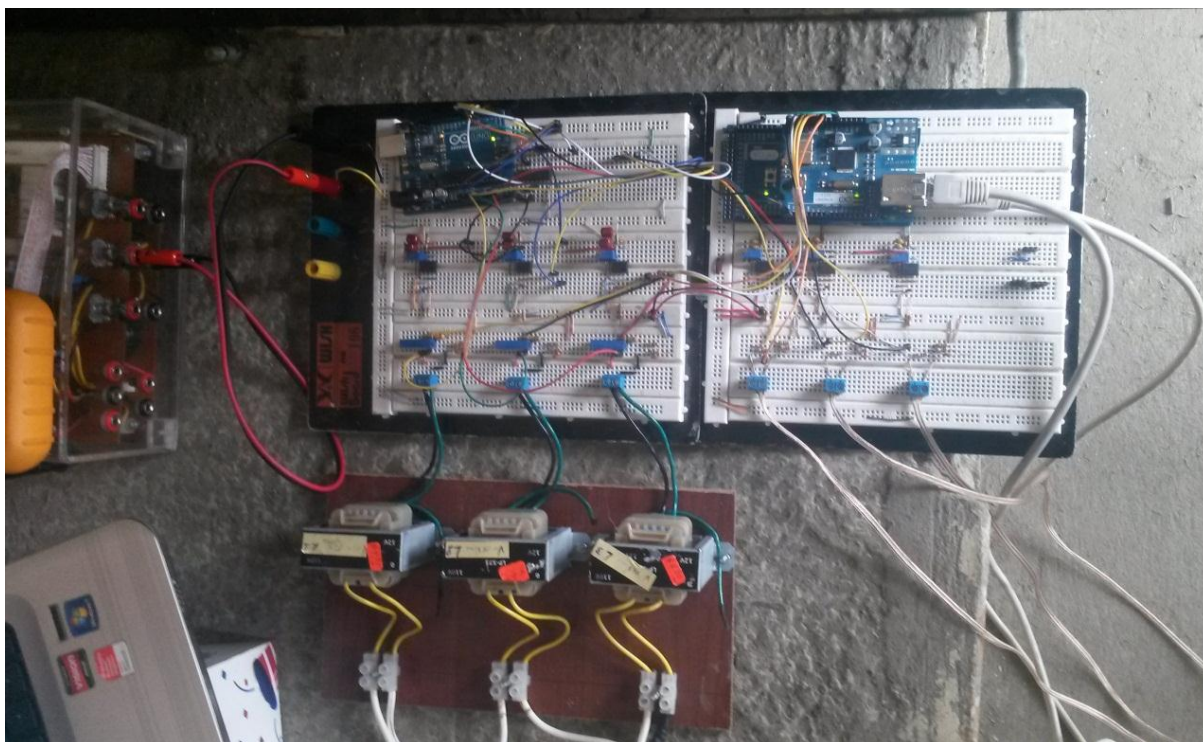
G.3. Instalación de los transformadores de voltaje



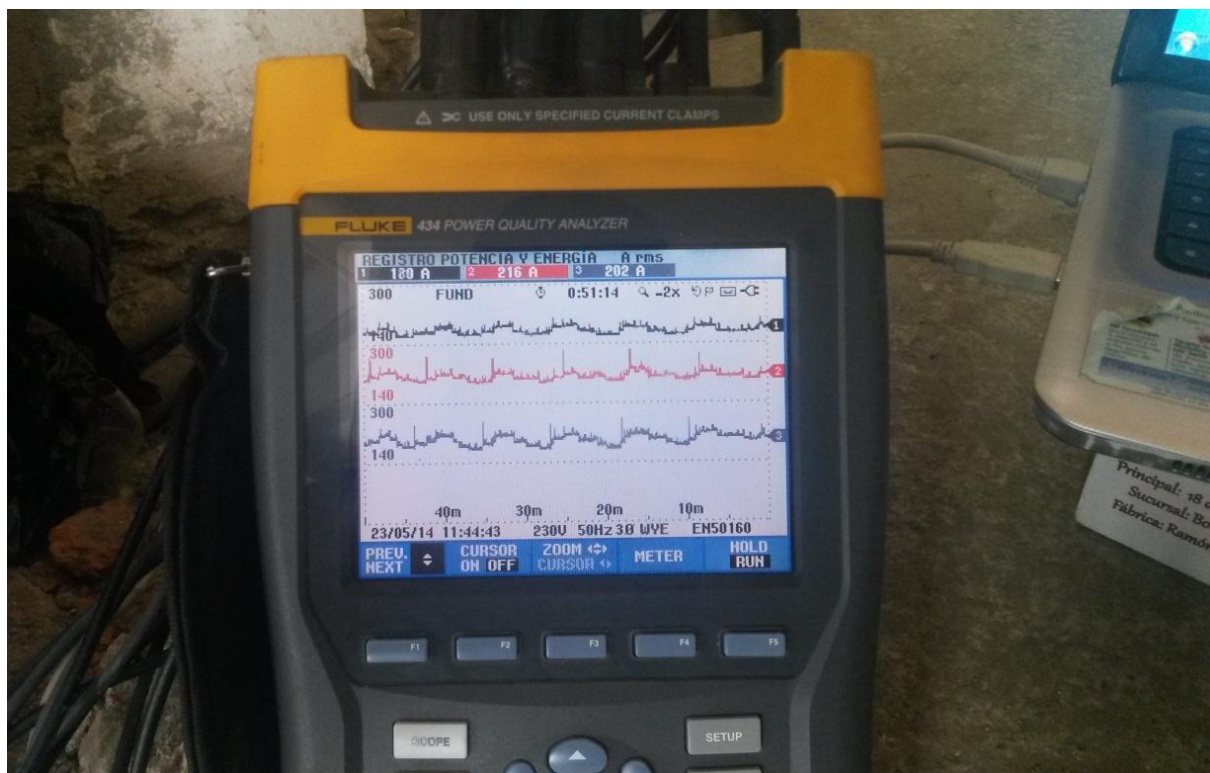
G.4. Instalación de las pinzas amperimétricas



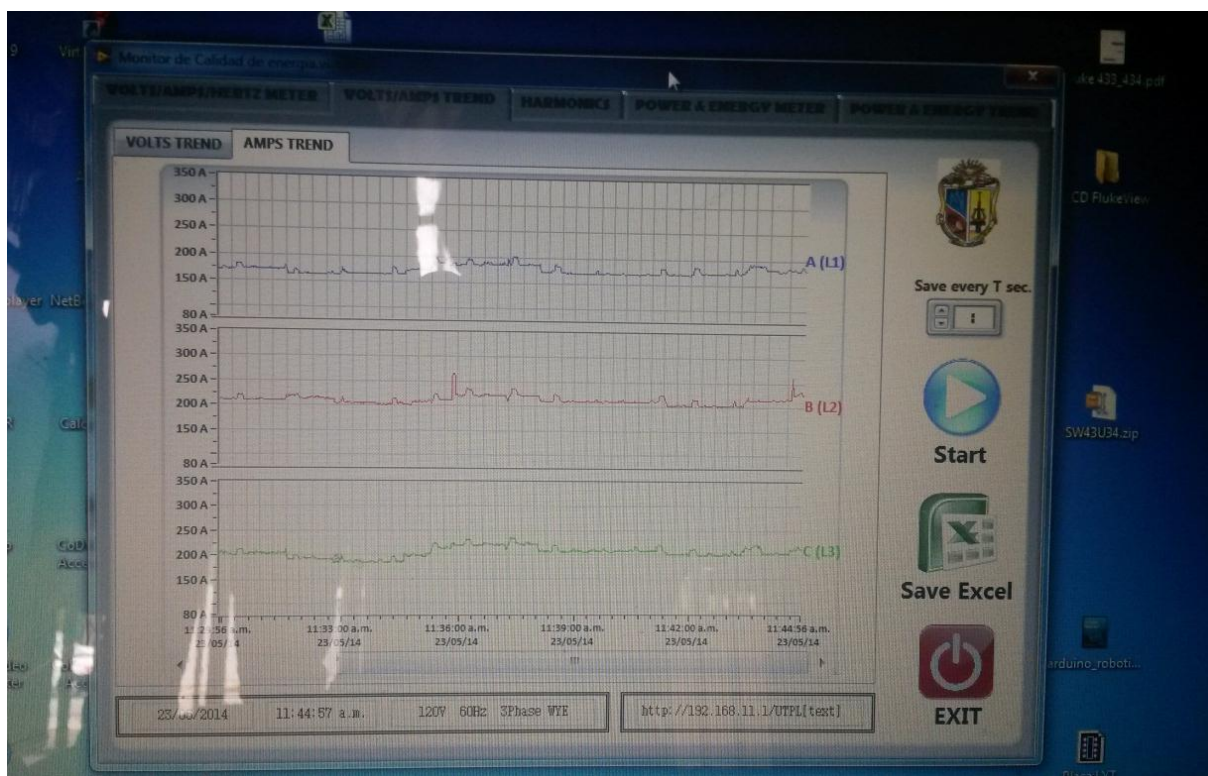
G.5. Instalación del equipo Fluke 434 y analizador del proyecto



G.6. Pantalla del 434 Fluke



G.6. Pantalla del software analizador del proyecto



ANEXO H

PAPER DEL PROYECTO DE FIN DE TITULACIÓN

Síntesis y validación de metodologías y algoritmos para la determinación de parámetros de calidad de energía eléctrica

Byron Ganazhapa¹, Carlos Calderon²

¹Profesional en formación IET, Universidad Técnica Particular de Loja

²Docente Titulación IET, Universidad Técnica Particular de Loja

Loja, Ecuador 2014

¹boganazhapa@utpl.edu.ec, ²cacalderon@utpl.edu.ec

Resumen— En el presente proyecto se realiza una síntesis y validación de metodologías y algoritmos para un analizador de calidad de energía eléctrica de una red trifásica, con capacidad de transmisión de datos mediante conexión Ethernet para el registro y visualización de parámetros eléctricos. Para el desarrollo del mismo, se propone cumplir cuatro etapas fundamentales: Primero, definir la metodología para la determinación de un parámetro eléctrico desde el punto de vista analítico. Como segunda etapa, se propone sintetizar la metodología planteada en un código fuente basado en un lenguaje de programación compatible con plataformas de desarrollo Open Source. Como tercera etapa, se propone diseñar los bloques de acondicionamiento y digitalización de las señales de voltaje y corriente adquiridas. Y como cuarta etapa, se propone realizar una validación del sistema completo (hardware, firmware y software) con un instrumento de referencia.

Palabras claves— calidad de energía eléctrica, distorsión armónica total, factor de potencia, triángulo de potencias, open source, adquisición de datos.

I. INTRODUCCIÓN

Se define como calidad de energía eléctrica a las variaciones permitidas de la forma de onda senoidal de voltajes y corrientes, y de frecuencia constante en una línea de distribución de energía [4].

La evaluación de una red eléctrica requiere de un reglamento, normalización y metodología que ayude a cumplir con los requerimientos de calidad como son las normas: IEC 61000-4-30, EN-50160v e IEEE 1159-1995. Como parte del proceso de investigación para sistematizar los métodos y las técnicas necesarias para llevar a cabo el análisis de calidad, es conveniente realizar un análisis de variables eléctricas que permita definir adecuadamente su dimensionamiento desde punto de vista técnico.

Para las buenas prácticas de calidad de energía eléctrica y eficiencia energética, es importante implementar equipos analizadores de calidad para el monitoreo y medida de parámetros de calidad en redes eléctricas basados en normas internacionales mencionadas con anterioridad.

Sin embargo, los equipos analizadores de calidad de energía de mercado poseen un costo nominal alto como para que la industrias inviertan en este tipo de equipos para monitorear los puntos críticos de su sistema de distribución de energía, así también se abstrae que estos puntos críticos se encuentran dispersos en las instalaciones del campus industrial, para lo cual se requeriría centralizar la información de interés. Es por estas razones principales que el presente trabajo tiene como objetivos sintetizar y validar metodologías y algoritmos de un analizador de calidad de energía eléctrica para la determinación de parámetros de calidad con capacidad de transmisión de datos y registro remoto de información

Para el desarrollo del sistema propuesto, se lo ha estructurado en cuatro etapas principales, Definir la metodología para la determinación de un parámetro eléctrico desde el punto de vista analítico. Luego sintetizar la metodología planteada en un código fuente Open Source. Diseñar los bloques de acondicionamiento y digitalización de las señales de voltaje y corriente adquiridas. Y, validar el sistema con un instrumento de referencia.

Según los requerimientos del estándar IEC 61000-4-30 para la determinación de magnitudes de parámetros de calidad, se priorizo realizar el dimensionamiento para ocho categorías distintas de calidad como requerimiento para cumplir con las más altas exigencias de calidad dentro de plataformas Open Source: tensiones, corrientes, potencias,

factor de potencia a una inexactitud máxima permitida del $\pm 0.1\%$ y, distorsión armónica total a $\pm 5\%$ de inexactitud en tiempos de agregación de 12 ciclos en redes de 60 Hz.

II. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA (CEE)

Es importante tomar conciencia de la necesidad de hacer uso más responsable de la energía eléctrica para satisfacer las necesidades y demandas. Por ello el buen uso de la energía eléctrica permite ser más productivo y competitivo. La correcta utilización de la energía eléctrica conlleva a una alternativa confiable para reducir costos, mejorar la producción y competitividad.

A. Importancia de la calidad de energía eléctrica

Calidad de energía eléctrica es un término que se refiere a las variaciones de la forma de onda senoidal de voltajes y corrientes en líneas de distribución de energía eléctrica. Así calidad de energía eléctrica expresa calidad de voltaje, calidad de corriente, confiabilidad del servicio, calidad de suministro eléctrico, entre otros [4].

El consumo eléctrico es una magnitud directamente proporcional al crecimiento industrial y comercial. Este aumento de demanda está relacionado con la productividad y competitividad empresarial, como el aumento de cargas lineales y no lineales (motores, impresoras, hornos, soldadores de arco, etc.) que fuerzan al desbalance e inestabilidad de un sistema eléctrico, tanto para el distribuidor como el consumidor.

La importancia de la calidad de energía eléctrica es el resultado de una atención continua, lo cual conlleva a obtener beneficios para las empresas distribuidoras y consumidoras, entre los principales se cita los siguientes:

- Aumento de la vida útil de los equipos eléctricos.
- Mayor eficiencia y funcionalidad en los equipos eléctricos.
- Menor riesgos de fallas, lo cual aumenta la productividad y disminuye gastos y tiempos muertos invertidos en reparación.
- Disminución de gastos de mantenimiento.
- Disminución de riesgos de demandas y multas [1].

Cada uno de estos factores tienen la facultad de garantizar, confiabilidad y seguridad en el sector consumidor, el cual puede ser del tipo residencial, industrial y comercial.

B. Problemas de calidad de energía eléctrica

En términos de calidad de energía eléctrica, podemos decir que existe un problema cuando ocurre cualquier desviación de tensión, corriente o frecuencia que provoque la mala operación de los equipos, generando pérdidas financieras para el consumidor.

Origen

Múltiples factores influyen para que de origen al problema de calidad de energía eléctrica, cuyos factores son:

- Instalación de sistemas eléctricos y electrónicos altamente sensibles.
- Instalación de equipos sensibles en instalaciones no adecuadas u hostiles.
- Instalación de sistemas de protección inadecuados o inexistentes.
- Diseño inadecuado de las instalaciones eléctricas y sistemas de puesta a tierra.

En la mayoría de los casos, el origen del problema no surge de la funcionalidad o rendimiento de los equipos eléctricos y electrónicos, sino de otros tipos de eventos. Tales factores podemos mencionar:

- La naturaleza y origen de los eventos de potencia.
- Interferencias electromagnéticas externas.
- Efectos ocasionados por eventos externos en malas condiciones de operación, productividad o procesos.

Todas las anomalías se generan en fuentes internas o externas, que viajan por la instalación desde el origen hacia toda ella [2].

Clasificación

Los problemas de calidad de energía se producen debido a los distintos tipos de perturbaciones eléctricas, la mayoría de las perturbaciones depende de la amplitud y/o frecuencia. Basado en la duración de la ocurrencia de las perturbaciones, los eventos pueden dividirse en perturbaciones de corto, mediano y largo plazo [5]. Las perturbaciones causan degradación de calidad de energía eléctrica y su clasificación incluye principalmente los siguientes eventos:

- Interrupción bajo-voltaje/sobre-voltaje.
- Desbalance de voltaje.
- Armónicos.
- Transitorios.
- Fluctuaciones de tensión (Flicker).

C. Normativas de calidad de energía eléctrica

Las normas y estándares aplicables a la calidad de energía eléctrica han sido proporcionadas por diferentes organismos técnicos como IEEE, ANSI, IEC, CENELEC, entre otros.

Norma IEC 61000-4-30

La IEC 61000-4-30, tiene por objetivo principal la descripción de los métodos de medición de un gran número de parámetros de calidad de energía para hacer posible la obtención de información y resultados confiables, reproducibles y comparables, más allá del instrumento

específico compatible con las prestaciones requeridas y de las condiciones ambientales. Además se focaliza en la metodología de mediciones in-situ [8].

Los parámetros de calidad de energía eléctrica a los que hace referencia son de naturaleza conductiva, correspondiente a la tensión y corriente de los sistemas eléctricos [8]:

- Frecuencia fundamental de red
- Magnitud RMS de tensión y corriente
- Interrupciones, sobre y subtensiones
- Desbalance de tensión
- Flicker de tensión (PST y PLT)
- Transitorios de tensión
- Armónicos de tensión y corriente
- Inter-armónicos de tensión y corriente
- Índices de distorsión armónica total de tensión y corriente
- Tensiones de señalización
- Cambios rápidos de estabilidad de tensión.

La IEC 61000-4-30, expone especificaciones de performance sobre las mediciones y resultados obtenidos, pero no es una especificación de diseño del instrumento. Tampoco fija los umbrales de calidad de las magnitudes a medir. Distingue dos categorías de instrumento: Clase A, de mayor exigencia de medida; y, Clase B de menor exigencia de medida.

Por lo tanto, los parámetros de calidad establecidos por esta norma, y como criterios de medida para implementar este proyecto se describen:

Tabla 1

Parámetros y criterios de calidad de la norma IEC 61000-4-30 [19].

Parámetro	Medida	Clase A	Clase B
		Exactitud	Incertidumbre
Frecuencia	Hz	$\pm 10\text{mHz}$	A especificar por el fabricante
Tensión de alimentación	Vrms	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.5\%$
Corriente (Anexo A.5 de la norma)	Arms	$\pm 0.1\%$	$\pm 2.0\%$
Flicker	Plt	$\pm 5\%$ (IEC 61000-4-15)	No especificado
Huecos, sobretensiones, interrupciones	Vrms, t, T	$\pm 0.2\%$	Vrms(1/2)
Desequilibrio	%desequilibrio	Método de las componentes simétricas	A especificar por el fabricante
Armónicos e Interarmónicos	THD, Armónicos, Interarmónicos	$\pm 5\%$ (IEC 61000-4-7)	A especificar por el fabricante
Transmisión de señales	Vrms	Medida de interarmónicos (para $f > 3\text{kHz}$ ver IEC 61000-3-8)	A especificar por el fabricante

Norma EN-50160

Dentro de los estándares europeos (EN), la norma EN-50160 describe las características principales de la tensión suministrada por una red de distribución en baja tensión (hasta 1 kV) y en media tensión (desde 1 kV hasta 35 kV) en condiciones normales de explotación [9].

El objeto de esta norma es definir y describir los valores y límites de los siguientes parámetros:

- Amplitud de la tensión,
- Variaciones de la tensión suministrada,
- Las variaciones rápidas de la tensión (amplitud de las variaciones y severidad del parpadeo),
- Los huecos de tensión,
- Las interrupciones breves y las interrupciones largas del suministro,
- Las sobretensiones temporales y transitorias,
- El desequilibrio de la tensión suministrada,
- Las tensiones armónicas e interarmónicas, y
- La transmisión de señales de información por la red, así como los protocolos de medida [9].

Estándar IEEE 1159-1995

Esta normativa de la IEEE, define siete categorías distintas de fenómenos electromagnéticos en las redes eléctricas:

- Transitorios,
- Variaciones de corta duración,
- Variaciones de larga duración,
- Desequilibrio de la tensión,
- Distorsión de la forma de onda,
- Fluctuaciones de tensión, y,
- Variaciones de la frecuencia [11].

D. Calidad de energía eléctrica en el Ecuador

El CONELEC emite la Regulación 004/01, como reglamento relacionado con los estándares mínimos de calidad de energía eléctrica y procedimientos técnicos de medición y evaluación a los que deben someterse las empresas distribuidoras del servicio eléctrico. Por lo tanto esta entidad; regula, controla y vigila a las empresas eléctricas del Ecuador, los siguientes aspectos:

- Calidad del producto
- Calidad del servicio técnico
- Calidad del servicio comercial [17].

III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD

De acuerdo al análisis realizado en el apartado anterior respecto a calidad de energía eléctrica, tipos de perturbaciones en redes eléctricas y normativas de calidad de energía eléctrica, se establece el dimensionamiento de ecuaciones matemáticas para la cuantificación de parámetros

eléctricos y sustentar el desarrollo de los módulos firmware y software, que forman parte del analizador de calidad de energía eléctrica.

En base a la norma IEC 61000-4-30 como procedimientos de medida de altas exigencias para la obtención de resultados confiables a un conjunto de parámetros de calidad en tiempos de agregación de 12 ciclos, se estableció como primera fase, realizar el dimensionamiento matemático para las siguientes variables:

- Voltaje rms por fase.
- Corriente rms por fase.
- Potencia activa por fase.
- Potencia aparente por fase.
- Potencia reactiva por fase.
- Factor de potencia por fase.
- Distorsión armónica total de voltaje (THD) por fase.
- Distorsión armónica total de corriente (THD) por fase.

Para el cálculo matemático de THD de voltaje y corriente, y en base a investigación bibliográfica se decidió realizar el análisis hasta el 7mo armónico; la razón principal es que en redes eléctricas, las amplitudes armónicas más significativas son aquellas generadas por cargas no lineales, estos armónicos más significativos son los de orden impar, especialmente los de 3er, 5to y 7mo orden, la causa de ello es la carga de base electrónica como son: equipos, computadores, accionamientos, controladores de motores, y, transformadores.

A. Fundamentos teóricos

Valor efectivo de una forma de onda periódica

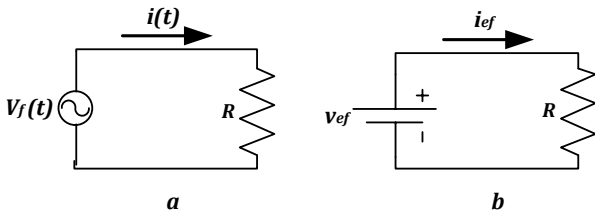


Fig. 1. Circuitos para la definición de valores eficaces [12].

El valor efectivo de un voltaje de una fuente o un punto de medición en la red doméstica, es una medida de su efectividad de entregar potencia a un resistor de carga [12]. El concepto de valor efectivo se deriva de la conveniencia de contar con un voltaje (o corriente) senoidal que entregue a un resistor de carga la misma potencia promedio que un voltaje (o corriente) equivalente DC [12]. Para determinar V_{ef} (o una I_{ef}) de DC que entregue la misma potencia promedio a un resistor que la que entregaría una fuente que varía periódicamente, está determinada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) R dt \quad (1)$$

Y la potencia entregada por una corriente directa es:

$$P = I_{ef}^2 R \quad (2)$$

Deduciendo estas dos ecuaciones y despejando I_{ef} se obtiene la siguiente ecuación:

$$I_{ef} = I_{RMS} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cos^2(\omega_0 t) dt \right)^{1/2} \quad (3)$$

Por lo tanto, el valor efectivo de una corriente es la corriente estable (CD) que transfiere la misma potencia promedio que la corriente variable determinada [12].

Desde luego, el valor efectivo del voltaje en un circuito se la obtiene de una forma similar a la corriente.

$$V_{ef} = V_{RMS} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T V_m^2 \cos^2(\omega_0 t) dt \right)^{1/2} \quad (4)$$

Potencia instantánea y potencia promedio

La potencia instantánea entregada a al elemento de la figura 1, es el producto del voltaje $v(t)$ y la corriente $i(t)$, de tal modo que:

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (5)$$

El valor promedio de una función periódica es la integral de la función en un periodo compuesto, dividida por el periodo [12]. Por lo tanto la potencia promedio se define como el valor medio de la potencia instantánea y está dada por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (6)$$

Coefficientes y series de Fourier

Una forma de onda senoidal está compuesta por la suma de ondas senoidales (armónicos), teniendo en cuenta que la frecuencia correspondiente de cada armónico es un múltiplo de la frecuencia fundamental de 60 Hz [15].

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sen(k\omega_0 t)) \quad (7)$$

Para una función dada $v(t)$, el coeficiente constante V_0 es:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = 0 \quad (8)$$

Y los coeficientes de la serie son:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad (9)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sen(k\omega_0 t) dt \quad (10)$$

Distorsión armónica total (THD)

THD es la relación sumatoria de potencias de los componentes armónicos para la potencia de la frecuencia fundamental [16].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_k (V_k)^2}}{V_1} * 100, \quad k = 2, 3, \dots, N \quad (11)$$

En la red eléctrica, la frecuencia fundamental es de 60 Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1er, 2do, 3er, 4to, 5to, 6to, 7mo, ... orden natural de los números [16]. El segundo armónico tiene una frecuencia de 120 Hz, el tercer armónico una frecuencia de 180 Hz y así sucesivamente.

Teorema de valor medio para integrales

Una función $v(t)$ definida en un intervalo de tiempo, se la puede descomponer en subintervalos iguales donde cada uno posee una longitud Δt . Si t_n es un punto cualquiera del n -ésimo sub-intervalo, entonces el valor aritmético o medio de los valores de la función $v(t)$ viene dado por la siguiente ecuación [14].

$$V_n = \frac{1}{N} [v(t_1) + v(t_2) + v(t_3) + \dots + v(t_N)]$$

Por lo tanto:

$$V_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v(t_n) \quad (12)$$

B. Análisis matemático de las variables eléctricas

A partir de los valores instantáneos de voltaje $v(t)$ y corriente $i(t)$, se deduce las expresiones matemáticas para cada variable eléctrica.

Voltaje y corriente

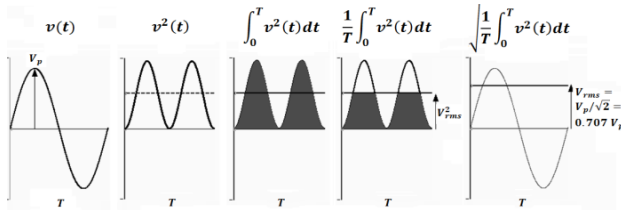


Fig. 2. Valor eficaz o RMS de una señal de voltaje. Diseño del autor.

El propósito de este diseño es adquirir las señales de tensión y corriente en tiempo discreto. El número de muestras que se adquieren depende de la velocidad de ADC. La tensión eficaz se evalúa aplicando el teorema de valor medio para integrales para N muestras adquiridas:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(t_n)} \quad (13)$$

Desde luego, el cálculo del valor RMS de la corriente se obtiene del mismo método:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i^2(t_n)} \quad (14)$$

Potencia promedio

Para el cálculo de la potencia promedio o real de dos señales periódicas en el tiempo discreto se encuentra definida mediante el teorema de valor medio para integrales:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p(t_n) \quad (15)$$

Potencia aparente

La potencia aparente es la representación vectorial de todo un circuito, es decir es el producto de las componentes de voltaje y corriente eficaces. Por lo tanto está definida como:

$$|S| = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (16)$$

Potencia reactiva

Según el triángulo de potencias, la potencia reactiva está definida por la raíz de la diferencia del cuadrado de sus componentes aparente y real, por lo tanto:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (17)$$

Factor de potencia

El factor de potencia (o cos phi) de un circuito de corriente alterna es la relación entre la potencia real P, y la potencia aparente S, entonces:

$$f.d.p = \frac{P}{|S|} \quad (18)$$

Distorsión armónica total

Si una señal está compuesta por una sumatoria de ondas senoidales, fácilmente se la descompone usando la Transformada Discreta de Fourier. Aplicando el teorema de valor medio para integrales, se puede evaluar los coeficientes de la serie, obteniendo dos expresiones para el tiempo discreto.

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N v(t_n) \cos(k\omega_o t_n) \quad (19)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N v(t_n) \sin(k\omega_o t_n) \quad (20)$$

Donde la amplitud de cada armónico está definida mediante la siguiente expresión:

$$V_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (21)$$

Y para la medida de la distorsión armónica total se utiliza la expresión 11:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_k (V_k)^2}}{V_1} * 100, \quad k = 2, 3, \dots, N$$

En nuestro diseño, el cálculo de THD se establece hasta el armónico de orden $N=7$

IV. IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

El diseño del sistema analizador de calidad de energía eléctrica permite integrar diferentes módulos, conformados por componentes que van desde hardware, software y firmware.

Como una síntesis del diseño realizado, el sistema consta de un módulo de adquisición de señales de voltaje y corriente para una red trifásica, el cual está constituido por transformadores de voltaje y corriente con sus respectivos circuitos de acondicionamiento. Además el diseño cuenta con módulos de sincronización de señales basados en circuitos PLL (Phase Locked Loop) encargados de generar señales de reloj con frecuencias enganchadas a las señales analógicas de entrada con el objeto de sincronizar señales y calcular los valores de THD de cada señal adquirida. Finalmente, y con el objetivo de monitorear gráficamente y registrar los datos, el diseño contempla con una aplicación de escritorio de visualización y registro de datos, desarrollada en el entorno de programación LabVIEW.

A. Diseño del hardware

Acondicionamiento de señal de voltaje

El acondicionamiento de la señal de voltaje para las entradas del convertidor análogo-digital de los módulos de procesamiento, emplea un transformador reductor de voltaje, cuya relación de transformación es de 0.125, es decir una señal de salida de 21.21 VP (15 Vrms) corresponde a una señal de entrada de 170 VP (120 Vrms) de entrada, esta señal reducida de salida pasa por un divisor de voltaje para obtener un voltaje de 2.25 VP, es así que el circuito completo tiene la siguiente equivalencia entre los voltajes de entrada y salida ($170VP_{in} \Rightarrow 2.25VP_{out}$). Sin embargo, el rango dinámico de la entrada al convertidor A/D de los módulos de procesamiento es unipolar, es decir solo acepta voltajes positivos entre 0V y 5V, por lo tanto se emplea otro divisor de voltaje para cambiar la referencia a 2.5V, con lo cual generamos un offset de desplazamiento de la señal atenuada, quedando una señal resultante que oscila entre 0.25 y 4.75 V.

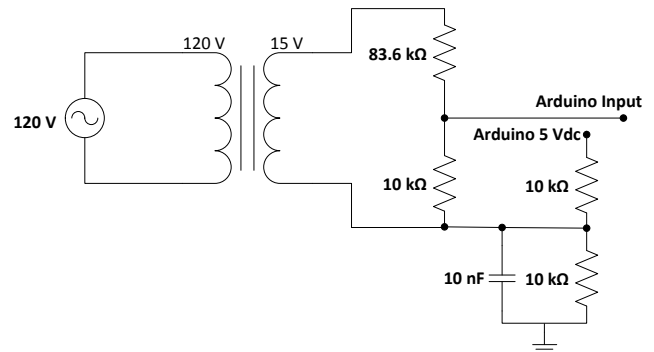


Fig. 3. Circuito de acondicionamiento de voltaje. Diseño del autor.

Acondicionamiento de señal de Corriente

Para este acondicionamiento se usa el mismo método de acondicionamiento de voltajes. Sin embargo para la adquisición de señales de corriente utilizamos pinzas amperimétricas con un factor de acoplo de $3.7037e-4$, la salida del transformador es una señal de corriente, por lo que es necesario transformarla a una señal de voltaje mediante la configuración de una resistencia shunt.

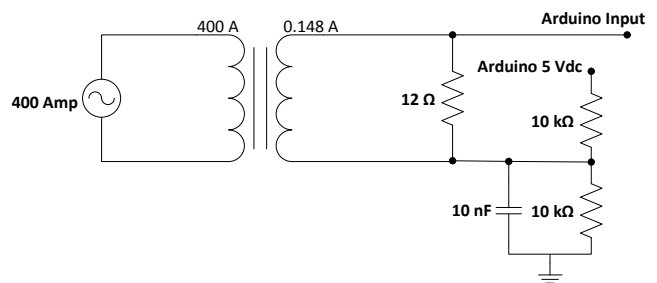


Fig. 4. Circuito de acondicionamiento de corriente. Diseño del autor.

Circuito de lazo seguidor de fase

Para el procesamiento frecuencial de las señales analógicas adquiridas y acondicionadas, se emplea el circuito de lazo seguidor de fase, donde la frecuencia o fase de la señal de salida es controlada por la frecuencia de la señal de entrada analógica. Su estructura básica está implementada con un detector de fase, oscilador de frecuencia y retroalimentación.

El propósito de este circuito es generar señales de reloj de entrada para una función de interrupción, temporizador y contador (Timer/Counter1) del módulo de procesamiento frecuencial para la captura exacta de 128 muestras por una onda completa de cada señal analógica, y así poder realizar con exactitud los cálculos de THD de cada señal adquirida.

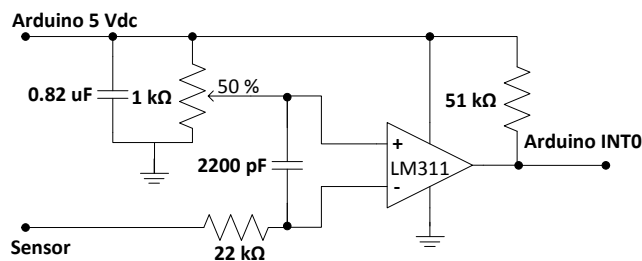


Fig. 5. Circuito de lazo seguidor de fase. Diseño del autor.

C. Diseño del software

Como objetivo específico de este proyecto para la implementación de algoritmos en la determinación de parámetros de calidad, el diseño del software se ha realizado en la entorno de Arduino como plataformas de libre desarrollo (Open Source). El diseño del algoritmo para el cálculo de THD es desarrollada en la plataforma Arduino UNO, mientras que el diseño del algoritmo para el cálculo de parámetros de calidad es desarrollada en la plataforma Arduino MEGA 2560.

Algoritmo para el cálculo de THD

El algoritmo desarrollado en la placa Uno, se encarga de realizar el cálculo de las variables de THD para voltaje y corriente, y frecuencia por fase. Para implementar la DFT se utiliza la librería FFT para el cálculo de THD de cada señal en el tiempo discreto.

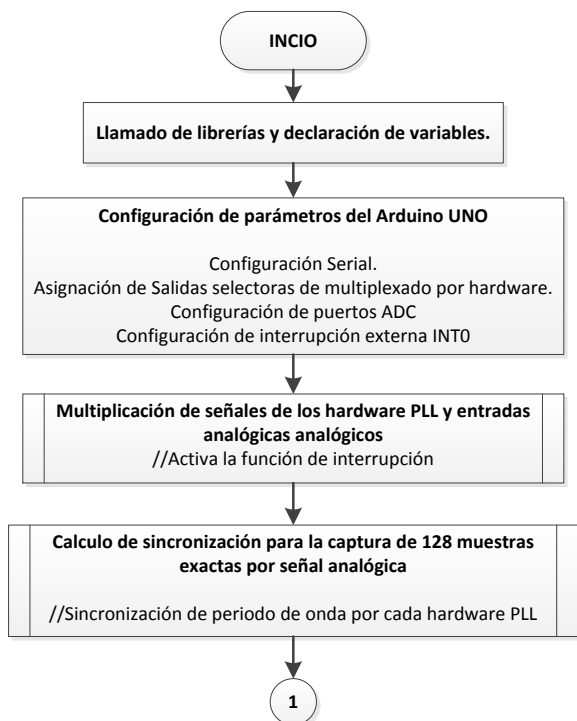


Fig. 6. Diagrama de flujo del Módulo de procesamiento frecuencial. Diseño del autor.

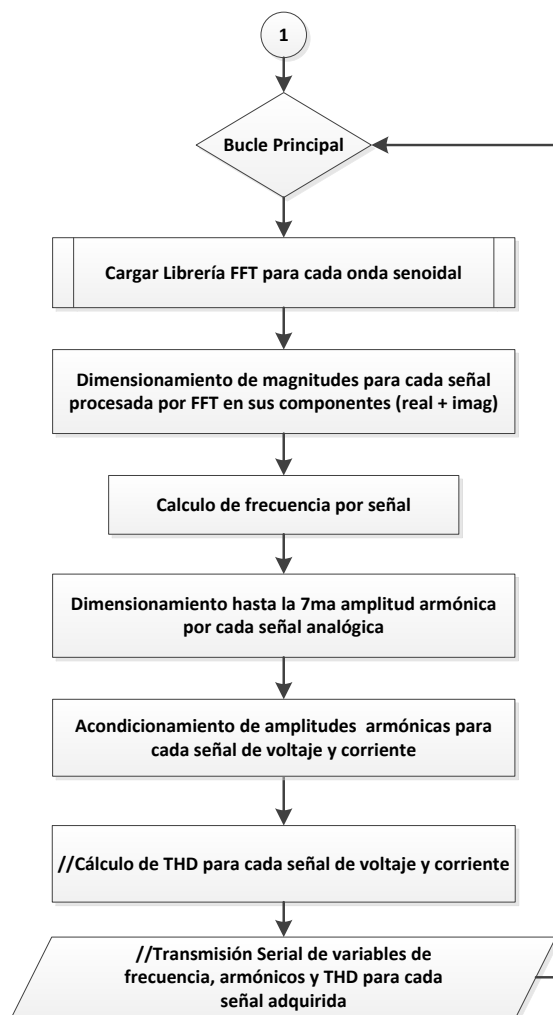


Fig. 6. Diagrama de flujo del Módulo de procesamiento frecuencial. Diseño del autor. Continuación...

Algoritmo para el cálculo de parámetros de calidad de energía

Los algoritmos sintetizados en el módulo de procesamiento de parámetros de energía, realiza las siguientes tareas:

- Acondicionar las señales a amplitudes pico de ± 170 Volts y ± 565 Amps, respectivamente,
- Discretizar las señales a 9600 muestras/s,
- Calcular los voltajes y corrientes RMS, triángulo de potencias y factor de potencia.
- Receptar las tramas del módulo de procesamiento frecuencial, y,
- Transmisión de datos de todos los parámetros de calidad de energía, por medio del módulo de comunicación Ethernet.

Para realizar la transmisión de datos a través de una intranet, el módulo de comunicación Ethernet debe estar configurado con los siguientes parámetros:

- Dirección IP: 192.168.11.1
- Mascara de Subred: 255.255.255.0
- Dirección MAC:
0xDE.0xAD.0xBE.0xEF.0xFE.0xED
- Puerto local: 80

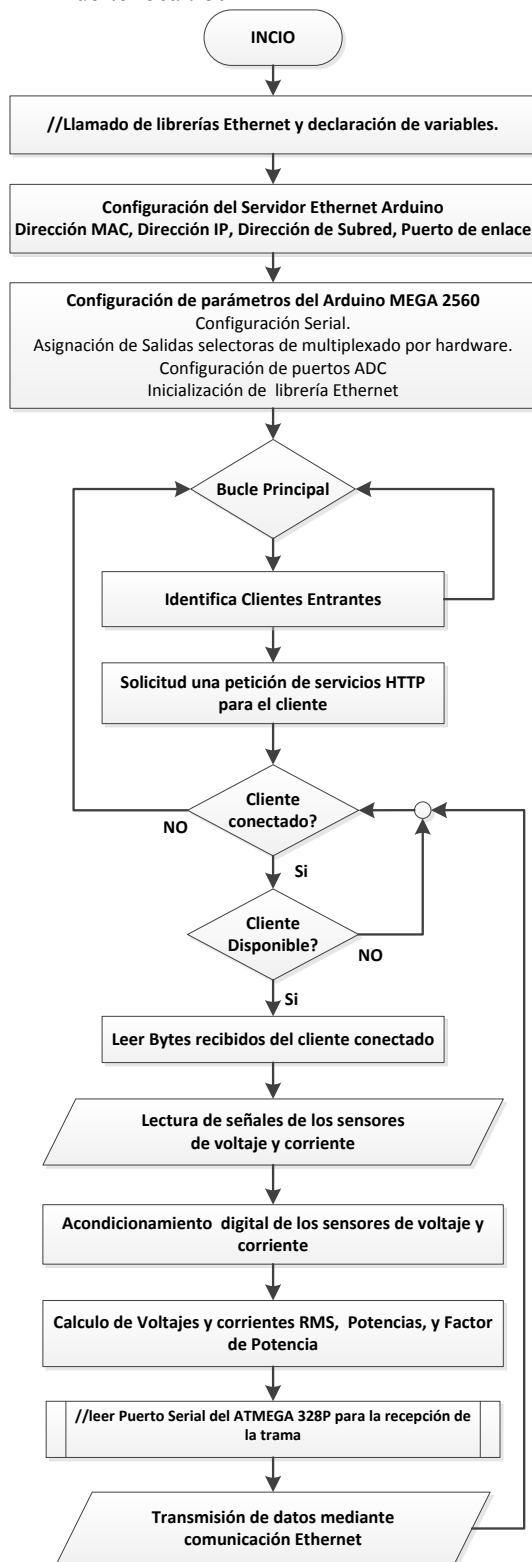


Fig. 7. Diagrama de flujo de la tarjeta Arduino MEGA 2560. Diseño del autor.

Registro y visualización de parámetros en LabVIEW

Para la visualización y registro de la información correspondiente al monitoreo de parámetros de calidad de energía eléctrica, se desarrolló una aplicación de escritorio, que permita realizar las siguientes tareas:

- Leer la dirección de red o la URL del módulo de comunicación Arduino Ethernet, con el objetivo de extraer la información del código fuente HTML de la página web.
- Desentramar la información fuente de la página web y extraer los valores de cada uno de los parámetros de calidad de energía en formato string.
- Convertir los valores correspondientes a los parámetros de calidad de energía, de tipo carácter a tipo numérico.
- Tabular los parámetros de voltaje, corriente, potencias, factor de potencia y frecuencia por cada una de las fases.
- Graficar el comportamiento en función del tiempo, de los parámetros de voltaje, corriente, potencias y armónicos por cada una de las fases

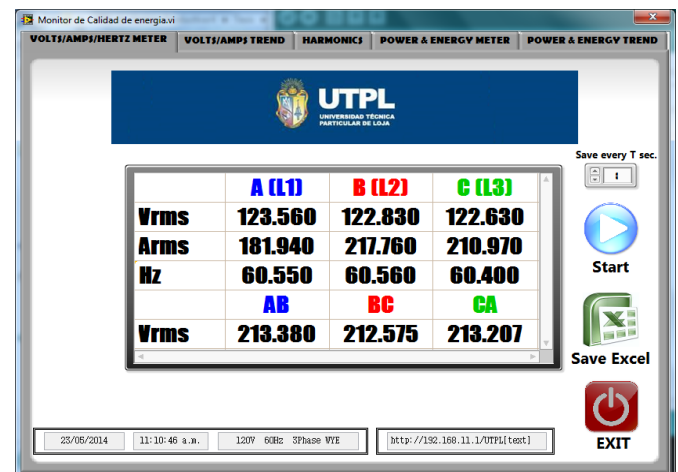


Fig. 8. Interfaz gráfica de usuario. Diseño del autor.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para validar los diseños del proyecto, se realizaron tres ensayos para cada uno de los parámetros calculados, estos ensayos se los realizó en el tablero de distribución principal del edificio de Unidades productivas de la UTPL, en los cuales se adquirieron muestras del instrumento de referencia - Analizador de calidad de energía eléctrica -Fluke 434-, y del prototipo analizador de calidad de energía propuesto en el presente proyecto, sincronizadas en tiempo de muestreo, con el propósito de realizar el análisis comparativo de todos los parámetros de interés, definidos en el capítulo anterior.

En base a los resultados de mediciones realizadas a los edificios del Campus UTPL [18], se decidió realizar la validación de los resultados en el Edificio de Unidades Productivas, debido a que en el comportamiento de carga en dicho edificio, contamos con las siguientes características:

- El rango de corriente eficaz demandada, oscila entre 90 y 300 Amperios, la cual nos permite evaluar el sistema en algunos rangos.
- La carga instalada posee un componente alto de característica inductiva, lo cual nos permite evaluar el sistema ante diferentes factores de potencia.
- La carga instalada posee características de no linealidad, lo cual nos permite evaluar el sistema ante diferentes niveles de distorsión armónica.

En base a los resultados obtenidos, se tomó como límite el $\pm 5.0\%$ de error máximo permitido, el cual es el límite para mediciones realizadas en equipos eléctricos de sectores industriales Clase 5, según la Asociación alemana para eléctrica, electrónica y tecnologías de la información VDE en su norma VDE0410.

A. Pruebas experimentales



Fig. 9. Instalación de los equipos analizadores. Fotografía del Autor.

Esta prueba se realizó una lectura de información durante aproximadamente 90 min obteniendo 1206 muestras, para cada variable eléctrica y 360 muestras para THDi en intervalos de 5 segundos. A continuación de resume los resultados totales del análisis de las validaciones de calidad de energía eléctrica.

Voltaje de fase

En la Figura 10 se muestra el comportamiento durante uno de los tres periodos de medición comprendido entre las 07:20:27 p.m. y 09:00:47 p.m. para ambos sistemas de medición de parámetros de calidad de energía.

Las muestras adquiridas por ambos sistemas de medición registran un error máximo de 0.435%.

Tabla 2

Resultados del análisis del parámetro de voltaje. Elaborado por el Autor.

Fase	Analizador	Valor registrado (V)			Error máximo (%)
		Max	Min	Prom	
Fase A	FLUKE 434	126.15	123.41	124.49	0.405
	Analizador del Proyecto	125.96	123.32	124.48	
Fase B	FLUKE 434	125.34	123.04	124.01	0.412
	Analizador del Proyecto	125.28	122.84	123.96	
Fase C	FLUKE 434	125.77	123.33	124.40	0.435
	Analizador del Proyecto	125.74	123.2	124.35	

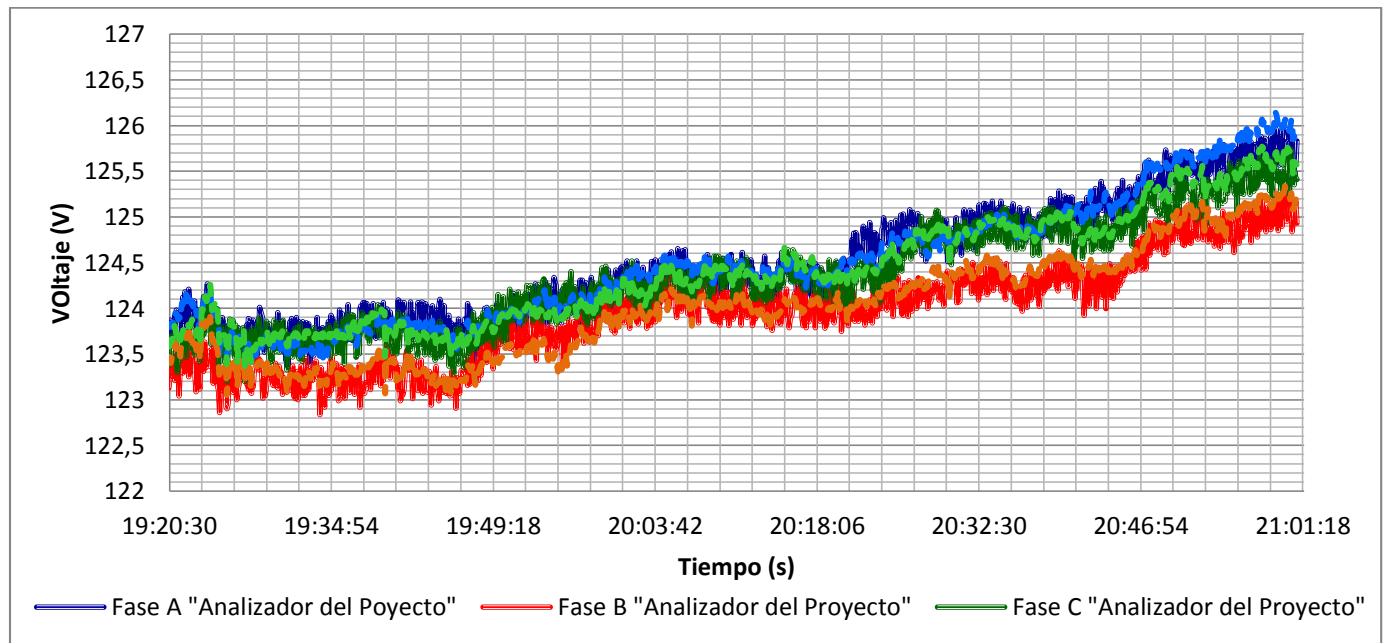


Fig. 10. Parámetros de voltajes obtenidos por el Fluke 434 y analizador del proyecto. Diseño del autor.

Corriente de fase

En la Figura 11 muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro corriente de fase para ambos sistemas analizadores.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye que el error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 14.086%, sin embargo el 97.3% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

Tabla 3

Resultados del análisis del parámetro de corriente. Elaborado por el Autor.

Fase	Analizador	Valor registrado (V)			Error máximo (%)
		Max	Min	Prom	
Fase A	FLUKE 434	160.10	95.20	130.00	5.543
	Analizador del Proyecto	161.55	95.23	130.64	
Fase B	FLUKE 434	197.40	145.50	167.42	14.086
	Analizador del Proyecto	194.39	145.68	167.82	
Fase C	FLUKE 434	184.70	127.30	154.11	8.348
	Analizador del Proyecto	190.54	126.81	154.12	

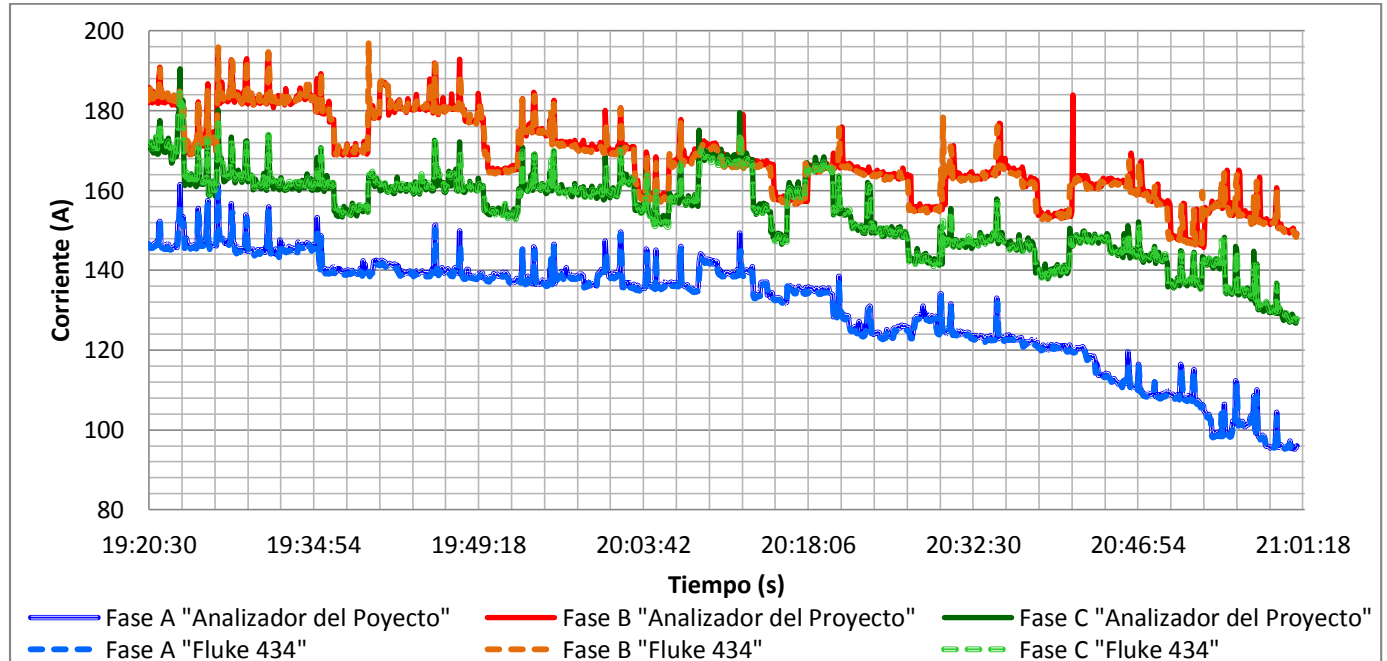


Fig. 11. Parámetros de corrientes obtenidos por el Fluke 434 y analizador del proyecto. Diseño del autor.

Potencia aparente de fase

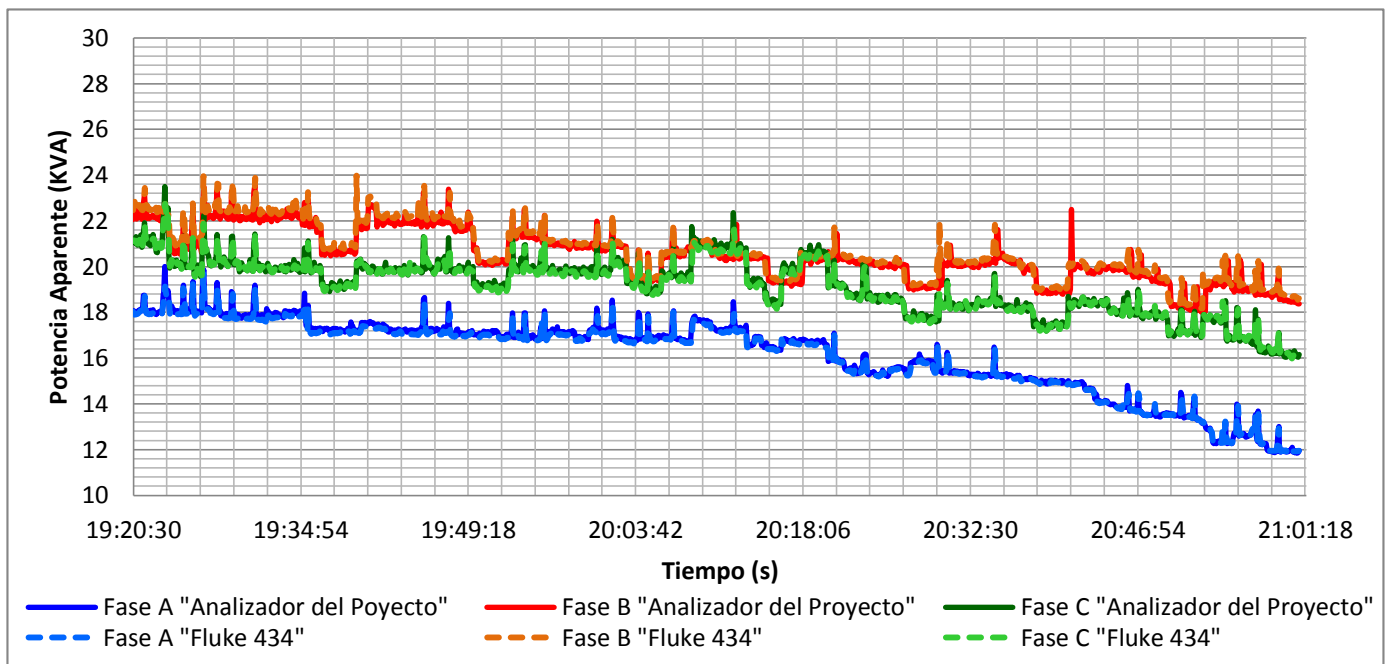
En la Figura 12 muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro potencia aparente de fase para ambos sistemas analizadores.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye que el error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 8.895%, sin embargo el 98.2% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

Tabla 4

Resultados del análisis del parámetro de potencia aparente. Elaborado por el Autor.

Fase	Analizador	Valor registrado (V)			Error máximo (%)
		Max	Min	Prom	
Fase A	FLUKE 434	19.68	11.92	16.07	5.174
	Analizador del Proyecto	20.01	11.84	16.15	
Fase B	FLUKE 434	23.97	18.17	24.03	5.994
	Analizador del Proyecto	23.58	17.97	23.75	
Fase C	FLUKE 434	22.75	15.93	19.09	8.895
	Analizador del Proyecto	23.51	16.04	19.14	



Distorsión armónica total de corriente (THDi) de fase

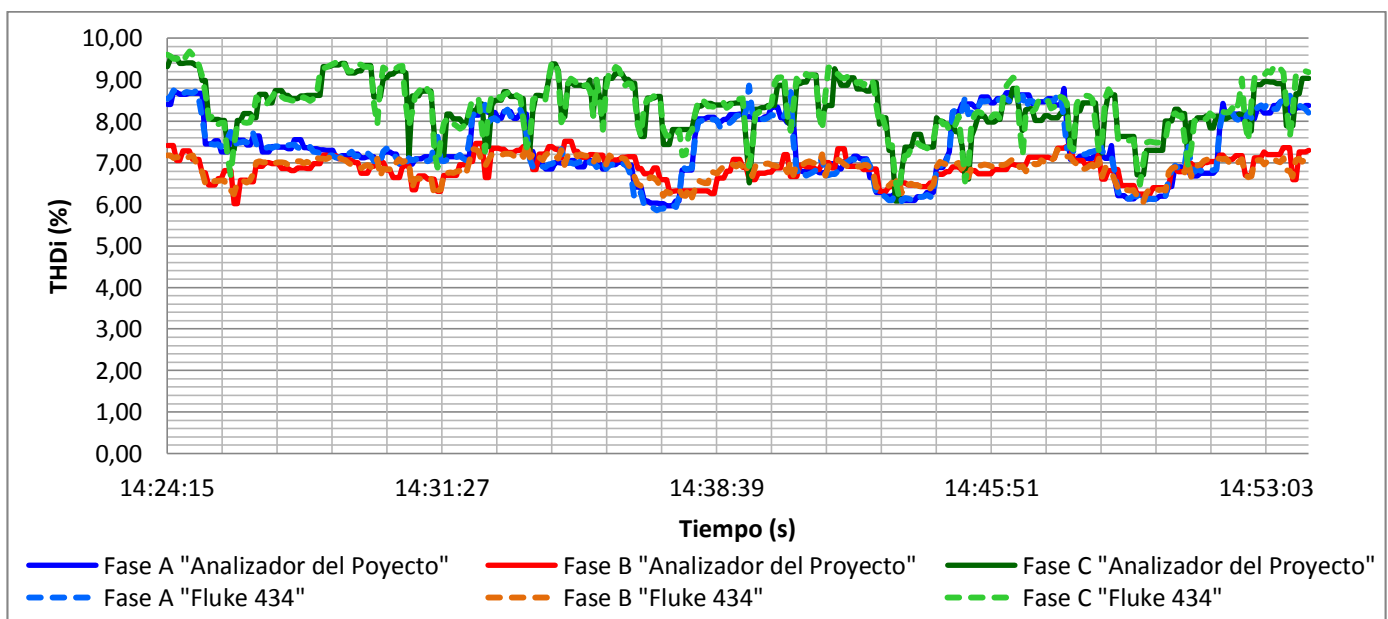
En la Figura 13 muestra los resultados obtenidos en el monitoreo del parámetro distorsión armónica total de corriente de fase para ambos sistemas analizadores.

Con respecto al análisis de las muestras adquiridas con el prototipo resultante del presente proyecto, en comparación con el instrumento de referencia, se concluye que el error máximo registrado, para el parámetro analizado es de 9.968%, sin embargo el 96% de las muestras poseen un error máximo inferior del 5%.

Tabla 5

Resultados del análisis del parámetro de THDi. Elaborado por el Autor.

Fase	Analizador	Valor registrado (V)			Error máximo (%)
		Max	Min	Prom	
Fase A	FLUKE 434	8.868	5.859	7.392	8.769
	Analizador del Proyecto	8.796	5.961	7.388	
Fase B	FLUKE 434	7.490	6.047	6.864	8.293
	Analizador del Proyecto	7.516	6.014	6.881	
Fase C	FLUKE 434	9.686	6.242	8.380	9.968
	Analizador del Proyecto	9.518	6.083	8.342	



B. Resultados del análisis de calidad de energía de las pruebas experimentales

Una vez realizada las mediciones en tres periodos distintos, se resume los resultados obtenidos en la tablas 6.

Tabla 6
Resultados finales del ensayo experimental. Elaborado por el Autor.

Variable	Fase	Margen de error máximo (%)		
		Primer ensayo	Segundo ensayo	Tercer ensayo
Voltaje (V)	Fase 1	0.428	0.426	0.405
	Fase 2	0.425	0.466	0.412
	Fase 3	0.430	0.489	0.435
Corriente (A)	Fase 1	6.415	5.836	5.543
	Fase 2	14.517	12.011	14.086
	Fase 3	7.030	3.825	8.348
Potencia Real (kW)	Fase 1	7.142	7.291	4.974
	Fase 2	6.484	10.755	13.456
	Fase 3	6.985	6.901	8.216
Potencia Aparente (kVA)	Fase 1	6.728	6.415	5.174
	Fase 2	5.994	10.432	5.994
	Fase 3	8.123	3.713	8.895
Potencia Reactiva (kVAR)	Fase 1	20.000	25.000	10.526
	Fase 2	20.652	21.429	16.615
	Fase 3	25.806	25.000	21.875
Factor de Potencia (PF)	Fase 1	2.041	2.000	1.010
	Fase 2	1.420	1.240	0.788
	Fase 3	2.041	3.093	3.760
Distorsión Armónica Total de voltaje (%)	Fase 1	16.725	25.874	25.395
	Fase 2	18.405	29.817	27.528
	Fase 3	9.622	21.019	15.361
Distorsión Armónica Total de corriente (%)	Fase 1	9.413	8.031	8.769
	Fase 2	10.503	8.366	8.293
	Fase 3	11.936	10.825	9.968

VI. CONCLUSIONES

- La funcionalidad de los algoritmos tuvo éxito en la medida de voltaje, corriente, potencia real, aparente, factor de potencia y distorsión armónica total de corriente (THDi) por fase ubicándose dentro de un margen de error aceptable en un porcentaje mayor al 90% de las muestras adquiridas, sin embargo en el porcentaje restante de muestras se han obtenido errores superiores al 5%.
- En base a los valores correspondientes al error máximo, se puede concluir que la funcionalidad de los algoritmos no tuvo éxito en las medidas de potencia reactiva (error máximo 25.806%) y distorsión armónica total de voltaje (THDv) (error máximo 29.817%), sin embargo se atribuye este error a la sensibilidad del sistema ya que en estas jornadas de medición los rangos recorridos por la variable medida, está alrededor de la unidad, es por ello que por ejemplo una variación de 0,3 genera un valor del 30% aproximadamente.
- Para la medida de señales de voltaje, es conveniente utilizar sensores resistivos con el propósito de

cumplir con la proporcionalidad a la tensión primaria fase-neutro, por poseer las mejores características con respecto a los sensores inductivos, en lo inherente a las condiciones de gran rango dinámico y alta linealidad

- Para la medida de señales de corriente, debe utilizarse sensores de transformación que posean gran ancho de banda e incertidumbre menor al 2% según exigencias de normas internacionales como la IEC 61000-4-30 clase B. Dichos sensores no deben poseer núcleo de hierro o de ferrita, para disminuir la susceptibilidad a los fenómenos de saturación y no linealidad.
- La correcta elección de sensores de voltaje y corriente, complementado con la correcta metodología de calibración, confluye en un sistema con características óptimas en lo que respecta a exactitud y precisión de las variables adquiridas.
- Los voltajes registrados por el prototipo analizador de energía con respecto al instrumento de referencia poseen similares tendencias, luego del análisis de ambos conjuntos de datos, se registra un error máximo del 0.489%.
- Las corrientes registradas por el prototipo analizador de energía con respecto al instrumento de referencia poseen similares tendencias, luego del análisis de ambos conjuntos de datos, se registran errores inferiores al 5% para el 98% de las muestras adquiridas, así también se registran errores no aceptables para el 2% restante de las muestras adquiridas.
- Se realizó el cálculo de THD hasta el séptimo armónico; por la principal razón que en la red eléctrica de una edificación, las amplitudes armónicas más significativas son aquellas generadas por cargas no lineales de orden impar especialmente de 3ro, 5to y 7mo orden, ejemplos de estas cargas no lineales son: equipos electrodomésticos, ordenadores, controladores, motores y transformadores.
- El proceso para cálculo de armónicos es el que compromete mayor cantidad de recursos computacionales del sistema, en tal sentido que cada cálculo del parámetro THD (7 armónicos) involucra un tiempo de 2 segundos aproximadamente, por señal, ese tiempo multiplicado por 6 señales a analizar, se obtiene un retardo de aproximadamente 12 segundos. En tal sentido que el intervalo de tiempo para determinar el parámetro THD por fase es de 12 segundos.
- Según la norma IEC 61000-4-30 para rendimiento clase A, la incertidumbre de la medida no debe exceder del $\pm 0.1\%$ para el valor nominal de voltaje y corriente. Para clase B, la incertidumbre no debe exceder del $\pm 0.5\%$ para el valor de voltaje y del $\pm 2.0\%$ para el valor de corriente. Por lo tanto, según las pruebas realizadas, el 100% de las muestras adquiridas del parámetro voltaje y el 97% de las

muestras adquiridas del parámetro corriente, cumplen los umbrales de un analizador Clase B.

- Las funciones que dispone LabVIEW para comunicación, facilitan el desarrollo de una aplicación con capacidad de monitoreo remoto de información, las funciones utilizadas en el presente proyecto son las de DataSocket que permiten leer y escribir datos por medio de por medio de un cliente web.

VII. REFERENCIAS

- [1]. G. J. López, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE Y HARDWARE DE UN REGISTRADOR DE VARIABLES ELÉCTRICAS CON COMUNICACIONES ETHERNET BASADO EN TECNOLOGÍA ARDUINO Y SISTEMA DE SUPERVISIÓN HMI”, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Del Ejército, 2013. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6135/1/T-ESPEL-ENI-0298.pdf>
- [2]. C. G. Muso, S.M. Plasencia, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DAQ Y HMI DE UN ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA PARA LA EMPRESA ELÉCTRICA BOLÍVAR EMELBO S.A.”, Escuela Politécnica Del Ejército, 2007. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3395/1/T-ESPEL-0161.pdf>
- [3]. S. Ramírez, E. A. Cano, “Calidad del Servicio de Energía Eléctrica”, Universidad Nacional de Colombia, 1ª edición, 2006. [Online]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5073/1/samuelramirezcastano.2006.pdf>
- [4]. S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta “Electric Power Quality”, in Electric Power Quality, Springer Dordrecht Heidelberg, 2010, New York, pp. 5-12.
- [5]. O. Castañeda, W. Castañeda, “Análisis de Calidad de Energía acerca de la Calidad del Producto e Influencia de Armónicos de Corriente dentro del Área de Concesión de CNEL-Milagro”, Corporación Centro Nacional de Control de Energía – CENACE, Eléctrica de Guayaquil. [Online]. Disponible en: <http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/522/1/10%20An%C3%A1lisis%20de%20Calidad%20de%20Energ%C3%ADa%20acerca%20de%20la%20Calidad%20del%20P.pdf>
- [6]. “CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA”, Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente. [Online]. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>
- [7]. M.A. Silva, G. Ordoñez, “CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA: DISEÑO y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO COMO ALTERNATIVA PARA LA MONITORIZACIÓN DE INTERRUPCIONES y CAÍDAS DE TENSIÓN”, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, vol. 4, 2005.
- [8]. “Medición de Parámetros de Calidad de Energía bajo el estándar IEC61000-4-30. Primera parte. Medición de Flicker en redes eléctricas”, ECAMEC Tecnología, 2009. [Online]. Disponible en: <http://www.ecamec.com/newsletter/bajarnotab0409.pdf>
- [9]. I. Usunáriz, “NORMATIVAS APLICABLES A LA CALIDAD ELÉCTRICA”, Calidad eléctrica. [Online]. Disponible en: <http://www.isotest.es/web/Soport/Formacion/REGLAMENTOS/Normas%20PQ.pdf>
- [10]. “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, IEEE Standards 1159, 2009
- [11]. S. Santoso, “Power Quality Requirements for Reliability: Towards ‘Perfect’ Power Quality”, GCEP, Standford University, University of Texas at Austin, 2007. [Online]. Disponible en: http://gcep.stanford.edu/pdfs/iq9bO_1lb0rRuH_ve0A2jA/Santoso-20071101-GCEP.pdf
- [12]. R. C. Dorf, J. A. Svoboda, “Potencia de ca de estado estable”, in Circuitos Electricos, 6ª Ed. Grupo Alfaomega, John Wiley & Sons 2006, pp. 466-522.
- [13]. J. Fernández, “Calculo simplificado del valor medio y eficaz de una forma de onda”. [Online]. Disponible en: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/31/40/a40.pdf>
- [14]. “Teorema del Valor Medio para integrales”. [online]. Disponible en: <http://www.fca.unl.edu.ar/Intdef/TeoremaValorMedio.htm>
- [15]. E.W. Kamen, B.S. Heck, “Análisis de Fourier de las señales de tiempo discreto”, in Fundamentos de Señales y Sistemas usando la Web y Matlab, 3ª Ed. Pearson Education, M.J. Horton. 2007, pp. 166-217.
- [16]. “Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica”, RTR Energía. [Online]. Disponible en: http://www.rtrenergia.es/rtr/ficheros/armonicos_2012.pdf
- [17]. “FUNDAMENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA”, Universidad Politécnica Salesiana. [Online]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/75/7/Capitulo1.pdf>
- [18]. K. Casierra, A. Iñiguez, “Monitoreo y análisis de variables eléctricas que permiten validar el estado actual para futuras correcciones en el suministro de energía eléctrica de cada uno de los edificios del campus UTPL”, Escuela de electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Técnica Particular de Loja, 2013. [Online]. Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/6531>
- [19]. International Standard IEC 61000-4-30, “Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods”. 1st Ed. 2003. [Online]. Disponible en: http://212.175.131.171/IEC/iec61000-4-30%7Bed1.0%7Den_d.pdf