



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

“Evaluación de la calidad de energía eléctrica del laboratorio de automatización de la facultad de Informática y Electrónica - ESPOCH”

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

Autor:

Joseph David Guerra Chávez

CI: 0604239152

joseph.guerra@ucuenca.edu.ec

Director:

Ing. Luis Gerardo González Morales Ph.D.

CI:1729711059

Cuenca, Ecuador

17-diciembre-2019



RESUMEN:

Se evaluó la calidad de energía eléctrica del laboratorio de automatización de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH, ubicado en la ciudad de Riobamba. El análisis considera la variación de la frecuencia, amplitud, forma de onda y simetría según las normativas de la ARCONEL 005/18 y 004/18, EN50160, IEC 61000-4-15 y IEEE 519-2014. El estudio se justifica debido a continuos incidentes en el equipamiento de alto costo disponible en el laboratorio.

Del análisis realizado en el tablero principal, con el equipo Fluke 435 aplicando una tasa de muestreo de 10min durante 7 días según normativa del ARCONEL. Se destacó el flicker de P_{It} , en las fases C con 7,24% y en B con 6,05%. Se obtuvo un promedio de la distorsión armónica de corriente total en las fases A, B, C y neutro de 44,61%, 65,24%, 55,27% y 231,94% respectivamente. Los armónicos de orden 3, 5, 7, 9 y 11 con mayor distorsión de corriente individual se presentan en la fase B con 46,22%, 34,52%, 22,15%, 15,26% y 9,14%, respectivamente. El factor de potencia total calculado fue 0,83p.u. y el mínimo 0,79p.u. en la fase B, valores que incumplen la normativa.

Como solución se propone instalar un filtro activo en paralelo de 30A, del tipo AFQm-4WF-030M-400 de CIRCUTOR o el SINAFM440030W de LIFASA, verificar las conexiones eléctricas y evitar posibles modificaciones o expansiones de las mismas sin un estudio previo. Esto garantizará la calidad de energía eléctrica del edificio y el buen funcionamiento de los equipos existente.

Palabras claves: Amplitud y forma de onda. Calidad de energía eléctrica. Distorsión armónica. Factor de potencia. Variación de frecuencia y simetría.



ABSTRACT:

The electrical power quality of the automation laboratory of the Faculty of Informatics and Electronics of ESPOCH, located in the city of Riobamba, was evaluated. The analysis considers the variation of frequency, amplitude, waveform and symmetry according to the standards of ARCONEL 005/18 and 004/18, EN50160, IEC 61000-4-15 and IEEE 519-2014. The study is justified due to continuous incidents in the high-cost equipment available in the laboratory.

From the analysis carried out on the main board, with the Fluke 435 equipment applying a sampling rate of 10min during 7 days according to ARCONEL regulations. The flicker of Plt was highlighted, in phases C with 7.24% and in B with 6.05%. The average harmonic distortion of total current in phases A, B, C and neutral was 44.61%, 65.24%, 55.27% and 231.94% respectively. The harmonics of order 3, 5, 7, 9 and 11 with the highest individual current distortion are presented in phase B with 46.22%, 34.52%, 22.15%, 15.26% and 9.14%, respectively. The total power factor calculated was 0.83p.u. and the minimum 0.79p.u. in phase B, values that do not comply with regulations.

As a solution it is proposed to install an active filter in parallel of 30A, of the type AFQm-4WF-030M-400 of CIRCUTOR or the SINAFM440030W of LIFASA, to verify the electrical connections and to avoid possible modifications or expansions of the same ones without a previous study. This will guarantee the electrical power quality of the building and the proper functioning of the existing equipment.

Keywords: Amplitude and waveform, Electrical power quality, Harmonic distortion, Power factor, Frequency variation and symmetry.



ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
AGRADECIMIENTOS	11
DEDICATORIAS.....	12
GLOSARIO.....	13
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Antecedentes.....	15
1.3 Justificación.....	18
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo General	19
1.4.2 Objetivos Específicos.....	19
1.5 Alcances del proyecto	19
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	21
2.1 Introducción.....	21
2.2 Definición de calidad de energía eléctrica.....	21
2.3 Importancia del estudio de la calidad de energía.....	21
2.4 Tipos de cargas.....	22
2.4.1 Cargas lineales.....	22
2.4.2 Cargas no lineales.....	23
2.5 Eventos que afectan a la calidad de energía.....	23
2.5.1 Externos.	24
2.5.2 Internos.....	24
2.6 Consecuencias de la mala calidad de energía.....	24
2.7 Parámetros que intervienen en la calidad de energía eléctrica.	25
2.7.1 Variación de la frecuencia.....	25
2.7.2 Variaciones de la Amplitud	25
2.7.3 Distorsión de la forma de onda.....	33
2.7.4 Simetría	38
CAPÍTULO 3: NORMATIVAS SOBRE LA CALIDAD DE ENERGÍA	40
3.1 Introducción.....	40
3.2 Normativas.....	40
3.3 Estándares Internacionales.....	40
3.3.1 Estándar IEEE 1159.....	40
3.3.2 Estándar IEEE 519-2014	42



3.3.3	Norma IEC 61000-4-15	43
3.3.4	Norma EN50160.....	44
3.4	Normativas Nacionales	45
3.4.1	Niveles de Voltaje	45
3.4.2	Flicker	46
3.4.3	Distorsión armónica de voltaje.	46
3.4.4	Desequilibrio de voltaje.	47
3.4.5	Factor de potencia	47
3.5	Valores a considerar para la evaluación de calidad de energía	48
CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		49
4.1	Introducción.....	49
4.2	Selección del equipo de medición	49
4.3	Método para la medición de la calidad de energía.....	51
4.4	Seguridad y equipos de protección personal.....	52
4.5	Identificación de la problemática del entorno.....	53
4.6	Análisis eléctrico del entorno.....	54
4.7	Planificación de las mediciones.	61
4.8	Pruebas y análisis de resultados	62
4.8.1	Evaluación para cada equipo del laboratorio	62
4.8.2	Evaluación del tablero principal con cargas activas.....	78
CAPÍTULO 5: PLANTEAMIENTO DE MEJORAS		106
5.1	Introducción.....	106
5.2	Resumen de los problemas identificados	106
5.2.1	Análisis del entorno	106
5.2.2	Equipos de laboratorio.....	107
5.2.3	Tablero principal	109
5.3	Filtros para armónicos.	110
5.4	Cálculo del filtro activo en paralelo	111
5.5	Selección del filtro.....	112
5.6	Lugar de instalación	114
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		116
6.1	Conclusiones	116
6.2	Recomendaciones	117
BIBLIOGRAFÍA.....		119
ANEXOS.....		125



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Onda de voltaje y corriente producto de una carga lineal [25].....	23
Figura 2.2 Onda de voltaje y corriente producto de una carga no lineal [25].	23
Figura 2.3 Corriente transitoria impulsiva causada por una descarga atmosférica [37].	26
Figura 2.4 Transitorio oscilatorio de baja frecuencia generado por un banco de capacitores [39].	27
Figura 2.5 Onda de sobrevoltaje de 2 min [26]	28
Figura 2.6 Onda de bajo voltaje de 2 min [26].	28
Figura 2.7 Onda característica de una interrupción sostenida [41].	29
Figura 2.8 Onda característica de un Swell [26]	29
Figura 2.9 Onda característica de un Sag [26].	30
Figura 2.10 Interrupción corta momentánea [41].	31
Figura 2.11 Fluctuaciones de voltaje causadas por la operación de un horno de arco [26]	31
Figura 2.12 Onda característica con presencia de muescas [46].	33
Figura 2.13 Onda de voltaje con presencia ruido [47].	34
Figura 2.14 La onda fundamental, la onda del armónico y su resultante [50].	35
Figura 2.15 Onda de voltaje con presencia de Interarmónicos [59].	38
Figura 2.16 Desequilibrio de voltaje en un sistema de distribución trifásico [61].	38
Figura 4.1 Equipo de medición FLUKE 435 utilizado.	51
Figura 4.2 Indumentaria que se encuentra acorde a la normativa indicada.	53
Figura 4.3 Instalación de la nueva puesta a tierra para el Data-Center de la facultad.	54
Figura 4.4 Las cinco estaciones de trabajo de los Sistemas Físicos Cibernéticos.	55
Figura 4.5 Planta de Industria 4.0.	56
Figura 4.6 Cargas de equipos individuales y especiales.	57
Figura 4.7 Punto de iluminación del laboratorio.	57
Figura 4.8 Evidencia de las fallas en los circuitos de tomacorrientes.	58
Figura 4.9 Subtablero de distribución ubicado en el primer nivel del edificio.	58
Figura 4.10 Tablero principal del edificio de la facultad.	59
Figura 4.11 Ubicación del transformador y el tablero general de distribución.	60
Figura 4.12 Circuitos de tomacorrientes y luminarias del laboratorio con la ubicación de los equipos.	61
Figura 4.13 Proceso de la instalación del equipo en una de las pruebas.	62
Figura 4.14 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N.	64
Figura 4.15 Voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG.	64
Figura 4.16 Corriente máxima, media y mínima de la L2.	64
Figura 4.17 Corriente máxima, media y mínima en la LN.	65
Figura 4.18 Frecuencia máxima, media y mínima.	65
Figura 4.19 Evidencia de conexión de cargas por regleta.	66
Figura 4.20 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N.	67
Figura 4.21 Voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG.	67
Figura 4.22 Corriente máxima, media y mínima de la L2.	68
Figura 4.23 Corriente máxima, media y mínima de la LN.	68
Figura 4.24 Frecuencia máxima, media y mínima.	69
Figura 4.25 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N.	70
Figura 4.26 Voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG.	70
Figura 4.27 Corriente máxima, media y mínima de la L2.	71
Figura 4.28 Corriente máxima, media y mínima de la LN.	71
Figura 4.29 Frecuencia máxima, media y mínima.	72
Figura 4.30 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N.	73
Figura 4.31 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L3N.	73
Figura 4.32 Voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG.	74



Figura 4.33 Corriente máxima, media y mínima de la L2. 74

Figura 4.34 Corriente máxima, media y mínima de la L3. 75

Figura 4.35 Corriente máxima, media y mínima de la LN. 75

Figura 4.36 Frecuencia máxima, media y mínima. 76

Figura 4.37 Cable de alimentación del equipo. 76

Figura 4.38 Evidencia del robot KUKA sin conexión a tierra en sus conectores. 77

Figura 4.39 Conexión del equipo analizador en el tablero principal de la facultad. 79

Figura 4.40 Valores máximos, medios y mínimos del voltaje en la L1N. 80

Figura 4.41 Valores máximos, medios y mínimos del voltaje en la L2N. 81

Figura 4.42 Valores máximos, medios y mínimos del voltaje en la L3N. 81

Figura 4.43 Valores máximos, medios y mínimos del voltaje en la LNG. 82

Figura 4.44 Corrientes máximas para cada una de las líneas. 83

Figura 4.45 Valores máximos, medios y mínimos de la corriente para la L1. 83

Figura 4.46 Valores máximos, medios y mínimos de la corriente para la L2. 84

Figura 4.47 Valores máximos, promedios y mínimos de la corriente para la L3. 84

Figura 4.48 Valores máximos, promedios y mínimos de la corriente para la LN. 85

Figura 4.49 Valores máximos, medios y mínimos de la frecuencia. 86

Figura 4.50 Valores máximos alcanzados del desequilibrio de voltaje. 87

Figura 4.51 Valores en p.u. del P_{st} para la L1N. 89

Figura 4.52 Valores en p.u. del P_{st} para la L2N. 89

Figura 4.53 Valores en p.u. del P_{st} para la L3N. 89

Figura 4.54 Valores en p.u. del P_{it} para la L1N. 90

Figura 4.55 Valores en p.u. del P_{it} para la L2N. 90

Figura 4.56 Valores en p.u. del P_{it} para la L3N. 91

Figura 4.57 Valores del THDV total de la L1N. 92

Figura 4.58 Valores del THDV total de la L2N. 92

Figura 4.59 Valores del THDV total de la L3N. 93

Figura 4.60 Espectro armónico de los valores medios del THDV mínimo, promedio y máximo. 93

Figura 4.61 Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L1N. 94

Figura 4.62 Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L2N. 94

Figura 4.63 Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L3N. 95

Figura 4.64 Espectro armónico de los valores medios del THDI mínimo, promedio y máximo por fase. 96

Figura 4.65 Espectro armónico de los valores medios del THDI mínimo, promedio y máximo del neutro. .. 97

Figura 4.66 Espectro de la distorsión armónica de corriente individual para la L1N. 98

Figura 4.67 Espectro de la distorsión armónica de corriente individual para la L2N. 98

Figura 4.68 Espectro de la distorsión armónica de corriente individual para la L3N. 99

Figura 4.69 Valores mínimos, medios y máximos del factor de potencia. 100

Figura 4.70 Valores medios de la potencia activa total y por línea. 101

Figura 4.71 Valores máximos registrados de la potencia activa diaria por fase y total. 102

Figura 4.72 Valores medios de la potencia reactiva para cada línea y el total. 102

Figura 4.73 Valores máximos registrados de la potencia reactiva diaria por fase y total. 103

Figura 4.74 Valores medios de la potencia aparente por cada línea y el total. 103

Figura 4.75 Valores máximos registrados de la potencia aparente diaria por fase y total. 104

Figura 5.1 Transformador LiteFuze LT-5000 5000W de 120V a 220V [86]. 109

Figura 5.2 Funcionamiento de un filtro activo en paralelo [96]. 111

Figura 5.3 Filtro activo en paralelo multifunción de CIRCUTOR y LIFASA. 114

Figura 5.4 Propuesta del diagrama de conexión del filtro activo para el edificio de la facultad. 114



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Categorías – Transitorios de Impulso	26
Tabla 2.2 Clasificación – Transitorios Oscilatorios	27
Tabla 2.3 Niveles de compatibilidad de la severidad del flicker	32
Tabla 2.4 Representación característica de los armónicos.....	35
Tabla 3.1 Clasificación de las perturbaciones y sus características en base a la norma IEEE1159.....	41
Tabla 3.2 Límites de la distorsión máximo para armónicos de corriente (impares)- IEEE 519-2014.....	42
Tabla 3.3 Límites de la distorsión de armónicos individual y total de voltaje – IEEE 519-2014.....	43
Tabla 3.4 Valores límites establecidos por la norma EN50160	44
Tabla 3.5 Límites para el índice de nivel de voltaje.....	45
Tabla 3.6 Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)	47
Tabla 3.7 Cuadro de resumen con los valores límites obtenidos y las normas consideradas.	48
Tabla 4.1 Comparativa de los equipos de medición de calidad de energía Clase A.	50
Tabla 4.2 Datos de placa del transformador.....	59
Tabla 4.3 Resultados de las mediciones realizada al Sistema Físico Cibernético.....	63
Tabla 4.4 Resultados de las mediciones realizadas a la Planta de Industria 4.0.	66
Tabla 4.5 Resultados de la medición realizada al compresor.	69
Tabla 4.6 Resultados de las mediciones realizada al robot KUKA.	72
Tabla 4.7 Armónicos generados por los equipos del laboratorio con alimentación de 120V	77
Tabla 4.8 Armónicos generados por los equipos del laboratorio con alimentación de 220V	78
Tabla 4.9 Valores de voltaje mínimos, promedios, máximos para cada línea y el neutro.....	79
Tabla 4.10 Análisis de los valores medios de voltaje RMS para cada línea.	80
Tabla 4.11 Valores obtenidos de la corriente mínima, promedio, máxima de las fases y neutro	82
Tabla 4.12 Valores de frecuencia registrados.	85
Tabla 4.13 Valores mínimos, promedios y máximos del desequilibrio de voltaje.....	86
Tabla 4.14 Valores de P_{st} y P_{lt} mínimos, promedios y máximos evaluados para cada línea.	88
Tabla 4.15 Total de flicker de corta y larga duración para cada línea.	88
Tabla 4.16 Valores mínimos, promedios y máximos del THDV total por línea.	91
Tabla 4.17 Valores mínimos, promedios y máximos del THDI total por cada fase y el neutro.	96
Tabla 4.18 Valores mínimos, promedios y máximos del factor de potencia por fase y a nivel total.....	99
Tabla 4.19 Resultados del análisis de los valores medios del factor de potencia por línea.	100
Tabla 4.20 Valores mínimos, promedios y máximos de la potencia activa, reactiva y aparente.	101
Tabla 4.21 Resumen de los problemas identificados en el análisis calidad de energía para el edificio.	104
Tabla 5.1 Comparativa de varios modelos de filtros activos en paralelo.	113



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Joseph David Guerra Chávez en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de la calidad de energía eléctrica del laboratorio de automatización de la facultad de Informática y Electrónica - ESPOCH", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de diciembre de 2019.

Joseph David Guerra Chávez

C.I: 0604239152



Cláusula de Propiedad Intelectual

Joseph David Guerra Chávez, autor/a del trabajo de titulación "Evaluación de la calidad de energía eléctrica del laboratorio de automatización de la facultad de Informática y Electrónica - ESPOCH", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 17 de diciembre de 2019.

A handwritten signature in blue ink, reading "Joseph Guerra", enclosed within a blue oval scribble. The signature is positioned above a horizontal line.

Joseph David Guerra Chávez

C.I: 0604239152



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por guiarme y darme la fuerza necesaria para culminar una meta en mi formación profesional.

Agradezco a mi querida familia, principalmente a mis padres por brindar la oportunidad de estudiar en otra ciudad. Por el apoyo y los ánimos para seguir adelante, por todos esos consejos proporcionados, su amor y su paciencia que tenían en cada semestre alcanzado. Siempre serán los promotores de mis sueños.

Agradezco a la Universidad de Cuenca y a sus docentes por haberme enseñado valores, virtudes, por compartir sus conocimientos y experiencias que me acompañaran durante mi vida profesional. Expreso un agradecimiento especial al Ingeniero Luis González y a la Ingeniera Isabel Cabrera quienes orientaron, apoyaron y compartieron sus conocimientos para el desarrollo y culminación de la presente investigación.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrir sus puertas para el desarrollo de esta investigación, En especial al Ing. Freddy Chávez director de la Escuela de Ingeniería Electrónica Control y Redes Industriales y al Ingeniero Fausto Cabrera Aguayo Docente Coordinador por parte de la Institución.

Agradezco a la Sra. Elvira Valverde por abrirme las puertas de su casa durante mi tiempo de estudio, por sus consejos y cariño brindado en todo momento.



DEDICATORIAS

El presente trabajo se lo dedico a Dios por la fortaleza que me ha dado para seguir adelante. A mis padres José y Norma, a mi Hermano Daniel por haberme enseñado valores que día a día me va formando una mejor persona, con su apoyo constante en esta etapa de mi vida.

Dedico a toda mi familia porque me motivaron a seguir adelante, a esforzarme más cada día, formaron parte de mi inspiración para lograr culminar este proyecto y cumplir uno de los más grandes sueños.



GLOSARIO

ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad.
A	Amperios.
AC	Alternating Current (Corriente Alterna).
DC	Direct Current (Corriente Continua).
CENELEC	Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.
CEIN	Centro Eléctrico Industrial.
CFE	Comisión Federal de Electricidad (México).
FDP	Factor de Potencia.
IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional).
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).
L1	Línea 1 (FASE A).
L2	Línea 2 (FASE B).
L3	Línea 3 (FASE C).
L1N	Línea 1 con respecto al Neutro.
L2N	Línea 2 con respecto al Neutro.
L3N	Línea 3 con respecto al Neutro.
LN	Línea Neutro (NEUTRO).
LNG	Línea Neutro - Tierra.
m s. n. m.	Metros sobre el nivel del mar
MAE	Ministerio del Ambiente
min	Minutos
ms	Milisegundos
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción.



NFPA	National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección Contra Incendios).
ns	Nanosegundos
PCC	Punto de Conexión Común.
PWM	Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulso).
p.u.	Sistema por unidad
s	Segundos
SAI	Sistemas de Alimentación Ininterrumpida.
TDD	Total Demand Distortion (Distorsión de Demanda Total).
THD	Total Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Total).
THDV	Distorsión Armónica Total de Voltaje
THDI	Distorsión Armónica Total de Corriente
µs	Microsegundos
V	Voltios.
W	Watts (Vatio).
WEC	World Energy Council (Consejo Mundial de Energía).
WEF	World Economic Forum (Foro Económico Mundial).



CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 Introducción

El avance tecnológico a nivel mundial genera la aparición de nuevos equipos eléctricos para el uso en las actividades humanas, al estar conectados a la red obligan al sector eléctrico a incrementar la generación para satisfacer la demanda. La proliferación de equipos con características eléctricas no lineales que puede generar problemas en la onda de voltaje y corriente en el sistema eléctrico que lo suministra, específicamente en el punto común de conexión (PCC), a estos se les conoce como perturbaciones eléctricas, que son los principales causantes de generar errores de funcionamiento en los equipos, por tal razón se requiere supervisar, diagnosticar y plantear propuestas que garanticen la buena calidad de la energía eléctrica, con el fin de evitar pérdida de equipos o su mal funcionamiento.

Razón por la cual el presente proyecto realiza el análisis de la calidad de energía eléctrica que reciben los laboratorios de la facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), de la ciudad de Riobamba – Ecuador, dado que la misma no cuenta con especialistas del área. El estudio se centra en evaluar la calidad de energía eléctrica del laboratorio de automatización de la Facultad de Informática y Electrónica, con esto se plantea una propuesta de solución ante los problemas identificados en la red eléctrica.

Los parámetros específicos de calidad de energía eléctrica a analizar en este proyecto son los niveles de voltajes, corrientes, frecuencia, transitorios, distorsión armónica total (THD), factor de potencia, los armónicos de corriente y tensión, flicker, desbalances. Los datos son registrados por medio de un equipo analizador de calidad eléctrica. La información obtenida se analizó tomando en cuenta las normativas y regulaciones nacionales como la ARCONEL 005/18 y la ARCONEL 004/018; y las normativas internacionales como son la IEEE, IEC, CENELEC.

1.2 Antecedentes

Hasta la década de los 40 del siglo pasado, la energía eléctrica no presentó problemas en su calidad en lo que se refiere a distorsión armónica, a partir de esa época el desarrollo tecnológico está modernizando a la sociedad a nivel mundial, con la aparición de equipos eléctricos de bajo costo con convertidores de energía, compactos y rápidos. Los mismos que están basados en electrónica de potencia, esto ocasiona que se incremente su sensibilidad ante las variaciones eléctricas, son los causantes de añadir disturbios en la energía eléctrica, afectando así su calidad e incrementando la demanda energética [1].

En 1892, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *por sus siglas en inglés*) demuestra teóricamente que la variación de la corriente alterna debía ser senoidal [1].



En 1893, en los Estados Unidos se establece la normalización de la frecuencia de 25Hz a 60Hz debido a que la primera genera un efecto denominado “Flicking” que produce daños en la visión [1].

Las primeras normas de calidad de energía eléctrica aparecen en 1936 y es definida por la IEEE y se refiere a la calidad de onda que debe tener la corriente alterna (AC) [1].

En 1995 se establece acuerdos entre fabricantes, empresas eléctricas y usuarios, los que definen los valores de calidad de energía eléctrica que garantizan el buen funcionamiento de los equipos. Un año después, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, *por sus siglas en inglés*) inicia los estudios referentes a las normas de calidad de energía [1].

Anualmente, el Consejo Mundial de Energía (WEC, *por sus siglas en inglés*) se encarga de clasificar a los países que presentan un buen rendimiento energético basado en la seguridad energética, asequibilidad, sostenibilidad ambiental. En el año 2015, Ecuador se ubica en el puesto 35 de 129 países a nivel mundial [2] y el 5^{to} puesto a nivel de América Latina y el Caribe [3]. Para el año 2018, ocupa el puesto 62 de 125 países [4].

En el reporte realizado en el año 2017 – 2018 por el Foro Económico Mundial (WEF, *por sus siglas en inglés*), que entre uno de sus temas analiza la calidad de suministro eléctrico de 137 países, se determina que Canadá ocupa el puesto 13, Estados Unidos el puesto 26, Chile y Uruguay se ubican en el puesto 32 y 33 respectivamente, Perú ocupa el puesto 62 y Ecuador se ubica en el puesto 70 [5].

A nivel nacional la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) establece los indicadores, índices y límites de calidad de servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica por medio de la regulación No. ARCONEL 005/18 denominada “*Calidad de servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica*”. Se basan en algunas normativas internacionales como la IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15 y IEC 61000-4-30 y son de cumplimiento obligatorio para las empresas eléctricas de distribución, para consumidores regulados y no regulados conectados a la red eléctrica [6].

Las empresas eléctricas son las encargadas de controlar y verificar los parámetros establecidos por la regulación en la parte de calidad de servicio técnico, específicamente en medir la Frecuencia Media de Interrupción por KVA nominal instalado (FMIK) y por el Tiempo Total de Interrupción por KVA nominal instalado (TTIK) esto se evidencia en los informes emitidos por empresas distribuidoras como la Empresa Eléctrica Quito S.A (EEQSA), Empresa Eléctrica Riobamba S.A (EERSA) entre otras [6].

En el Ecuador, existen empresas que proveen el servicio de evaluación la calidad de energía entre estas se destaca:

La empresa Nobreak, ubicada en la ciudad de Quito y Guayaquil, esta se encarga de realizar diagnósticos, estudios de calidad de energía y a la vez comercializar equipos para la medición de la calidad de energía. Entre los proyectos ejecutados por esta empresa se destacan a los



desarrollados al Banco Pichincha, Movistar, PRONACA, CONFITECA, Hospital Metropolitano, TVCABLE [7].

El Centro Eléctrico Industrial (CEIN), ubicado en la ciudad de Quito, encargada de ofrecer análisis de calidad de energía identificando el consumo energético en horas laborales y estudio de cargas. Entre los proyectos ejecutados se mencionan la Calidad de energía en el transformador de 750KVA de REYBANPAC – Sangolquí, Sistema de descargas atmosféricas PRONACA, Sistema de puesta a tierra en CHAIDE [8].

Ingeniería Eléctrica y Mecánica Suministros y servicios (IMETEL Cía. Ltda.), empresa privada ubicada en la ciudad de Quito provee productos y servicios electromecánicos para el sector eléctrico, de telecomunicaciones, construcción etc. Entre los proyectos ejecutados está el análisis de la calidad de energía del PDU del HEADEND de Quito del Grupo TV CABLE [9].

Son varios los trabajos de titulación desarrollados en el país sobre el estudio de calidad de energía, entre los que se destacan en:

La Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil en el año 2018, que enfoca en el análisis de la calidad de energía eléctrica en una Industria Alimenticia, identificando un bajo factor de potencia y presencia de armónicos en el secundario del transformador [10]

La Escuela Politécnica Nacional en el año 2011, realiza un análisis de calidad de energía eléctrica en la Imprenta Mariscal en la ciudad de Quito, se identifica un bajo factor de potencia, presencia de armónicos y flicker [11].

La Universidad de Cuenca en el año 2019, el trabajo se enfoca en la calidad de energía en el sistema eléctrico de la Facultad de Ingeniería, se identifica una baja calidad de energía en uno de los tableros de distribución [12].

Aun cuando, por la naturaleza del tema cada investigación realizada presenta una realidad distinta, se puede mencionar que algunos de los trabajos investigados presentan soluciones teóricas generales. No establece propuestas concretas a los problemas identificados que detallen características, costos y forma de uso de los equipos o componentes que dan solución a la problemática identificada.

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en el año 2015, se realizó un estudio de factibilidad para el mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en la planta Industrial INDUCUERDAS. Este identifica variaciones de voltajes y corrientes en la planta, un bajo factor de potencia y armónicos. El trabajo presenta soluciones y detallan las características de los equipos a incorporar para el mejoramiento de la calidad de energía [13]. En el año 2014 se realiza un estudio de eficiencia energética en el sistema eléctrico de los laboratorios y talleres de la Facultad de Mecánica, que identifica problemas en los tableros de distribución y falta de mantenimiento, pero no establece soluciones puntuales a los problemas presentados [14].

Se desconoce la existencia de trabajos aplicados a otras dependencias de la ESPOCH sobre el tema que se desarrolla. En la Facultad de Informática y Electrónica desde su creación, no se



registran estudios sobre calidad de energía eléctrica en los modulares y laboratorios que la conforma. Específicamente en el laboratorio de automatización, que poseen equipos de laboratorio de alto costo y de gran importancia para la carrera, se ve necesario evaluar la calidad de energía eléctrica suministrada al laboratorio con el fin de precautelar la integridad de los equipos instalados.

1.3 Justificación

Desde la década de los 40 del siglo pasado hasta la fecha los problemas de calidad de energía eléctrica tienen vigencia y van en aumento, estos dependen mucho de la realidad del entorno a analizar, por lo que se requiere de una investigación y un tratamiento correctivo personalizado. A esto se suma que algunos usuarios no industrializados desconocen las regulaciones vigentes y la utilidad que aporta el realizar estudios sobre el tema. Entre estos beneficios se tiene la reducción en el consumo eléctrico, reducción de pérdidas por ineficiencia de los equipos, eliminación de penalizaciones y mejora en la calidad de energía lo que repercute en la vida útil de los equipos.

En el país, las empresas distribuidoras de energía eléctrica son las encargadas de sancionar o penalizar a los consumidores por la falta de acciones correctivas, a las perturbaciones generadas por problemas en sus instalaciones, lo que conlleva a que la mayor responsabilidad recaiga en el usuario final.

En base al Artículo 27 "*Cargos por bajo factor de potencia*" del documento de la codificación del reglamento de tarifas establece; a los consumidores con medición de potencia reactiva, que posean un factor de potencia menor a 0.92 se recargará una multa equivalente a la facturación mensual multiplicado por el factor de penalización por bajo factor de potencia, siendo esta en función al factor de potencia permitido sobre el registrado menos 1. Quienes posean un factor de potencia inferior a 0.60, previa notificación suspenderá el servicio eléctrico al usuario hasta que la instalación sea verificada y corregida [15] [16].

Por lo que es necesario realizar investigaciones y difundir el tema con el fin de evitar las perturbaciones generadas en la red eléctrica, la mayoría son originadas dentro de las instalaciones a nivel residencial, comercial e industrial, a causa del incremento de equipos eléctricos que se conectan a la red.

Investigaciones desarrolladas a nivel nacional e internacional recomienda que, para mejorar los parámetros de calidad de energía eléctrica, es importante evaluar los sistemas de puesta a tierra, incorporar filtros correctores de armónicos o banco de capacitores para corregir el factor de potencia en la red eléctrica [13].

Por tal motivo, la evaluación de la calidad de energía en el laboratorio de automatización de la Facultad de Informática y Electrónica, se consideró las regulaciones nacionales vigentes ARCONEL 005/18, ARCONEL 004/018 y los estándares internacionales IEC, IEEE, CENELEC que sirven como referencia para una correcta evaluación de la calidad de energía. Luego se



procede a realizar el análisis de los datos registrados y plantear una solución que mejore la calidad de energía eléctrica de acuerdo a las necesidades y problemas presentados.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la calidad de energía eléctrica del Laboratorio de Automatización de la Facultad de Informática y Electrónica – ESPOCH

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar las normativas calidad de energía vigentes y aplicables en diferentes áreas.
- Establecer las normativas de calidad de energía aplicables según las características de los equipos presentes en el laboratorio.
- Medir la calidad de energía eléctrica basada en las normativas seleccionadas.
- Determinar si los valores obtenidos se encuentran dentro de valores establecidos por la norma.
- Identificar los problemas que afectan a la calidad de energía eléctrica en el laboratorio.
- Elaborar la propuesta para mejorar la calidad de energía eléctrica para el laboratorio.

1.5 Alcances del proyecto

El presente trabajo realiza la evaluación de la calidad de energía eléctrica que recibe el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH, ubicada en la ciudad de Riobamba - Ecuador. Considerando que, en sus instalaciones desde su construcción no se han realizado estudios afines al tema y que en la actualidad en sus instalaciones funcionan equipos de laboratorio relacionado a la Industria 4.0, robots colaborativos, sistemas de simulación, automatización e internet entre otros. Estos equipos conforman un laboratorio de alto costo, el más importante de América Latina y es fundamental en el proceso de enseñanza - aprendizaje para la facultad, específicamente para la Escuela de Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales. El análisis de los parámetros de la calidad de energía eléctrica suministrada a estos equipos permite brindar seguridad en su desempeño y extender su vida útil. Para lo cual se planteó recopilar información de la calidad de energía eléctrica por medio de un analizador de energía, que luego de ser evaluada y comparada con las normativas nacionales e internacionales vigentes, permiten identificar perturbaciones y los factores que las causan, información necesaria para estructurar la propuesta que ayude a mejorar la calidad del suministro eléctrico del laboratorio.





CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Introducción

En el presente capítulo, se estudia mediante una revisión bibliográfica la definición de calidad de energía eléctrica, importancia de su estudio, eventos y las consecuencias de la mala calidad de energía, además se definen los parámetros y perturbaciones que se considerarán como elementos que intervienen en la calidad de energía eléctrica, así como sus causas, efectos y soluciones específicas.

2.2 Definición de calidad de energía eléctrica.

Existen normativas o estándares a nivel mundial que definen a la calidad de energía de la siguiente manera:

- El estándar IEC 61000-4-30 la define como *“una característica de la electricidad en un punto dado de la red eléctrica, evaluadas bajo un conjunto de parámetros técnicos de referencia”* [17].
- El estándar IEEE 1159-1995 la define como *“la variación de fenómenos electromagnéticos que están caracterizadas por el voltaje y la corriente en un instante o punto determinado de la red”* [17].
- El Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) por medio de la norma (EN50160) la define como *“Una característica física del suministro de electricidad, la cual debe llegar al cliente en condiciones normales, sin producir perturbaciones ni interrupciones en procesos del mismo”* [17].
- La Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México, la define como *“Características eléctricas de un punto determinado del sistema eléctrico, evaluadas con respecto a un conjunto de parámetros y valores de relevancia, relacionados a la compatibilidad electromagnética entre la distribuidora y sus clientes”* [18].

Partiendo de las definiciones mencionadas, se considera para el desarrollo del proyecto como calidad de energía eléctrica, aquella energía que conserva las mejores características de suministro y presenta una buena compatibilidad electromagnética, que garantiza un adecuado funcionamiento de los equipos eléctricos, brindando una alta confiabilidad y continuidad de servicio a todas las cargas que se encuentren conectadas a la red eléctrica.

2.3 Importancia del estudio de la calidad de energía.

Una buena calidad de energía depende en gran medida de su fuente de alimentación, si esta cumple con las características de calidad las cargas conectadas a la red eléctrica operarían sin



problemas y no existiría perturbaciones en la red. Al no ser así las cargas se verían afectadas por daños, averías, incluso presentarían fenómenos transitorios y pérdidas de energía [19]. Debido a esto es importante realizar este tipo de estudios ya que proporcionan:

- **Seguridad:** Para incorporar nuevas cargas es necesario realizar estudios que ayuden a determinar si el sistema eléctrico es apto para soportarlas y así evitar problemas de sobrecarga u otras anomalías [20].
- **Ahorro y precisión en la Facturación eléctrica:** Muchos usuarios desconocen del valor total final a pagar en la facturación eléctrica, un registro del consumo eléctrico permite verificar su uso en cualquier momento e identificar anomalías [20].
- **Incentivos:** Algunas organizaciones estatales promueven incentivos o descuentos a quienes reduzcan el consumo energético [20]. Como por ejemplo el incentivo punto verde del Ministerio del Ambiente (MAE).
- **Identificación y Solución de problemas:** En caso de presentar una falla, los analizadores de energía permiten capturar y analizar los datos durante un periodo de tiempo, información fundamental de ayuda para identificar y establecer acciones para resolver los problemas [20].
- **Prolongación en la vida útil de los equipos:** La mayoría de equipos dependen de un suministro de energía de calidad para su funcionamiento, esto se refleja en extender la vida útil de los equipos hasta un 32% en maquinarias monofásicas, 18% en trifásicas y un 5% en transformadores [21].

De acuerdo a investigaciones realizadas, la base de la calidad de energía eléctrica radica en los sistemas de puesta a tierra, que ayudan a reducir las fallas ocasionadas por los disturbios eléctricos, se da importancia a la seguridad para los equipos y al personal que lo opera, evitando incendios por sobre calentamiento [22].

2.4 Tipos de cargas.

En un sistema eléctrico puede haber dos tipos de cargas, detalladas a continuación:

2.4.1 Cargas lineales

En la figura 2.1 se puede observar la onda de voltaje y corriente de una carga lineal, este tipo de cargas no afectan en la calidad de energía debido a su comportamiento lineal, por lo que la magnitud de la impedancia y la frecuencia se mantienen constante. La onda senoidal de corriente es proporcional a la onda de voltaje, puede estar o no desfasada en el tiempo dependiendo del tipo de carga (resistiva, inductiva, capacitiva). Estas cargas pueden ser motores de inducción, lámparas incandescentes y calefactores [23] [24].

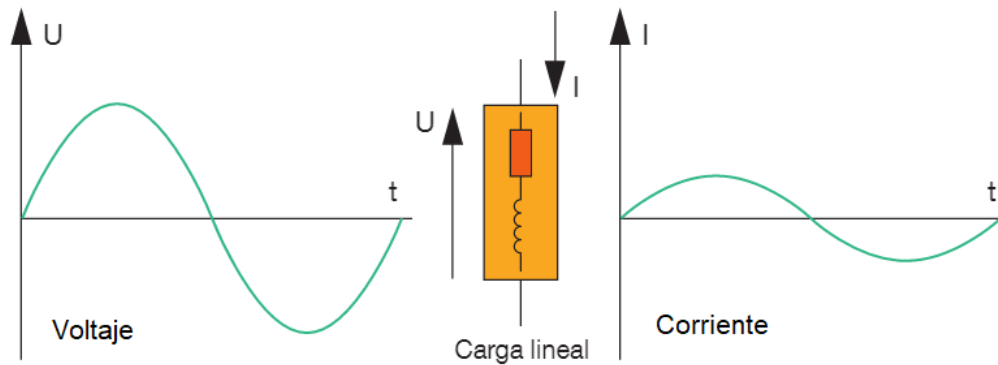


Figura 2.1 Onda de voltaje y corriente producto de una carga lineal [25].

2.4.2 Cargas no lineales

La magnitud de la impedancia varía a medida que se aplica un voltaje por lo que la onda senoidal de la corriente no es proporcional a la de voltaje como se puede observar en la figura 2.2. Este tipo de carga está presente en los equipos eléctricos que poseen semiconductores y son importantes considerarlas para este estudio debido a que afectan negativamente a la calidad de energía en la mayoría de los casos. Un ejemplo típico de las cargas no lineales son los variadores de velocidad de motores, convertidores de potencia, computadores, lámparas fluorescentes y de descarga, sistemas de control robótico, televisores que no contengan filtros en su salida [23] [24].

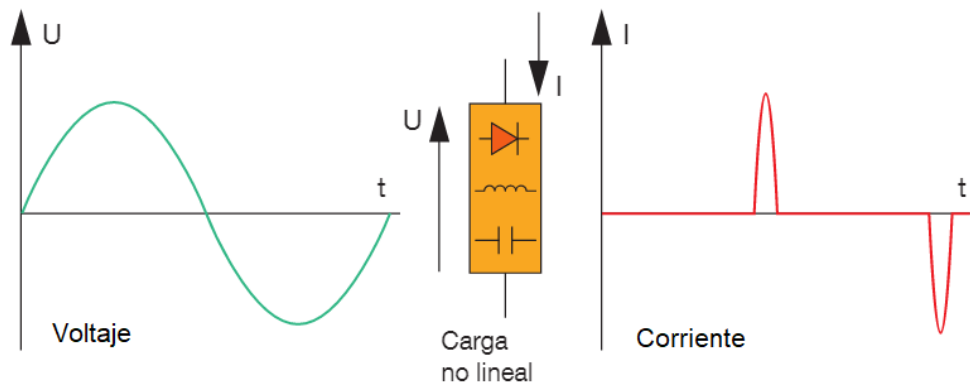


Figura 2.2 Onda de voltaje y corriente producto de una carga no lineal [25].

2.5 Eventos que afectan a la calidad de energía.

Estos se pueden clasificar de acuerdo al origen en:



2.5.1 Externos.

Se generan fuera de las instalaciones eléctricas del usuario, son eventos de menor ocurrencia y representan alrededor del 20%. Se producen por fenómenos naturales como descargas atmosféricas conocidos como rayos, que pueden caer cerca o sobre las líneas eléctricas; o pueden ser ocasionados por contacto entre las líneas eléctricas. Afectan principalmente a la red de distribución de media y alta tensión causando cortes del suministro eléctrico, caídas de voltajes y sobrevoltajes [26] [23] [27].

2.5.2 Internos.

Son eventos de mayor ocurrencia y representan alrededor del 80%, se generan dentro de las instalaciones eléctricas del usuario, son causadas por la operación de dispositivos de desconexión, conmutación electrónica, arranque de motores, paradas de grandes cargas, cableado defectuoso, sobrecargas, cortocircuitos, etc. [26] [23] [27].

2.6 Consecuencias de la mala calidad de energía

En dependencia del origen de los eventos que afectan la calidad de energía se presentan problemas en el rendimiento de los equipos que se encuentran conectados a la red eléctrica, los cuales pueden ser [28] [29] [26]:

- Aumento de pérdidas reactivas en los transformadores.
- Daño en elementos primarios de la red (Como el calentamiento en conductores de alto voltaje).
- Daño en bancos de capacitores de corrección del factor de potencia.
- Costo excesivo en el consumo de energía eléctrica.
- Funcionamiento incorrecto y reducción de la vida útil de los equipos.
- Errores en la medición de equipos.
- Disminución del factor de potencia y $\cos \theta$
- Sistema de Puesta a tierra deficiente.
- Continuos cortes en el suministro eléctrico.
- Errores de operación en sistemas de protección.
- Pérdida de información o daños en equipos informáticos
- Presencia de ruidos en el sistema eléctrico.
- Sobrecalentamiento en los cables de alimentación y equipos.
- Sobrecalentamiento en el neutro.
- Variaciones de voltaje.
- Incendios por sobrecalentamiento de componentes y equipos.



2.7 Parámetros que intervienen en la calidad de energía eléctrica.

Están relacionados con las variaciones de voltaje, corriente y frecuencia [30]. Los cambios en estos parámetros producen deficiencia en la calidad de energía y son denominados perturbaciones, dependen de su magnitud, tipo y duración [31]. A continuación, se detalla las perturbaciones que pueden presentarse al alterar los cuatro parámetros que intervienen en la calidad de energía eléctrica y que fueron considerados en esta investigación junto con sus posibles soluciones:

2.7.1 Variación de la frecuencia

La frecuencia está relacionada directamente con la velocidad de rotación de los generadores en el caso de sistemas de generación a partir de máquinas síncronas. La disminución de la frecuencia se produce generalmente cuando la carga es mayor a la generación y su incremento se da cuando ocurre lo contrario [32]. Este fenómeno es poco frecuente, básicamente por la alta inercia de estos sistemas, pero se puede producir por la interconexión de los centros de generación de energía eléctrica o por un desequilibrio de la carga con respecto al generador presente en un sistema eléctrico de corriente alterna (AC) [33]. La frecuencia establecida a nivel de América, para la operación de los equipos es de 60 Hz con una variación no mayor al $\pm 1\%$ [34] y pueden ser medidas en promedios de 10 seg. Las alteraciones de la frecuencia ocasionan fallas en el funcionamiento en dispositivos eléctricos [30], se pueden solucionar incorporando Sistemas de Alimentación Ininterrumpidas de energía (*UPS, por sus siglas en inglés*) entre la alimentación y la carga [34].

2.7.2 Variaciones de la Amplitud

La alteración de la amplitud del voltaje del PCC, son producto de las variaciones de voltaje en el sistema eléctrico principalmente por las pérdidas en la transmisión o reducción en su origen, estas presentan diferentes formas y rangos de duración [35] [36]. A continuación, se hace un detalle de cada una de ellas:

2.7.2.1 Transitorios

Son altamente nocivos para los equipos conectados a la red debido a que poseen comportamientos anómalos como sobre voltajes “picos de voltaje” y/o corriente, se caracterizan por tener grandes cantidades de energía y son de muy corta duración en el orden de los microsegundos (μs). Se transfieren o se inducen a través de las líneas de energía, datos o comunicación la mayoría se presenta en las instalaciones del usuario o en el sistema de

distribución. Los efectos de los transitorios dependen de la amplitud y la frecuencia [22] [26], estos pueden ser:

- De impulso:** Se caracterizan por tener un cambio de frecuencia repentino, sin potencia, en condición de estado estable de voltaje y/o corriente, su polaridad es unidireccional destacándose el tiempo de elevación y el decaimiento en la onda. En la figura 2.3 se muestra una corriente transitoria impulsiva causada por una descarga atmosférica, siendo esta la causa más común debido a la alta frecuencia que se genera. Se originan también al maniobrar con interruptores y cuchillas, por sistemas de puesta a tierra deficientes, encendido de cargas inductivas (transformadores, motores eléctricos y bobinas). Afectan a equipos electrónicos como PLC's y pueden producir pérdida de información [37] [38]. En la Tabla 2.1 se observa las categorías de los transitorios impulsivos y sus tiempos de duración.

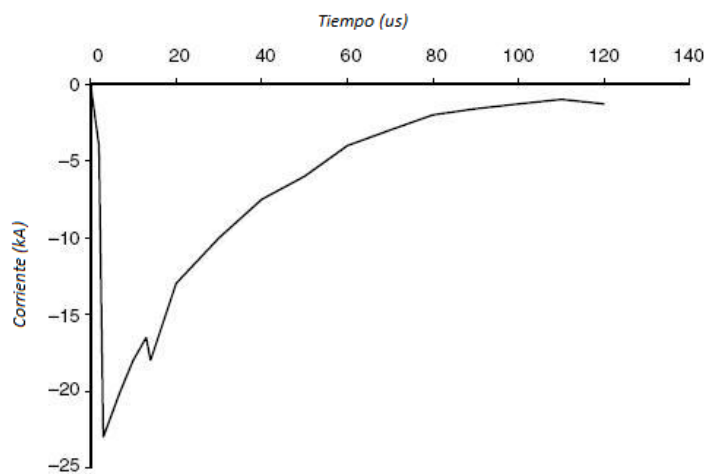


Figura 2.3 Corriente transitoria impulsiva causada por una descarga atmosférica [37].

Tabla 2.1 Categorías – Transitorios de Impulso

Transitorios impulsivos	Contenido Espectral	Duración típica
Nanosegundos	5ns	< 50ns
Microsegundos	1µs	50ns a 1ms
Milisegundos	0,1ms	> 1ms

Fuente: Elaboración propia [37].

- Oscilatorios:** Se describen por tener cambios instantáneos en la polaridad de voltaje y/o corriente en condición de estado estable, su polaridad es unidireccional y se caracterizan de acuerdo al tiempo de duración, magnitud y frecuencia. Los transitorios se clasifican en tres tipos: de baja, media y alta frecuencia como se muestra en la Tabla 2.2. Generalmente se originan por la desconexión de líneas, conmutación de motores y bancos de capacitores, energización de transformadores. Afectan principalmente a circuitos basados

en microprocesadores, circuitos de control y computadores [38] [39]. En la figura 2.4 se muestra una onda provocada por un transitorio oscilatorio de baja frecuencia debido a la activación de un banco de capacitores.

Tabla 2.2 Clasificación – Transitorios Oscilatorios

Transitorios oscilatorios	Contenido Espectral	Duración típica	Magnitud de voltaje típico
Baja frecuencia	< 5kHz	0,3 a 50ms	0 - 4 p.u.
Media frecuencia	5 - 500kHz	20 μ s	0 - 8 p.u.
Alta frecuencia	0,5 - 5MHz	5 μ s	0 - 4 p.u.

Fuente: Elaboración propia [39]

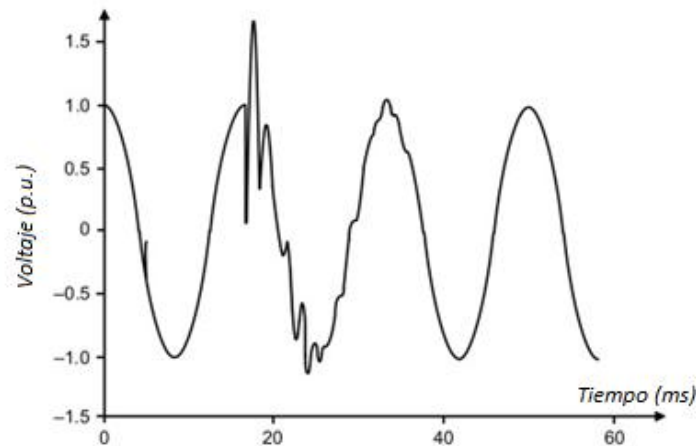


Figura 2.4 Transitorio oscilatorio de baja frecuencia generado por un banco de capacitores [39].

2.7.2.2 Variaciones de voltaje de larga duración.

Son variaciones del valor eficaz del voltaje RMS mayores a un minuto y estas se clasifican en:

- **Sobrevoltaje.** Es un aumento de la magnitud del valor de voltaje RMS cuando supera el 110% (1.1 p.u.) con respecto a la onda fundamental por más de un minuto. Su causa es por la desconexión de grandes cargas, conexión de un banco de capacitores o por una selección incorrecta del TAP en los transformadores [38]. Ocasiona daños en el aislamiento de los componentes eléctricos y electrónicos, calentamiento en las fuentes alimentación, incremento de la velocidad de los motores, aumento de iluminación en lámparas incandescentes [34]. En la figura 2.5. se muestra la onda de sobrevoltaje con un tiempo de duración de 2 min.

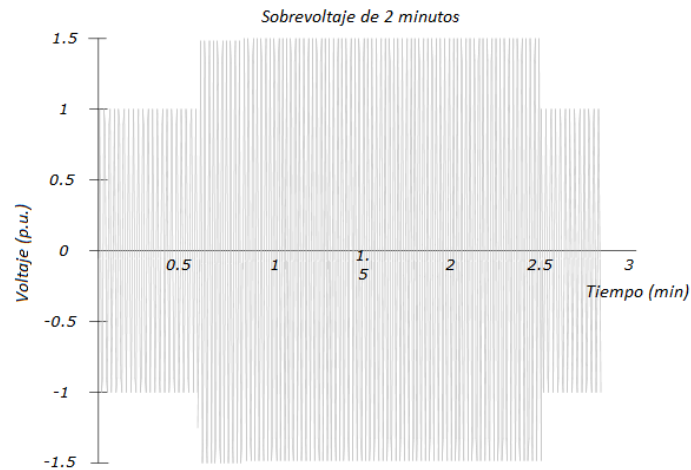


Figura 2.5 Onda de sobrevoltaje de 2 min [26]

- **Bajo voltaje:** Es un decremento del valor de voltaje RMS, menor al 90% (0.9 p.u.) con respecto a la onda fundamental por más de un minuto. Se producen por la saturación del transformador o la incorrecta selección de su TAP, por falta de planificación en la expansión de la carga en una instalación eléctrica, por la conexión de grandes cargas, arranques de motores y desconexión de un banco de capacitores [34] [38]. Un bajo voltaje puede ocasionar el apagado de equipos sensibles y/o el disparo de protecciones [34]. En la figura 2.6. se muestra la onda de bajo voltaje con una duración de 2 min.

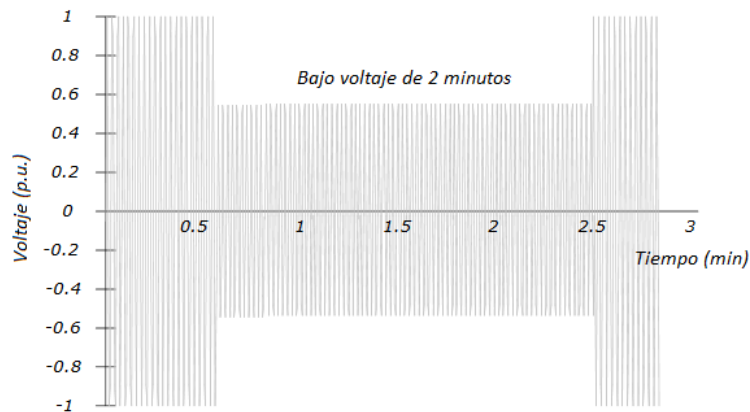


Figura 2.6 Onda de bajo voltaje de 2 min [26]

- **Interrupciones sostenidas:** También conocidas como permanentes, ocurren cuando el suministro de voltaje permanece en cero por más de un minuto. Su causa es producto de fallas en el sistema de potencia como disparo de protecciones por cortocircuito, sobrecarga en líneas de transmisión. Ocasiona pérdidas económicas, pérdida de información, daños en sistemas de almacenamiento y software. [34] [38] [40]. En la figura 2.7 se presenta una onda característica de una interrupción sostenida.

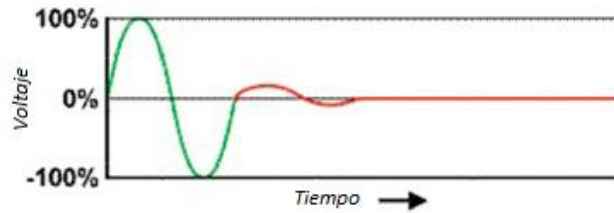


Figura 2.7 Onda característica de una interrupción sostenida [41]

2.7.2.3 Variaciones de voltaje de corta duración.

Son variaciones del valor eficaz del voltaje RMS menores a un minuto, se pueden clasificar en:

- **Elevaciones (Swell)**

Es el incremento momentáneo de voltaje RMS en AC con respecto a la onda fundamental, tienen un tiempo de duración de 0,5 ciclos a 1 minuto con incrementos de 110% al 180% (1,1 a 1,8 p.u.) con respecto al voltaje nominal. Se originan por fallas en la red eléctrica debido a tareas de mantenimiento o cortocircuitos, desconexión de bancos de capacitores, desconexión de grandes cargas y arranque de motores. Ocasionan envejecimiento y ruptura del aislamiento de los equipos eléctricos o daños en sus elementos eléctricos y electrónicos [34] [38]. Estos se subdividen en [42]:

- **Instantánea:** Poseen un tiempo de duración de 0,5 – 30 ciclos y su magnitud de voltaje está entre 1,1 a 1,8 p.u.
- **Momentánea:** Poseen un tiempo de duración de 30 ciclos - 3s y su magnitud de voltaje está entre 1,1 a 1,4 p.u.
- **Temporal:** Poseen un tiempo de duración de 3s – 1 min y su magnitud de voltaje está entre 1,1 a 1,2 p.u.

En la figura 2.8 se puede apreciar una onda característica producto de un Swell con un tiempo de duración de 10 ms.

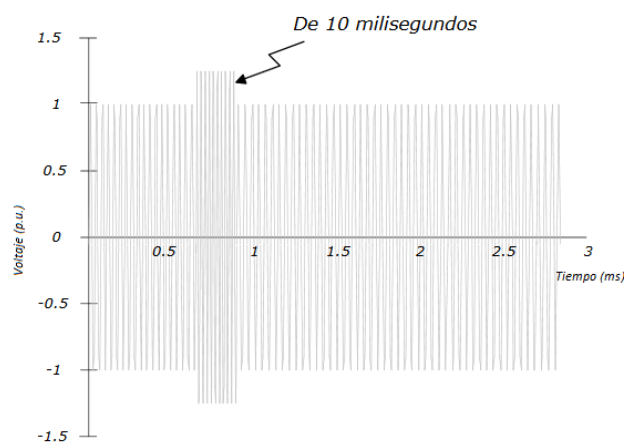


Figura 2.8 Onda característica de un Swell [26]

- **Huecos (Sag)**

Es la disminución momentánea de voltaje RMS en AC con respecto a la onda fundamental, con un tiempo de duración de 0,5 ciclos a 1 minuto y con una variación de voltaje entre 10% al 90% (0,1 a 0,9 p.u.) con respecto a su nominal. [38]. Se originan generalmente por el arranque de motores o cualquier inclusión de cargas considerables, fallas en el sistema como cortocircuitos en las líneas de alimentación, actividades de mantenimiento en la red eléctrica o por encendido de grandes cargas (motores, soldadoras, cortadoras láser, hornos, etc.). Los Sag más comunes son producidos de fase a tierra, pero los más severos son en los sistemas trifásicos. Esto puede generar reducción en la intensidad de luminarias y flicker, parpadeo en monitores, errores de funcionamiento en equipos de medición digital y en dispositivos de control provocando variaciones de velocidad de motores, degradación en equipos de protección a mediano y largo plazo [34] [26] [38]. Estos se subdividen en función a su duración [42]:

- **Instantánea:** Poseen un tiempo de duración de 0,5 – 30 ciclos.
- **Momentánea:** Poseen un tiempo de duración de 30 ciclos - 3s.
- **Temporal:** Poseen un tiempo de duración de 3s – 1 min.

En la figura 2.9 se puede apreciar una onda característica producto de un Sag con un tiempo de duración de 10 ms.

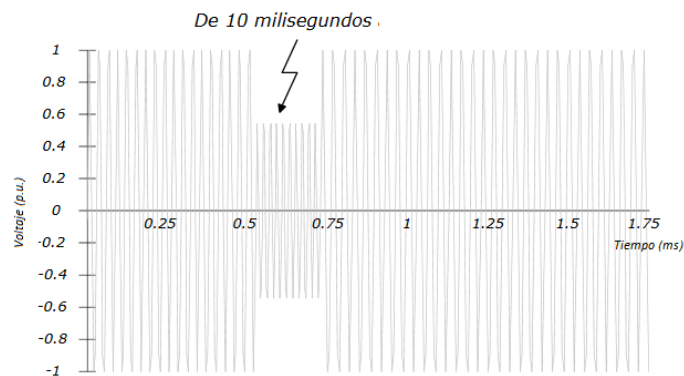


Figura 2.9 Onda característica de un Sag [26]

- **Interrupciones cortas:** Se produce cuando el voltaje suministrado es menor al 10% (0,1p.u.) en un intervalo de tiempo menor a un minuto [38]. Estos se subdividen en [42]:
 - **Instantánea:** Poseen un tiempo de duración de 0,5 – 30 ciclos.
 - **Momentánea:** Poseen un tiempo de duración de 30 ciclos - 3s.
 - **Temporal:** Poseen un tiempo de duración de 3s – 1 min.

En la figura 2.10 se presenta una onda característica producto de una interrupción corta momentánea.

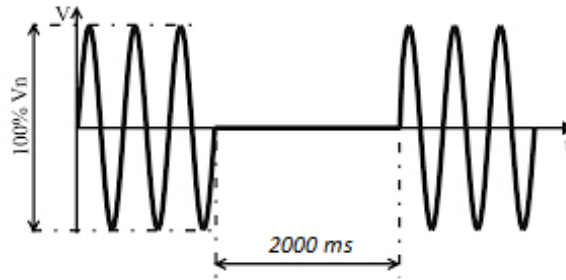


Figura 2.10 Interrupción corta momentánea [41]

2.7.2.4 Fluctuaciones de Voltaje o Flicker.

Son variaciones aleatorias o continuas en la amplitud de voltaje con un rango de $\pm 10\%$ (0,9 a 1,1 p.u.) en relación al valor nominal. Son de corta duración que va desde unos ms hasta 10s. El ancho de banda que evalúa el flicker para sistemas de 120/60Hz es de 0,5 – 42 Hz [34] [43].

Se produce cuando se comparte las líneas de alimentación con otras cargas que requieren una potencia variable en forma constante [34]. Las variaciones de voltaje son características en los sistemas de distribución, se deben a los hornos de arco eléctrico, soldadoras y en el sector residencial son producidas por los arranques de las refrigeradoras, motores eléctricos, bombas, compresores o estufas eléctricas [26].

Pueden generar parpadeos en monitores o televisores, afectar la velocidad de los motores y produce desgaste prematuro en fuentes de alimentación, en elementos eléctricos y electrónicos [34].

Los flicker ocasionan un efecto de parpadeo, perceptible al ojo humano como variaciones de luminosidad en lámparas de bajo voltaje (incandescentes, vapor de mercurio, tubos fluorescentes con balasto electromagnético), por debajo de los 20Hz puede presentar molestias y severos daños en la salud de las personas, ocasionando cansancio, molestia visual, dolores de cabeza y estrés [26] [38] [44].

En la figura 2.11 se muestra las fluctuaciones de voltaje producidas por la operación de un horno de arco.

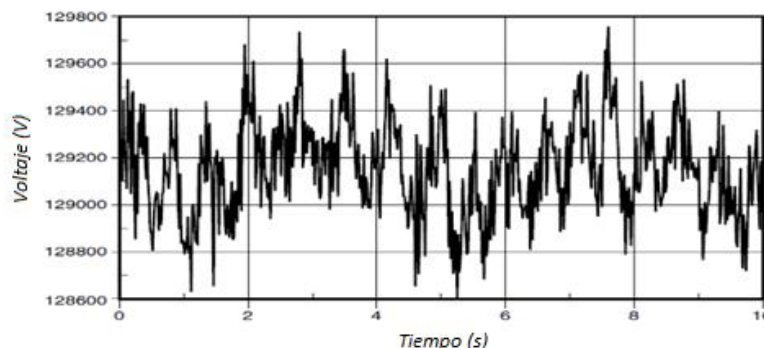


Figura 2.11 Fluctuaciones de voltaje causadas por la operación de un horno de arco [26]



Existen dos índices para medir el grado de severidad del flicker y son:

- **Índice de severidad de Corta duración (P_{st}):** Se evalúa con intervalos de observación de 10 min. Si el valor de $P_{st} \geq 1$ se considera que afecta negativamente al ojo humano [43] [45]. El P_{st} se calcula mediante la ecuación 1.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (1)$$

Dónde:

P_{st} : Índice de severidad del flicker de corta duración.

$P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} : Niveles de efecto flicker que se sobrepasan durante el 0,1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del intervalo de medición.

La norma IEC define para el cálculo con una mejor exactitud el valor de P_{st} , obteniendo los percentiles promediados. Estos se pueden calcular con las siguientes formulas [43]:

$$P_{0,1} = P_{0,1}$$

$$P_1 = \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3}$$

$$P_3 = \frac{P_{2,2} + P_3 + P_4}{3}$$

$$P_{10} = \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5}$$

$$P_{50} = \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3}$$

- **Índice de severidad de Larga duración (P_{lt}):** Se evalúa con intervalos de observación de 2 horas lo cual equivale al promedio cubico de 12 valores consecutivos de P_{st} [43] [45]. Para evaluar el P_{lt} se calcula mediante la ecuación 2:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{st_i}^3}{12}} \quad (2)$$

Dónde:

$P_{st}(i = 1, 2, 3, \dots)$: Son los valores consecutivos obtenidos del P_{st}

En la Tabla 2.3 se muestra los niveles de compatibilidad de la severidad del flicker, sabiendo que el límite de admisión es igual a 1 [45].

Tabla 2.3 Niveles de compatibilidad de la severidad del flicker

Niveles de Voltaje	P_{st} (p.u)	P_{lt} (p.u)
Bajo Voltaje	1	0,8
Medio Voltaje	1	0,8
Alto Voltaje	0,8 - 0,9	0,65 - 0,8

Fuente: Elaboración propia [45]

2.7.3 Distorsión de la forma de onda

Se caracteriza por la deformación de la onda de voltaje o corriente producto de la incorporación de cargas no lineales al sistema eléctrico [35]. Las distorsiones más comunes son:

1. Componente de DC u Offset.

Se produce cuando se presenta una señal de voltaje o corriente de DC en un sistema de alimentación AC, generando un desplazando positivo o negativo de la amplitud de la señal [38]. Por lo general ocurren en dispositivos electrónicos compuestos por diodos o convertidores cuando se realiza una rectificación de media onda por ejemplo, la presencia de esta en los núcleos de los transformadores aumenta la saturación en operación normal provocando calentamiento y reducción de su vida útil [26] [33]

2. Muestras.

Más conocidos como hendiduras o “notches”, es una perturbación periódica de voltaje de corta duración, menor a medio ciclo, poseen una polaridad opuesta al voltaje nominal. Se producen debido al manejo normal de equipos basados en electrónica de potencia cuando la corriente conmuta de una fase a otra, por cierre de cargas trifásicas, por la conexión de hornos eléctricos o máquinas para soldar, por conexión de banco de capacitores, variadores de frecuencia y control de motores DC. Pueden producir errores de funcionamiento en ciertos equipos electrónicos, pérdida de información o cambios en datos de la memoria [38] [33] [28]. En la figura 2.12 se presenta una onda característica con presencia de muescas.

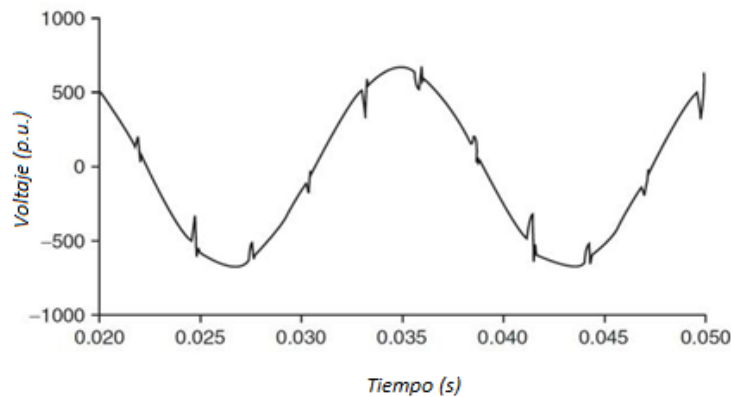


Figura 2.12 Onda característica con presencia de muescas [46].

3. Ruido eléctrico.

Son señales eléctricas indeseables de baja magnitud con un espectro de ancho de banda menor a 200kHz y una duración menor a 2ms, que se superponen a la onda senoidal de voltaje o corriente del sistema de alimentación, se presentan en conductores de alimentación de fase y neutro [38].

Pueden formarse dentro de los circuitos eléctricos producto de las interferencias electromagnéticas. No causan daños a los equipos, pero sí al funcionamiento de los circuitos eléctricos, generando errores de funcionamiento en equipos reguladores de

voltaje, transmisores de radios, televisores, lámparas fluorescentes, soldadoras de arco eléctrico, a los sistemas de comunicación, e incluso puede ocasionar disparo de contactores y pérdida de información a equipos sensibles como computadoras [34] [47] [41]. En la figura 2.13 se muestra una onda de voltaje con presencia de ruido.

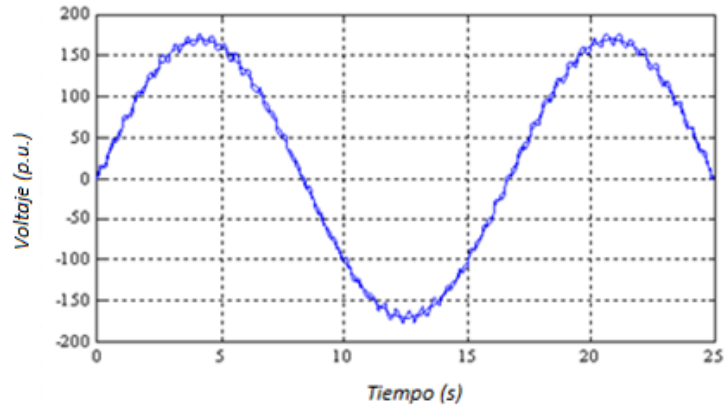


Figura 2.13 Onda de voltaje con presencia ruido [47].

Para solucionar este problema se debe implementar filtros, transformadores de aislamiento o acondicionadores de línea [38].

4. Armónicos.

Son distorsiones periódicas de la onda de voltaje o corriente, donde la componente de frecuencia es múltiplo entero de la onda de frecuencia fundamental por ejemplo (2, 3, 4, 5,..., n), donde “n” establece el múltiplo de la componente armónica y representa “n” veces con respecto a la frecuencia fundamental presente en la red [26] [48].

Estas distorsiones en su mayoría, se presenta en las instalaciones del usuario por las cargas no lineales conectadas a la red, que generan flujos de corrientes armónicas en la alimentación de AC debido al consumo de energía no continua en el tiempo. La onda sinusoidal distorsionada está formada por la suma de la componente fundamental más las componentes armónicas como se puede observar en la figura 2.14 [26] [49].

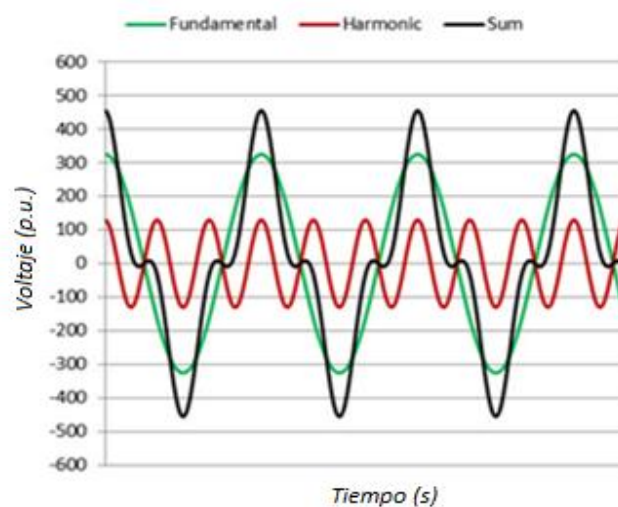




Figura 2.14 La onda fundamental, la onda del armónico y su resultante [50].

Las componentes armónicas pueden ser:

- **Armónicos pares** (2, 4, 6, 8, ...) en entornos industriales o en instalaciones eléctricas no suelen presentarse debido a que se eliminan con la simetría de la señal alterna. Únicamente se considera en presencia de una componente continua o cuando no existe simetría entre los dos semiciclos de la señal [48].
- **Armónicos impares** se presentan cuando existen conectadas cargas no lineales monofásicas donde predominan armónicos de orden (3, 5, 7, 9, ...) de mayor a menor amplitud, tales como equipos electrónicos, suministros de alimentación en DC, televisores, computadores o variadores de velocidad. En el caso de las cargas trifásicas predominan los armónicos de orden (5, 7, 11, 13, ...) de mayor a menor amplitud como por ejemplo convertidores, variadores, SAI [48] [51].

Los armónicos se caracterizan por el orden, la frecuencia y la secuencia cada una se define en función al armónico correspondiente en una red eléctrica. La secuencia, es una de las más importantes para el análisis, está relacionada con la rotación o giro para un sistema, estas se clasifican en:

Positiva o directa (+): Se determinan a los armónicos que cumplen con la relación $h = 3 * k + 1$ donde; h representa el orden del armónico y k es un numero entero desde el 0. Su efecto produce la rotación en el mismo sentido de la componente fundamental provocando aceleración en motores [52].

Negativa o inversa (-): Se determinan a los armónicos que cumplen con la relación $h = 3 * k - 1$ donde; h representa el orden del armónico y k es un numero entero desde el 0. Su efecto produce rotación en sentido contrario de la componente fundamental provocando frenados en motores [52].

Cero (0): Se determinan a los armónicos que cumplen con la relación $h = 3 * k$ donde; h representa el orden del armónico y k es un numero entero desde el 0. Su efecto produce la suma de corrientes armónicas de cada fase por el conductor neutro [52].

En la tabla 2.4 se presenta un ejemplo de la representación característica de los armónicos en función del orden, frecuencia y su secuencia.

Tabla 2.4 Representación característica de los armónicos

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	n
Frecuencia	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	...	60*n
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Fuente: Elaboración propia.



Para la medición de armónicos en la red se considera la Distorsión Armónica Total (*THD*, *por sus siglas en inglés*) lo cual establece la medida de cuanta distorsión armónica está presente en una onda de voltaje o corriente con respecto a la onda fundamental. Es un parámetro de medición global y se recomienda calcular su distorsión en función de los parámetros individuales de voltaje y corriente [53].

- **Distorsión Armónica Total de Voltaje (THDV):** se puede calcular con la ecuación 3 [54].

$$THDV = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots}}{V_1} * 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_n} * 100\% \quad (3)$$

Dónde:

V_h : Magnitud de la componente armónica individual.

h : Orden del armónico.

V_N : Componente fundamental del Voltaje del sistema.

- **Distorsión Armónica Total de Corriente (THDI):** se puede calcular con la ecuación 4 [54].

$$THDI = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} * 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_n} * 100\% \quad (4)$$

Dónde:

I_h : Magnitud de la componente armónica individual.

h : Orden del armónico.

I_N : Componente fundamental de la Corriente del sistema.

En cambio, la Distorsión Total de la Demanda (*TDD*, *por sus siglas en inglés*), establece la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga total del sistema [53].

- **Distorsión de la Demanda Total (TDD, por sus siglas en inglés):** se puede calcular con la ecuación 5 [53].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_n} * 100\% \quad (5)$$

Dónde:

I_h : Magnitud de la componente armónica individual.

h : Orden del armónico.

I_N : Componente fundamental de la Corriente del sistema.



Por lo general los equipos electrónicos pueden soportar una distorsión máxima del 5% [55]. En cables eléctricos se considera el efecto piel y debe reducirse si el THD es mayor que 10% [56].

Las cargas causantes de generar armónicos son los convertidores de voltaje (AC/DC y DC/AC), convertidores de potencia, por modulación de ancho de pulso (PWM), por el uso de inversores, variadores de velocidad, hornos de arco [26] [49]. Los armónicos aumentan la corriente en el neutro e influyen en el factor de potencia el cual es una medida de la eficacia con que se usa la electricidad y que se establece como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente [25], las que se definen como:

Potencia Activa (W): Es aquella potencia útil que es aprovechada para hacer funcionar a cualquier equipo eléctrico [57].

Potencia Reactiva (VAR): Es aquella potencia que consumen transformadores, motores o equipos eléctricos que contengan algún tipo de bobinas para crear campos magnéticos o eléctricos [57].

Potencia Aparente (VA): Es aquella potencia total consumida de un circuito eléctrico y se obtiene de la suma vectorial de la potencia activa y reactiva al cuadrado [57].

La armónica tercera y quinta son las más importantes a la hora de determinar la corrección del factor de potencia en instalaciones [30], y para redes trifásicas los de grado 3 deben ser estudiados con mayor atención. Los efectos que generan es menor rendimiento en los equipos, envejecimiento del aislamiento, calentamiento en conductores y motores, pérdidas de potencia activa y pueden afectar a la velocidad de operación de los relés [25] [56].

Como solución a estas distorsiones se debe considerar filtros pasivos o filtros activos, actualmente los más utilizados son los activos debido a que permiten eliminar todos los armónicos de baja frecuencia. El filtro debe estar dimensionado para determinada corriente armónica, otras soluciones pueden ser los transformadores aislados, UPS o mejoramiento del factor de potencia [48].

5. Inter-Armónicos.

Son aquellos voltajes o corrientes que poseen componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental para el cual el sistema está diseñado a funcionar (por ejemplo, 175Hz). Se presenta en todos los niveles de voltaje donde su magnitud muy raramente supera el 0,5% del armónico fundamental de voltaje. Para condiciones de resonancia puede mostrar valores más elevados en el sistema eléctrico [38] [26].

Como fuentes de generación se pueden mencionar a los convertidores de frecuencia estática, motores de inducción y dispositivos de formación de arcos eléctricos [38] [58].

Pueden ser causantes de la generación de flicker. En la figura 2.15 se puede observar una onda de voltaje con presencia de Interarmónicos.

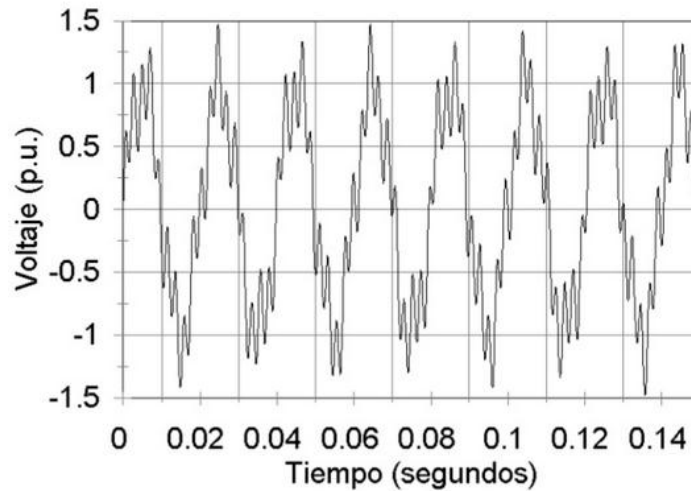


Figura 2.15 Onda de voltaje con presencia de Interarmónicos [59].

2.7.4 Simetría

Es uno de los problemas de calidad eléctrica que más se presenta en los sistemas de distribución de bajo voltaje, debido a la diferencia simétrica de las señales de voltaje en las fases de un sistema trifásico conocido como desequilibrio de voltaje, difiere en la amplitud y en su ángulo de desfaseamiento que es diferente a 120° [60] y se le conoce como desequilibrio de voltaje. En la figura 2.16 se muestra un desequilibrio de voltaje en un sistema de distribución trifásico.

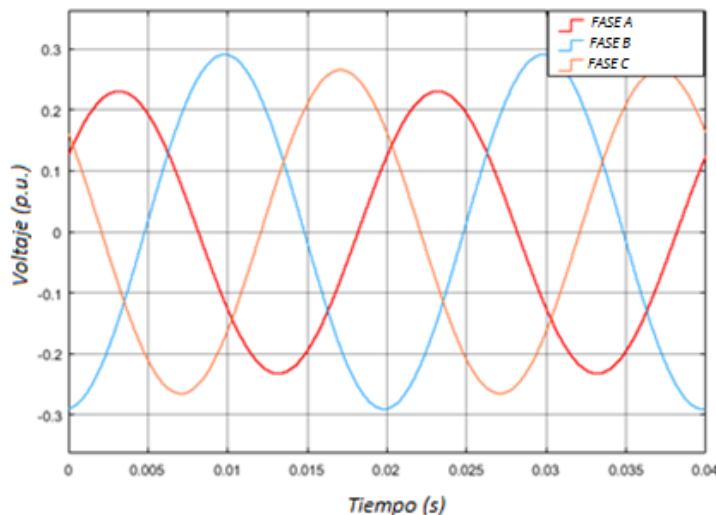


Figura 2.16 Desequilibrio de voltaje en un sistema de distribución trifásico [61].

El grado de desequilibrio se define por la relación de la componente de voltaje de secuencia negativa o cero con respecto a la componente de secuencia positiva. Los voltajes rara vez se equilibran exactamente entre fases y su valor no debe ser superior al 2% [62]. Para calcular el desequilibrio porcentual en un sistema trifásico se aplica la ecuación 6 [62].



$$\%V_{desbalanceado} = \left(1 - \frac{3 * V_{minfase}}{V_{fase1} + V_{fase2} + V_{fase3}}\right) * 100 \quad (6)$$

Dónde:

$\%V_{desbalanceado}$: La desviación máxima del voltaje expresado en porcentaje.

$V_{minfase}$: Voltaje mínimo presente en una de las tres fases.

$V_{fase1}, V_{fase2}, V_{fase3}$: Voltaje presente por cada una de las fases.

La causa principal se debe a una distribución desigual de cargas monofásicas en una red trifásica, provocando pérdidas que se reflejan en la reducción del voltaje suministrado, calentamiento en los devanados de motores y transformadores, errores de funcionamiento y reducción de vida útil de los equipos [60] [62].



CAPÍTULO 3: NORMATIVAS SOBRE LA CALIDAD DE ENERGÍA

3.1 Introducción

En el presente capítulo mediante una revisión bibliográfica se establece la definición de normativa eléctrica, se estudia las diferentes normas que definen la calidad de energía eléctrica a nivel mundial y nacional. Se seleccionan las normativas más representativas y se identifican los valores que se relacionan con los parámetros que definen la calidad de energía para esta investigación.

3.2 Normativas

Se define como un conjunto de normas o reglas de carácter obligatorio que se establecen por organizaciones públicas o privadas de cada país. Estas definen criterios para productos, servicios y procedimientos, con el fin de estandarizar los valores que sean adecuados, comparables y compatibles en un determinado campo de aplicación [63]. Son de carácter Internacional y Nacional, a continuación, se hace un estudio de las más representativas:

3.3 Estándares Internacionales

A nivel mundial, las normativas relacionadas con la calidad de energía están definidas por organizaciones como IEEE, IEC, CENELEC, que se encargan de establecer los valores límites aceptables para las mediciones. Entre estas se puede mencionar:

3.3.1 Estándar IEEE 1159

La norma completa fue publicada en el 2003, la que establece siete perturbaciones diferentes que pueden estar presentes en la red eléctrica, como: transitorios, variaciones de corta y larga duración, desequilibrio de voltaje, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de voltaje y variaciones de la frecuencia [40]. En la Tabla 3.1 se presenta las perturbaciones eléctricas, su clasificación y sus características que considera la norma.

Tabla 3.1 Clasificación de las perturbaciones y sus características en base a la norma IEEE1159

Categorías		Contenido típico espectral	Duración típica	Magnitud típica de voltaje	
Transitorios	Impulsos	Nanosegundos	5ns de elevación	< 50ns	
		Microsegundos	1µs de elevación	50ns - 1ms	
		Milisegundos	0,1ms de elevación	> 1ms	
	Oscilatorios	Baja frecuencia	< 5kHz	0,3 - 50ms	0 – 4p.u.
		Media frecuencia	5 - 500kHz	20µs	0 – 8p.u.
		Alta frecuencia	0,5 - 5Mhz	5 µs	0 – 4p.u.
Variaciones de corta duración	Instantáneas	Interrupciones cortas		0,5 - 30 ciclos	< 0,1p.u.
		Sag		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9p.u.
		Swell		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8p.u.
	Momentáneas	Interrupciones cortas		30 ciclos - 3s	< 0,1p.u.
		Sag		30 ciclos - 3s	0,1 - 0,9p.u.
		Swell		30 ciclos - 3s	1,1 - 1,4p.u.
	Temporales	Interrupciones cortas		3s - 1min	< 0,1p.u.
		Sag		3s - 1min	0,1 - 0,9p.u.
		Swell		3s - 1min	1,1 - 1,2 p.u.
Variaciones de larga duración	Interrupción sostenida		> 1min	0p.u.	
	Bajo voltaje		> 1min	0,8 - 0,9p.u.	
	Sobrevoltaje		> 1min	1,1 - 1,2p.u.	
Desbalance de voltaje			Estado Estable	0,5 - 2%	
Distorsión de forma de onda	Componente directa			Estado Estable	0 - 0,1%
	Contenido Armónico	0 - 100th H		Estado Estable	0 - 20%
	Interarmónicos	0 - 6 kHz		Estado Estable	0 - 2%
	Muecas de voltaje			Estado Estable	
	Ruido	Banda Amplia		Estado Estable	0 - 1%
Flicker		< 25Hz	Intermitente	0,1 - 7%	
Variaciones en la frecuencia			< 10s		

Fuente: Elaboración propia.



3.3.2 Estándar IEEE 519-2014

La norma define las “Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia”, se encuentra vigente a partir de 1992 y actualizada en el 2014. Fue desarrollada con el fin de limitar la distorsión armónica total e individual de voltaje y corriente producto de la incorporación de cargas no lineales. Está enfocada más para los puntos de PCC en el diseño de los sistemas eléctricos, de tal manera que por responsabilidad compartida para el control tanto el usuario y el distribuidor, puedan acceder al mismo punto de medición de los índices de armónicos [49] [64].

En el caso que se presente una distorsión armónica de corriente es necesario verificar la relación de cortocircuito (*SCR*, por sus siglas en inglés), la que define como la relación entre la corriente máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común (I_{sc}) y la corriente máxima de carga a frecuencia fundamental (I_L), que está dada por la ecuación 7 [11] [10].

$$SCR = \frac{I_{sc}}{I_L} \tag{7}$$

Para determinar el valor de la corriente de cortocircuito en el punto común de acoplamiento I_{sc} , es necesario verificar la impedancia del transformador (X_T) ubicado en la placa de datos del transformador la que se puede calcular con la ecuación 8. Otra forma de calcular la corriente de cortocircuito es considerando la resistencia en función al calibre del conductor y multiplicado por la distancia que recorre el cable desde su punto de suministro hacia el tablero, la cual se puede calcular por medio de la ecuación 9 [11] [12].

$$I_{sc} = \frac{1}{X_T} \tag{8}$$

$$I_{sc} = \frac{V_{nominal}}{R_{conductor} * Distancia} \tag{9}$$

En la Tabla 3.2 se presenta los límites de distorsión máximos para armónicos de corriente individuales impares (h) para cargas no lineales en el PCC con otras cargas, para voltajes de 120V a 69kV, de 69kV a 161kV y mayor a 161kV, en función al valor recomendado de TDD [64] [65].

Tabla 3.2 Límites de la distorsión máximo para armónicos de corriente (impares)- IEEE 519-2014.

VOLTAJES	Relación ISC/IL	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \geq h$	TDD
120V - 69kV	<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
	20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
	50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
	100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
	>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
69kV - 161kV	<20	2,0	3,5	0,8	0,3	0,2	2,5
	20<50	3,5	2,8	1,3	0,5	0,3	4,0



	50<100	5,0	2,3	2,0	0,8	0,4	6,0
	100<1000	6,0	2,8	2,5	1,0	0,5	7,5
	>1000	7,5	3,5	3,0	1,3	0,7	10,0
Mayor a 161kV	<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
	>=50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fuente: Elaboración propia.

Para los valores de armónicos pares se considera el 25% de los valores los establecidos para armónicos impares [54].

Los límites de distorsión de armónicos individual y total de voltaje se muestran en la Tabla 3.3, donde se puede observar que a menor voltaje el límite de distorsión individual y total es mayor, ocurriendo lo contrario a menor voltaje. En los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2% del THD en los terminales DC, el THDV está definido por la impedancia entre el PCC y la fuente generadora y no por las cargas del usuario.

Tabla 3.3 Límites de la distorsión de armónicos individual y total de voltaje – IEEE 519-2014.

Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual de Voltaje (%)	Distorsión total de Voltaje (THD) (%)
Menores a 1kV	5,0	8,0
De 1kV a 69kV	3,0	5,0
De 69kV a 161kV	1,5	2,5
161 kV y más.	1,0	1,5

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Norma IEC 61000-4-15

La norma menciona varios puntos “Técnicas de ensayo y de medida. Medidor de flicker. Especificaciones funcionales y de diseño”. La norma define el cálculo del índice de severidad del flicker de corta y larga duración por medio de la ecuación 1 y 2 mencionadas en el capítulo 2. Esta normativa se relaciona con la IEC61000-3-3 con la que estipulan los límites para los flicker. A continuación, se presenta un resumen de los límites establecidos [66] [67].

Para bajo voltaje el índice P_{st} debe ser menor o igual a 1,0 p.u.

Para bajo voltaje el índice P_{lt} debe ser menor o igual a 0,65 p.u.

El índice de severidad del parpadeo de la luz de corta duración debe ser menor o igual a uno en el 95 % del periodo de medición, durante una semana con intervalos de medición de 10 min. Cuando se someta a ondas cuadradas o senoidales moduladas.



3.3.4 Norma EN50160

Norma europea definida por el CENELEC en el año 2010, establece los valores característicos de voltaje suministrado por la red de distribución para los niveles de bajo y medio voltaje que será proporcionado al cliente. Esta norma es únicamente aplicable a condiciones normales de operación y en el punto de entrega al cliente, pero no aplicables para operaciones realizadas después de generarse un fallo o por el corte del suministro debido a eventos externos [64] [40].

En la Tabla 3.4 se muestra un resumen con los valores límites establecidos por la norma.

Tabla 3.4 Valores límites establecidos por la norma EN50160

Perturbaciones	Características del voltaje de alimentación según EN50160	Límites	Intervalos de evaluación	Porcentaje de medidas dentro de límites durante el intervalo
Frecuencia	Promedio de la frecuencia de cada ciclo durante 10 s	± 1	al año	99,50%
		+4% a -6%		100%
Variaciones de Voltaje	Promedio de la VAC de cada ciclo durante 10 min	$\pm 10\%$	cada semana	99,50%
		$\pm 10\%$ / -15%		100%
Severidad del parpadeo (FLICKER)	P_{lt} 2horas	< 1	cada semana	95%
Huecos de Voltaje	Número de eventos (con $U < 0,9U_n$)	La mayoría duran menos de 1 s y tienen una profundidad inferior al 60% de UN	al año	
Interrupciones cortas	Número de eventos (con $U < 1\% U_n$ y $T < 3$ min)	El 70% de las interrupciones duran menos de 1 s	al año	
Interrupciones Sostenidas	Número de eventos (con $U < 1\% U_n$ y $T > 3$ min)	De 10 a 50	al año	
Sobrevoltajes (60Hz)	Número de eventos (con $U > 1 U_n$ y $T > 10$ ms)	no sobrepasan los 1,5 kV AC		
Sobrevoltajes transitorios	Número de eventos (con $U > 1 U_n$ y $T < 10$ ms)	no sobrepasan los 6 kV de cresta		
Desequilibrio de voltaje	Promedio de la U_{inv}/U_{dir} de cada ciclo durante 10 min	<2%	cada semana	95%
Armónicas de voltaje	Promedio del THD de voltaje referido a UN en cada ciclo durante 10 min	<8%	cada semana	95%
Interarmónicos	Por estudiar			



Fuente: Elaboración propia [40].

La que establece que para el registro de los parámetros de calidad eléctrica se efectúe mediante la instalación de equipos Clase A [68].

3.4 Normativas Nacionales

En Ecuador, la encargada de regular las normas que rigen en el uso de electricidad es la ARCONEL. La regulación vigente para la calidad de energía eléctrica es la No. ARCONEL 005/18 denominada “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica” detalla los atributos de la calidad de servicio eléctrico, aquí se considera la calidad del producto, servicio técnico y comercial [6].

Para el desarrollo de este proyecto se consideró lo relacionado con calidad del producto.

3.4.1 Niveles de Voltaje

La variación del voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en un punto del sistema de distribución determina la calidad. La empresa distribuidora cumple con los niveles de voltaje en un punto de medición si el 95% o más de sus registros durante la etapa de medición están dentro de los límites. Los valores límites permitidos para el índice de nivel del voltaje se muestran en la Tabla 3.5, se aprecia que para bajo voltaje el rango admisible es del $\pm 8\%$.

Tabla 3.5 Límites para el índice de nivel de voltaje.

Nivel de Voltaje	Rango admisible
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5,0 \%$
Medio Voltaje	$\pm 6,0 \%$
Bajo Voltaje	$\pm 8,0 \%$

Fuente: Elaboración propia [6].

La variación del voltaje se calcula aplicando la ecuación 10 [6]:

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} * 100 \quad [\%] \quad (10)$$

Dónde:

ΔV_k : Variación del voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en el punto **k**.

V_k : Voltaje de suministro en el punto **k**, determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3s) en un intervalo de 10 min.

V_N : Voltaje nominal en el punto **k**.



La calidad de voltaje se determina como las variaciones de los valores eficaces RMS medidos en intervalos de cada 10 min con relación al voltaje nominal, durante un periodo de tiempo no inferior a 7 días continuos [6].

3.4.2 Flicker

Se evalúa de acuerdo al P_{st} , el cual mide la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de voltaje con intervalos de medición de 10 min. El P_{st} se evalúa conforme a la norma IEC 61000-4-15 [6]. Se puede calcular con la ecuación 1 mencionada en el capítulo 2.

La normativa establece que la distribuidora cumple cuando el P_{st} registrado es igual o mayor al 95% y menor o igual al límite propuesto que es la unidad. Cuando el P_{st} es igual a uno alcanza el valor máximo que puede soportar el ojo humano sin molestias la variación de la luminancia y se le conoce como límite de irritabilidad [6].

3.4.3 Distorsión armónica de voltaje.

La norma evalúa la distorsión de voltaje individual y total de acuerdo a las ecuaciones 11, 12 y 13 [6]:

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} * 100 \quad [\%] \quad (11)$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_n} * 100 \quad [\%] \quad (12)$$

$$THD_k = \left[\frac{1}{V_n} \right] \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} * 100 \quad [\%] \quad (13)$$

Dónde:

$V_{h,k}$: Armónica de voltaje **h** en el intervalo **k** de 10min.

$V_{h,i}$: Eficaz (rms) de la armónica de voltaje **h** (para $h=2, 3, \dots, 50$), medido cada 3s ($i=1, 2, \dots, 200$).

$DV_{h,k}$: Factor de distorsión individual de voltaje de la armónica **h** (para $h=2, 3, \dots, 50$), en el intervalo **k** de 10min.

THD_k : Factor de distorsión armónica total de voltaje (%).

V_n : Voltaje nominal en el punto de medición (V).



En la Tabla 3.6, se puede observar los límites máximos de distorsión armónica de voltaje individual y total [6], donde para niveles de bajo voltaje la armónica individual es del 5% y la distorsión total de voltaje es 8%.

Tabla 3.6 Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)

Nivel de Voltaje	Armónica individual (%)	Distorsión total de Voltaje (THD) (%)
Bajo Voltaje	5,0	8,0
Medio Voltaje	3,0	5,0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1,5	2,5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1,0	1,5

Fuente: Elaboración propia [6].

Para mediciones la norma recomienda utilizar un medidor de distorsiones armónicas de voltaje que cumpla con lo especificado en la norma IEC 61000-4-7.

3.4.4 Desequilibrio de voltaje.

La norma establece la evaluación en un punto del sistema de distribución en base a la ecuación 14 [6]:

$$\text{Desequilibrio de Voltaje} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| * 100 \text{ [\%]} \quad (14)$$

Dónde:

V^- : Componente de secuencia negativa de voltaje determinado como el promedio de las medidas registradas (cada 3s durante 10 min).

V^+ : Componente de secuencia positiva de voltaje determinado como el promedio de las medidas registradas (cada 3s durante 10 min).

El valor límite establecido por la normativa en un punto de medición es del 2% para todos los niveles de voltaje [6].

3.4.5 Factor de potencia

La normativa ARCONEL 005/18 que se encuentra vigente, no establece el valor límite para el factor de potencia por lo que para esta investigación se considera la regulación del ARCONEL 004/18 sobre Distribución y Comercialización de energía eléctrica. La que establece el valor de



0,92 como valor mínimo aceptable del factor de potencia; y recomienda realizar mediciones en periodos de 10 min a condiciones normales de funcionamiento durante 7 días [69].

3.5 Valores a considerar para la evaluación de calidad de energía

Luego de realizar una revisión bibliográfica en los párrafos anteriores se procede a establecer los valores a contrastar con la información obtenida en el proceso de medición y análisis a realizar en el capítulo precedente. En la Tabla 3.7 un cuadro de resumen con los valores límites obtenidos y las normas consideradas.

Tabla 3.7 Cuadro de resumen con los valores límites obtenidos y las normas consideradas.

PARAMETROS	CRITERIOS A CONSIDERAR	NORMATIVAS
Niveles de Voltaje	$\pm 8\%$ del voltaje nominal	ARCONEL 005/18
Factor de Potencia	Valor mínimo de 0,92p.u.	ARCONEL 004/18
Flicker	El 95% o más de los registros no deben superar la unidad.	IEC 61000-4-15 IEC 61000-3-3
	$P_{st} \leq 1$ y $P_{It} \leq 0,65$	
Armónicos de Voltaje	THD del 8%	IEEE 519-2014
	Individual 5%	
Armónicos de Corriente	TDD no debe sobrepasar el % establecido en la tabla 3.2, como resultado del cálculo Relación SCR con la ecuación 7 y 8	IEEE 519-2014
Desequilibrio de Voltaje	Menor al 2% para todos los niveles de voltaje	ARCONEL 005/18 IEEE 1159
Interrupciones	< 3 min Corta duración	EN 50160
	> 3 min de larga duración	
Transitorios	Impulso: < a 50ns: 1ms - 50ns: > a 1ms	IEEE 1159
	Oscilatorios: 5kHz a 5 MHz 0,3ms - 5µs	
Variaciones de Corta Duración	Elevaciones (Swell): 0,5 ciclos - 1 min	IEEE 1159
	Huecos (Sag): 0,5 ciclos - 1 min	
Variaciones de Larga Duración	Sobrevoltaje: mayor al 110% > 1 min	IEEE 1159
	Bajo Voltaje: menor al 90% > 1 min	
Variaciones en la Frecuencia	Normal: $\pm 1\%$ (59.4 – 60.6 Hz)	EN50160
	Critica: -6%, +4% (56.4 – 62.4Hz)	

Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En el presente capítulo se hace la selección del equipo de medición de la calidad de energía, se analiza y define las seguridades de protección personal y el método de medición. Se realiza un análisis eléctrico del entorno y se identifica su realidad, los puntos y sus tiempos de medición. Se configura el equipo para la realización de las pruebas y recolección de datos, para finalmente por medio de un análisis, identificar los problemas presentes en el suministro eléctrico.

4.2 Selección del equipo de medición

Estos se clasifican en analizadores permanentes y portátiles, son de gran importancia para la búsqueda de fallos, ya que permiten realizar mediciones en tiempo real y registrar los eventos que ocurren en la red eléctrica. Esta información es necesaria para identificar los problemas y plantear posibles soluciones [70].

Los analizadores portátiles son utilizados por su versatilidad, debido a que pueden ser instalados y desinstalados rápidamente en cualquier punto del sistema eléctrico. Se clasifican en cuatro categorías de acuerdo a la normativa IEC 1010 que se refiere a seguridad de equipos. Esta clasificación (CAT) está en función al pico de voltaje o sobretensiones transitorias que puede estar presente en un sistema eléctrico. Cuanto más alto sea el número CAT, mayor será el riesgo potencial de corrientes transitorias que el equipo puede soportar [71] [72]. Estas categorías son:

CAT I: Utilizadas para mediciones donde los equipos estén conectados en forma directa a la red, como por ejemplo baterías [72].

CAT II: Utilizadas para mediciones donde los equipos eléctricos se encuentren conectados directamente a la red, como por ejemplo electrodomésticos y aparatos electrónicos [72].

CAT III: Utilizadas para mediciones donde los equipos se encuentran conectados de forma directa y permanente en una instalación, posterior al interruptor de la acometida. Por ejemplo, el tablero de distribución, interruptores, sistema de iluminación, tomacorrientes para grandes cargas [72].

CAT IV: Utilizadas para mediciones entre la red y el punto de suministro de bajo voltaje, como tablero de distribución principal, acometidas, líneas de distribución, medidores de consumo de electricidad [72].



Se puede encontrar equipos portátiles para sistemas eléctricos monofásicos y trifásicos en distintas marcas a nivel mundial, donde las más representativas son Amprobe, Extech, Fluke, Hioki, Tektronix [73]. Estos equipos poseen un manejo de datos, registros y visualización en tiempo real [70]. Siendo FLUKE una marca que ha alcanzado las primeras posiciones en diferentes mercados, caracterizándose por su portabilidad, robustez, seguridad, facilidad de manejo y sus estándares de calidad [74].

FLUKE posee diferentes equipos de medición para la calidad de energía los cuales se clasifica en: Medidores monofásicos, analizadores de potencia de alta precisión y trifásicos [75]. De esta última, dos equipos cumplen con los requerimientos de los equipos de medición mencionados por la norma EN50160 y estudiados en el capítulo anterior y definidos como equipos de medición clase A.

La norma IEC 61000-4-30 establece tres categorías (A, B, S) para los equipos de medición, donde los de clase A permiten mediciones exigentes, precisas para la verificación y cumplimiento de normativas [76]. En la Tabla 4.1 se realiza una comparativa de los equipos de medición de calidad de energía Clase A de FLUKE, el Analizador de la energía y de la Calidad Eléctrica FLUKE 435 y el Registrador trifásico de calidad eléctrica FLUKE 1760, considerando parámetros y criterios que permitan justificar la selección del equipo utilizado en esta investigación.

Tabla 4.1 Comparativa de los equipos de medición de calidad de energía Clase A.

PARÁMETROS Y CRITERIOS	ANALISADORES TRIFÁSICOS	
	435	1760
Registro máximo de Armónicos	50	50
Registro máximo de Voltaje	1000V	1000V
Registro máximo de Corriente	3000A	1000A
Frecuencia	51Hz a 69Hz	51Hz a 69Hz
Medición de: V, I, P, Cos Θ , kWh	X	X
Variaciones de voltaje	X	X
Interrupciones	X	X
Desequilibrio de voltaje	X	X
Medición de corriente en el neutro	X	X
Transitorios	X	X
Captura de transitorios	X	X
Factor de potencia	X	X
Medición de THD (V, I)	X	X
Interarmónicos	X	X
Flicker	X	X
Calculadora de pérdida de energía	X	
Función de registro de datos	X	X
Software	PowerLog	PQ Analyze
Autonomía de la Batería	7 horas	40 min
Seguridad del Equipo	1000 V CAT III 600 V CAT IV	1000 V CAT III 600 V CAT IV
Altura de operación (m)	2000	2000
Costo del Equipo en base a Proteco Coasin S.A	\$10,700+ Iva	\$21,700 + Iva

Fuente: Elaboración propia [77].

En base a la Tabla 4.1 se ha determinado que los dos equipos cumplen con los requerimientos de medición para el desarrollo de esta investigación, pero se selecciona al analizador FLUKE 435 debido a que posee mayor capacidad de medir corriente, mayor autonomía de la batería y su fácil disponibilidad.

El equipo se basa en las normativas EN50160, IEC 6100-4-15 descritas anteriormente y su manejo es por medio de un menú, que permite la configuración como tiempos e intervalos de medición y almacenamiento, parámetros de calidad de energía eléctrica. Permite visualizar en tiempo real las formas de onda de las señales eléctricas, diagramas fasoriales entre otros, dispone de cuatro entradas BNC para pinzas amperimétricas o de corriente y cinco entradas para pinzas de voltaje. En la figura 4.1 se muestra el equipo de medición FLUKE 435 utilizado.



Figura 4.1 Equipo de medición FLUKE 435 utilizado.

Fuente: Elaboración propia.

La conexión del equipo depende del tipo de configuración presente en el entorno a medir y se encuentran descritas en su respectivo manual y equipo [78]. Las mismas se pueden apreciar al final de este documento en el ANEXO 1.

4.3 Método para la medición de la calidad de energía

Bajo criterios técnicos, se muestra los pasos a seguir en el proceso de conexión y desconexión del equipo:

Iniciar las mediciones.

- El equipo debe encontrarse apagado.
- Conectar la pinza de voltaje a tierra.
- Conectar la pinza de voltaje del neutro.
- Conectar la pinza de voltaje a los conductores de fase siguiendo un orden A, B, C.



- Conectar las pinzas amperimétricas o de corriente verificando la dirección de la flecha, la misma que indica a dónde va la corriente apuntando la dirección hacia la carga y siguiendo un orden en las fases A, B, C.
- Encender el equipo.

Finalizar las mediciones.

- El equipo debe encontrarse apagado.
- Desconectar las pinzas amperimétricas o de corriente fase C, B, A y neutro.
- Desconectar las pinzas de voltaje de cada fase C, B, A
- Desconectar la pinza de voltaje del neutro.
- Desconectar la pinza de voltaje de tierra.

Para realizar procedimientos de medición se recomienda utilizar un equipamiento adecuado de protección personal, que va en dependencia del voltaje disponible del entorno de trabajo.

4.4 Seguridad y equipos de protección personal

Son de carácter obligatorio para realizar una determinada actividad con estos equipos establecidos por la Asociación Nacional de Protección Contra Incendios (*NFPA, por sus siglas en inglés*) o por recomendaciones nacionales. Se busca proteger de electrocuciones, quemaduras, explosiones, contactos accidentales u otros riesgos que atenten contra la salud y seguridad del personal. Pueden ser calzado, ropa especial, cascos, gafas, guantes entre otros. Varios autores recomiendan para desarrollar este tipo de actividades eléctricas laborar sin conexión y evitar trabajar solo [79] [78].

A nivel de Ecuador se desconoce de normativas que definan las clases de equipos de protección personal necesarios a utilizar para trabajos eléctricos en bajo voltaje. Pero existen normativas internacionales que establecen las clases de equipos de seguridad a utilizar frente a un choque eléctrico. A continuación, se hace un detalle de cada uno de los equipos.

Casco: La normativa EN50365 establece cascos aislantes de electricidad para el uso en bajo voltaje, menor a 1000V AC y es de clase 0 [80] [81].

Guantes: La normativa EN60903 define a 6 tipos de guantes que están en función del voltaje a utilizar. De estos, la categoría que se ajusta para esta investigación es la 00, con voltaje de utilización máximo de 500V AC [79] [81].

Ropa aislante: La normativa EN50286 establece la ropa de protección para trabajos en bajo voltaje para instalaciones menores a 500V AC, evitando el paso de corriente a través del cuerpo. La ropa usada en bajo voltaje debe ser una chaqueta y pantalón de algodón o mezclas de algodón – poliéster [81] [82].

Calzado aislante: La normativa EN50321, establece dos clases de calzado la clase 00 para voltajes menores a 500V AC y la clase 0 para voltajes menores a 1000V AC y no se debe portar accesorios o elementos metálicos [79] [81].

En la figura 4.2 se puede apreciar la indumentaria que se encuentra acorde a la normativa indicada y que fue utilizada en el proceso de medición de la calidad de energía eléctrica en el tablero principal.



Figura 4.2 Indumentaria que se encuentra acorde a la normativa indicada.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Identificación de la problemática del entorno.

El edificio de la Facultad de Informática y Electrónica fue inaugurado el 9 de mayo de 2015, dispone de 17 aulas y 10 laboratorios. En la primera planta se encuentra un aula, un auditorio y cinco laboratorios, uno de ellos está asignado al laboratorio de automatización que contiene a la Industria 4.0. El plano de la primera planta y el diagrama unifilar del edificio se encuentran en el ANEXO 2 y 3 respectivamente.

En base a entrevistas, al personal de la facultad, se determina que desde la creación del edificio hasta la presente fecha no se ha realizado un estudio de la calidad de energía presente en el edificio. Se menciona que se han registrado daños en equipos electrónicos como proyectores, computadores personales y de escritorio, en algunos casos afectando a las unidades de almacenamiento o al equipo en su totalidad. Algunos de estos problemas se han presentado por cortes de energía en las instalaciones.

La facultad de Informática y Electrónica posee uno de los tres laboratorios de Industria 4.0 existentes en la ESPOCH, con un costo de inversión muy alto. La Industria 4.0 es conocida como

la cuarta revolución industrial, permite la digitalización de los procesos industriales por medio de la interacción de la inteligencia artificial con las máquinas y la optimización de recursos [83]. Involucra nuevas tecnologías como robótica, nanotecnología, interconexión de dispositivos entre otros objetos a través de internet [84].

El laboratorio fue inaugurado el 21 de marzo de 2019 y está destinado para la realización de prácticas con los estudiantes de la facultad y de la institución. En agosto de 2019 por medio de contratación se realiza la instalación de acometidas eléctricas y el reforzamiento de la puesta a tierra para el edificio específicamente para el Data-center de la facultad. La malla de puesta a tierra se ubica junto a la cámara de transformación como se muestra en la figura 4.3. Debido al tipo de suelo donde fue instalado, se utilizaron acondicionadores de tierra, gem y cemento conductor para disminuir el valor de la resistencia de la malla de tierra.



Figura 4.3 Instalación de la nueva puesta a tierra para el Data-Center de la facultad.

Fuente: Elaboración propia.

Del informe presentado se determinó que para las mediciones de la resistencia de puesta a tierra se utilizó el equipo FLUKE 1625-2 y se aplicó el método de medición de la caída de Potencial. Se realizaron tres pruebas que presentaron valores de $0,70\Omega$ a distancias de 2m y 1,22m; de $0,74\Omega$ a distancias de 5m y 3,06m; y $0,93\Omega$ a distancias de 10m y 6,12m. Los que al ser menores al valor de 1Ω definido como límite para sistema de puesta a tierra de equipos electrónicos y establecido por la norma IEEE 1100, se determina que cumple con lo propuesto.

Por observación en el proceso de instalación y medición de la puesta a tierra y del análisis del informe técnico entregado se corrobora estos valores y se determina que no existe problemas el sistema de puesta a tierra del edificio.

4.6 Análisis eléctrico del entorno.

El espacio actualmente ocupado por el laboratorio donde funciona la Industria 4.0 inicialmente estaba destinado como aula (101) según especifican los planos proporcionados por el

departamento de Mantenimiento y Desarrollo Físico (MDF) de la institución. Por lo que se vio la necesidad de realizar un censo de las cargas existentes en el laboratorio, las cuales se clasificaron en tres grupos:

En la figura 4.4 se aprecia las cargas de cinco estaciones multimedia para la enseñanza de los Sistemas Físicos Cibernéticos o también conocida como *Sistema Físico Cibernético*, que están compuestas por:

- Una interfaz UniTrain con instrumentos virtuales (básico VI) 120W.
- Un ¡Panel LOGO!8 inclusive, módulo DM8, interfaz IP, 24 V/1 A, 12 entradas digitales, 4 entradas analógicas, 8 salidas digitales 70W.
- Un equipo de cómputo, con una potencia total de 320W.
- Una fuente de alimentación CC 24V/6A estabilizada 280W.

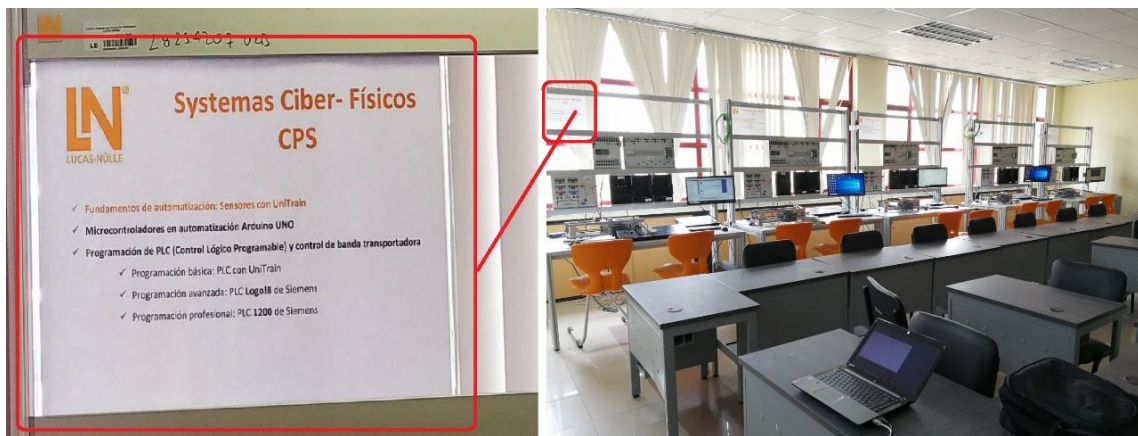


Figura 4.4 Las cinco estaciones de trabajo de los Sistemas Físicos Cibernéticos.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.5 se aprecia la carga de la estación de simulación experimental para la automatización de procesos de trabajo denominada *Planta de Industria 4.0*, compuesta por:

- Un PLC SIMATIC S7-1516-3 PN/DP 32 DE, 32 DA, 8 AE, 4 AA, con alimentación de 24 V / 6 A 220V 280W.
- Un ruteador con módem DSL integrado y punto de acceso WLAN 50W
- Un PLC SIMATIC S7-1200 14 DE, 10 DA, 2 AE, 1 AA, de Fuente de alimentación 24V / 5 A 70W.
- Un equipo de cómputo, con una potencia total de 320W.
- Ocho fuentes de alimentación de CC 24V a 5A para cintas IMS LM9672 120W.



Figura 4.5 Planta de Industria 4.0

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.6 se observa las cargas de equipos individuales y especiales como:

- Dos compresores modelo SE2902-9L8, con alimentación de 110V a 60Hz de 340W.
- Un PLC S7-1200, S7-1214 y un Panel táctil KTP700. 120-240V – 1.3A 70W.
- Una pizarra digital VIVITEK, con alimentación de 120V a 700W.
- Dos robots industriales KUKA modelo KR6 R700 sixx, 6 ejes, 6 kg a 12A, 200-230V de 2000W.





Figura 4.6 Cargas de equipos individuales y especiales.

Fuente: Elaboración propia.

El laboratorio dispone de seis puntos de iluminación similares a la que se muestra en la figura 4.7, cada uno incorpora tres luminarias de tipo tubos - fluorescentes de 32W. Disponen de un tomacorriente de 220V y 10 tomacorrientes de 120V.



Figura 4.7 Punto de iluminación del laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar las conexiones de los tomacorrientes se identificó que cuatro tomacorrientes de 120V presentaban la fase y el neutro invertido y los restantes no identificaban a la línea de tierra que lo conectaba como se puede evidenciar en la figura 4.8. Lo que fue rectificado antes de iniciar el proceso de medición, como elemento de prevención ante daños en el funcionamiento de los equipos.



Figura 4.8 Evidencia de las fallas en los circuitos de tomacorrientes.

Fuente: Elaboración propia.

Al revisar los circuitos de tomacorrientes se observó que los cables conductores no son de calibre y tipo adecuado, ya que en fases se identifica cables de calibre #10, #12, #16 de tipo rígido y flexible. Según lo establecido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) para Instalaciones Eléctricas, se recomienda para circuitos de tomacorrientes normales cables de calibre #12 AWG de tipo THHN para fase y neutro o para tomacorrientes especiales cables de calibre #10 AWG de tipo THHN y para conexiones a tierra utilizar un cable de calibre menor según sea el caso. Se evidencia conexiones superpuestas con canaletas para cuatro tomacorrientes de 120V que parten de un tomacorriente de pared, sin respetar el código por colores en instalaciones eléctricas establecidos por el NEC. Que define el color verde para tierra, blanco para neutro y para fase cualquier otro color diferente, sugiere negro o rojo [85].

En el proceso de análisis se identificó un subtablero de distribución para luminarias y tomacorrientes denominado ST – 01, ubicado en el primer nivel del edificio, el mismo que se puede apreciar en la figura 4.9. Este subtablero contiene 12 espacios para breakers de los cuales nueve se encuentran ocupados. De estos, cinco son de 16A y los restantes son de 20A. Se encarga de controlar entre otras cargas aquellas que se encuentran el laboratorio.



Figura 4.9 Subtablero de distribución ubicado en el primer nivel del edificio.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.10 se observa el tablero principal de la Facultad, ubicada en la parte exterior del edificio, este posee un Breaker trifásico general de 60A que protege a cuatro Breakers trifásicos de 40A. Se observa que los cables rojo y azul sobrepuestos en el cuarto breaker alimentan a un

subtablero de distribución para tomacorrientes de 220V ubicado dentro del laboratorio de automatización.



Figura 4.10 Tablero principal del edificio de la facultad.

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia la existencia de un transformador de 75KVA de tipo Padmounted que alimenta varias cargas, una de ellas es la del edificio de la Facultad de Informática y Electrónica. Los datos de placa del transformador se muestran en la Tabla 4.2. Se encuentra instalado en una cámara de transformación ubicada en la parte posterior del edificio, a dos metros del transformador se halla el tablero general de distribución como se evidencia en la figura 4.11.

Tabla 4.2 Datos de placa del transformador.

PLACA TRANSFORMADOR			
Potencia Nominal	75 KVA		
Voltaje Primario	13800 V	Voltaje Secundario	220/127 V
Conexión	DYN5	Frecuencia	60 Hz

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.11 Ubicación del transformador y el tablero general de distribución.

Fuente: Elaboración propia.

Se identificó que en el edificio existe cargas en funcionamiento permanente que no pueden ser desconectadas por su naturaleza, como es el caso de los sistemas de seguridad (cámaras de video), equipos de red (routers), servidores, equipos de alimentación ininterrumpida (UPS) y el sistema de refrigeración para el servidor del Data Center.

En la figura 4.12 se muestra los circuitos de tomacorrientes y luminarias presentes en el laboratorio con la ubicación de los equipos existentes, donde:

- La línea de color negro representa la fase (127V).
- La línea de color gris representa el conductor neutro.
- La línea de color amarillo resalta el conductor de tierra con fallo.
- Las líneas entrecortadas son los circuitos que presentan error en la línea de tierra y fueron removidos.
- Las líneas de color rojo (127V) y azul (127V) son los circuitos de alimentación para el subtablero de 220V.
- La línea de color morado representa el circuito de luminarias.

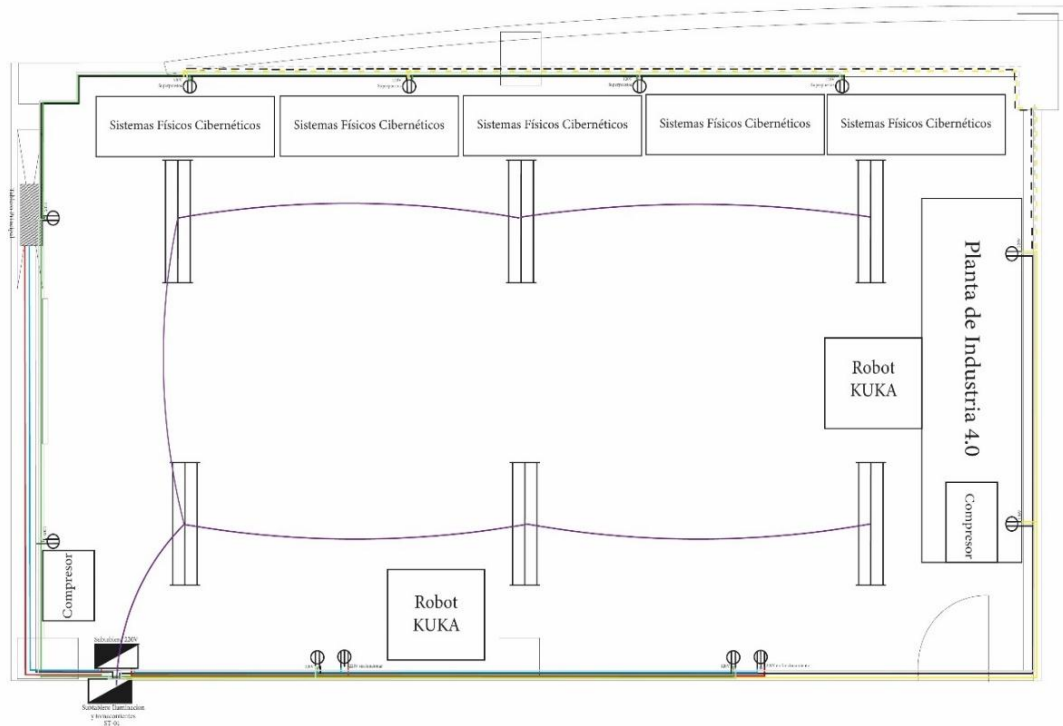


Figura 4.12 Circuitos de tomacorrientes y luminarias del laboratorio con la ubicación de los equipos.

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Planificación de las mediciones.

Como parte previa a la etapa de evaluación de la calidad de energía eléctrica se considera analizar el voltaje, corriente, frecuencia suministrados y armónicos generados de cada equipo instalado en el laboratorio, al ponerlo en funcionamiento normal no mayor a una hora con intervalos de registro de un minuto.

Según investigaciones bibliográficas se recomienda que, las mediciones de calidad de energía eléctrica se deben realizar en los tableros principales y subtableros de distribución, donde se presentan la mayor cantidad de problemas por la carga que contienen [86]. Se sugiere que el intervalo de tiempo para un análisis depende de la actividad o la demanda que presente la institución y puede variar de un día hasta varios meses [27].

Esto concuerda con lo estipulado en la regulación de la ARCONEL 005/18 en lo referente a los puntos de medición de la calidad del producto, en donde literalmente menciona: “Que la toma de mediciones, registro y almacenamiento para usuarios de bajo voltaje serán efectuados en los puntos más cercanos de entrega. Para transformadores de distribución, las mediciones se realizarán en los bornes de bajo voltaje” [6].

En base a estas recomendaciones y al análisis eléctrico del entorno se considera que la medición en el tablero general no reflejaría valores reales sobre la calidad de energía suministrada al edificio ya que el transformador es compartido con otras edificaciones. Se considera que el tablero principal es el ideal para realizar la evaluación de la calidad de energía eléctrica, debido a

que de este parte las conexiones de 120V y 220V que alimentan a las cargas presentes en el laboratorio.

Para lo cual se planificó realizar las mediciones en el tablero principal unificando las cargas máximas generadas en actividades normales en el edificio y el laboratorio. Con una tasa de muestreo de 10min durante 7 días según lo establecido por la regulación de la ARCONEL 005/18.

4.8 Pruebas y análisis de resultados

En base a lo mencionado, en los capítulos anteriores se determina que las pruebas de calidad de energía eléctrica se basan en el análisis de voltaje, corriente, frecuencia, flicker, desequilibrio, transitorios, distorsión armónica de voltaje y corriente total e individual, factor de potencia y la potencia por medio del analizador FLUKE 435, que fue el equipo utilizado en este estudio. Se consideró incluir en este documento las imágenes proporcionadas por el equipo sin ninguna modificación, para no incluir distorsión al gráfico y garantizar su análisis. Considerando las recomendaciones realizadas por el personal técnico de empresas dedicadas a este tipo de evaluación y por la constatación de la inclusión de estas graficas en los informes técnicos entregados a las empresas como resultado de su análisis. A continuación, se hace un detalle de los dos tipos de pruebas planificadas en esta investigación.

4.8.1 Evaluación para cada equipo del laboratorio

Consiste en el registro por cada lectura de los datos mínimos, medios y máximos de voltajes entre la línea 2 y el neutro (L2N) y entre neutro y tierra (LNG), de corriente de la línea 2 (L2) y neutro (LN), frecuencia y los armónicos de voltaje y corriente por cada equipo de 120V operando a un voltaje nominal de 127V. Incluyendo al registro anterior datos de medidas de voltajes entre la línea 3 y el neutro (L3N), y la corriente de la línea 3 (L3) para equipos de 220V, operando a igual voltaje nominal. En la figura 4.13 se evidencia el proceso de la instalación del equipo en una de las pruebas.



Figura 4.13 Proceso de la instalación del equipo en una de las pruebas.

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación se aplicó a cuatro equipos las mismas se detallan a continuación:

Sistema Físico Cibernético: Las cargas que lo conforman se encuentran conectadas a una regleta que soporta un máximo de 16A. Se generaron 62 registros, durante 1 hora de funcionamiento normal del equipo. Sus resultados se observan en la tabla 4.3, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos evaluados en función de parámetros y líneas según sea el caso.

Tabla 4.3 Resultados de las mediciones realizada al Sistema Físico Cibernético.

Valores	VOLTAJE (V)						CORRIENTE (A)						FRECUENCIA (Hz)		
	L2N			LNG			L2			LN			MIN	MED	MAX
	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX			
MIN	122,71	124,39	125,07	38,12	39,10	39,27	0,00	1,00	2,00	0,00	2,00	3,00	59,93	59,96	59,98
PROM	123,87	124,94	125,65	43,97	45,05	46,05	0,98	1,05	2,44	0,98	2,00	3,74	59,97	60,00	60,03
MAX	124,96	125,48	126,18	46,41	52,85	55,23	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	5,00	60,03	60,04	60,06

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 4.3 se observa que los valores del voltaje de la línea 2 con respecto al neutro (L2N) no sobrepasan los límites permitido del $\pm 8\%$ para el voltaje nominal según la regulación ARCONEL 005/18. Se evidencia la presencia de voltajes en la línea neutro - tierra (LNG) mayores a 2V considerado como normal [87], lo que indica problemas en la conexión en el circuito de alimentación del tomacorriente. Se observa que, en la línea 2 (L2) el consumo máximo de corriente registrado es de 3A y en la línea neutro (LN) de 5A, lo que indica que existe presencia de armónicos.

Al analizar la frecuencia se observa que los valores obtenidos no sobrepasan los límites del $\pm 1\%$ establecido por la norma EN50160. Lo cual indica que la frecuencia cumple con la norma.

En la figura 4.14 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N durante el periodo de evaluación del Sistema Físico Cibernético, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 126,39V y un mínimo de 122,71V.

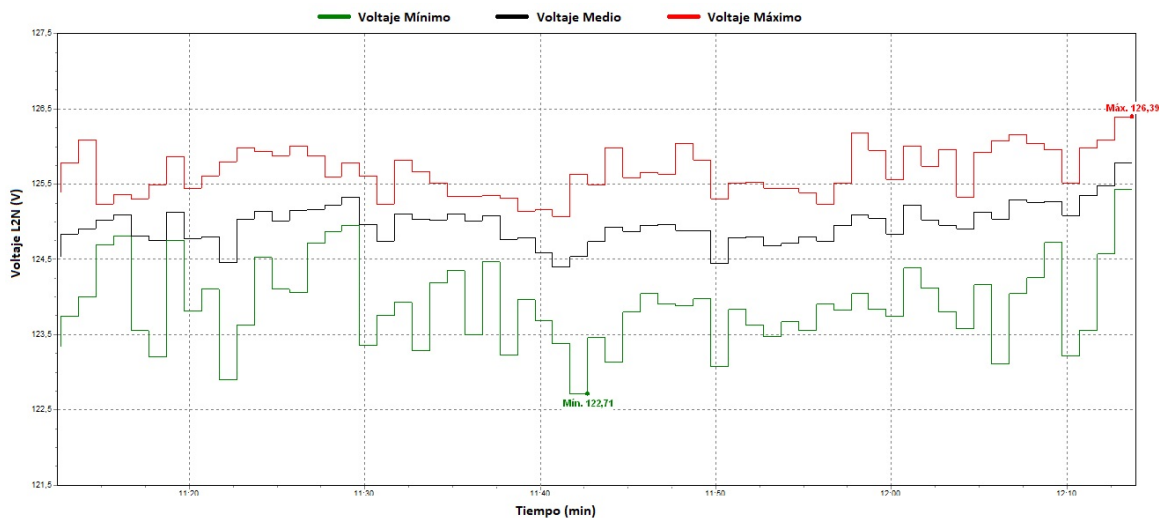


Figura 4.14 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.15 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG durante el tiempo de evaluación del Sistema Físico Cibernético, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 55,23V y un mínimo de 38,12V.

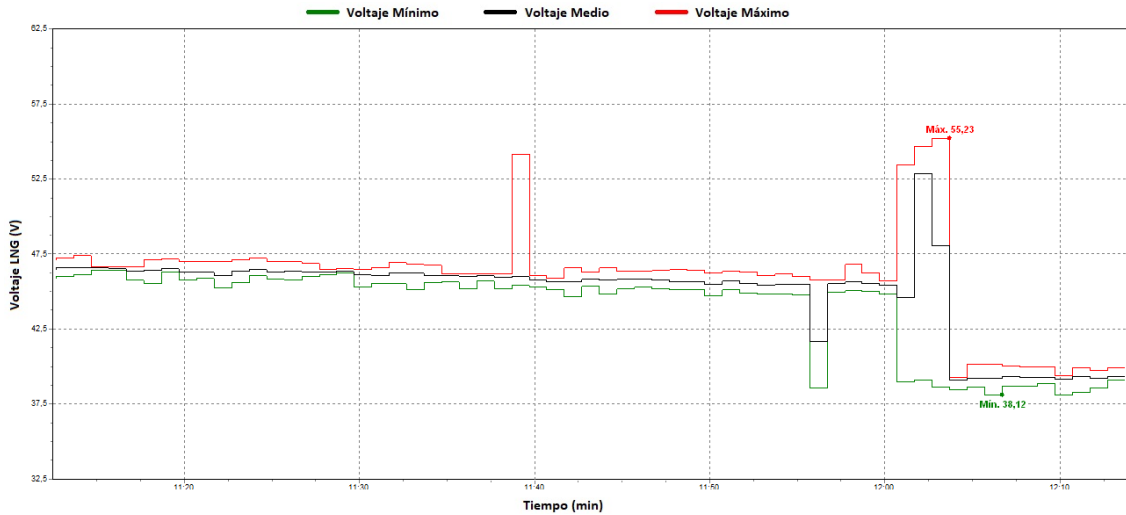


Figura 4.15 Voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.16 se muestra la corriente máxima, media y mínima de la L2 durante el tiempo de evaluación del Sistema Físico Cibernético, en la que se evidencia 27 valores de corrientes máximas de 3A y dos valores mínimos de 0A.

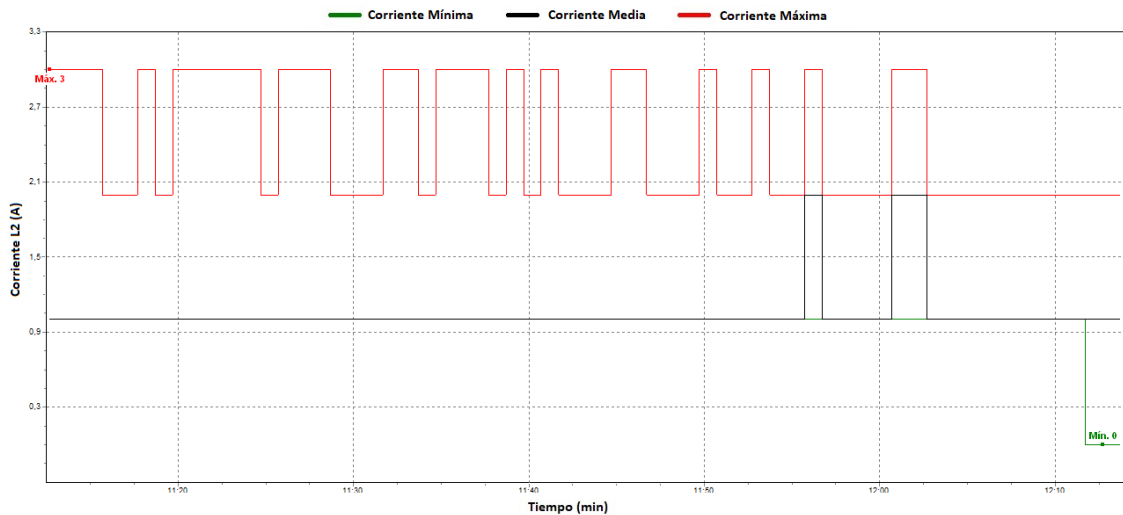


Figura 4.16 Corriente máxima, media y mínima de la L2.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.17 se muestra la corriente máxima, media y mínima en la LN durante el tiempo de evaluación del Sistema Físico Cibernético. En la que se evidencia dos valores de corrientes máximas de 5A y dos valores mínimos de 0A.

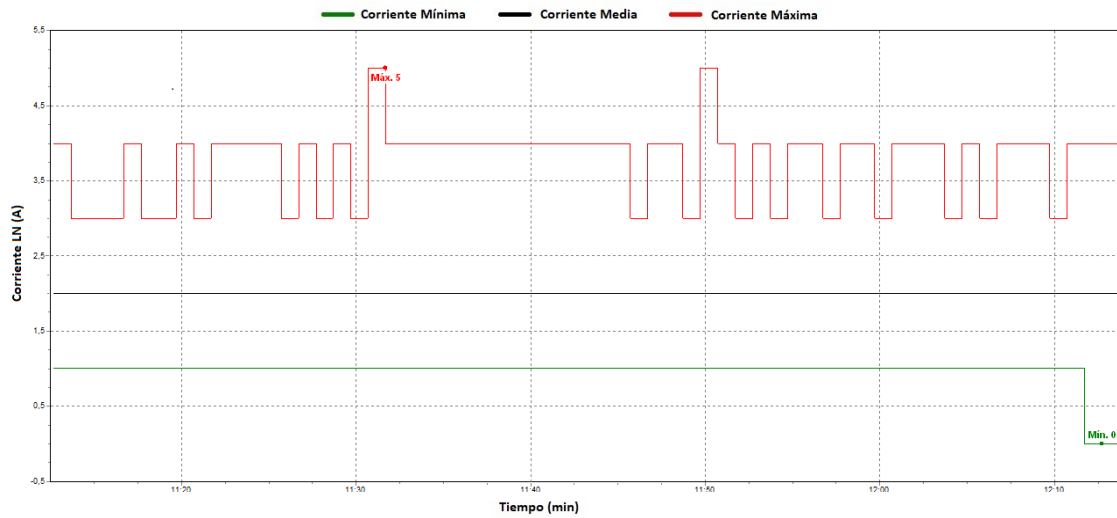


Figura 4.17 Corriente máxima, media y mínima en la LN.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.18 se muestra la frecuencia máxima, media y mínima durante el tiempo de evaluación del Sistema Físico Cibernético, en la que se evidencia un único valor de frecuencia máxima de 60,063Hz y un mínimo de 59,926Hz.

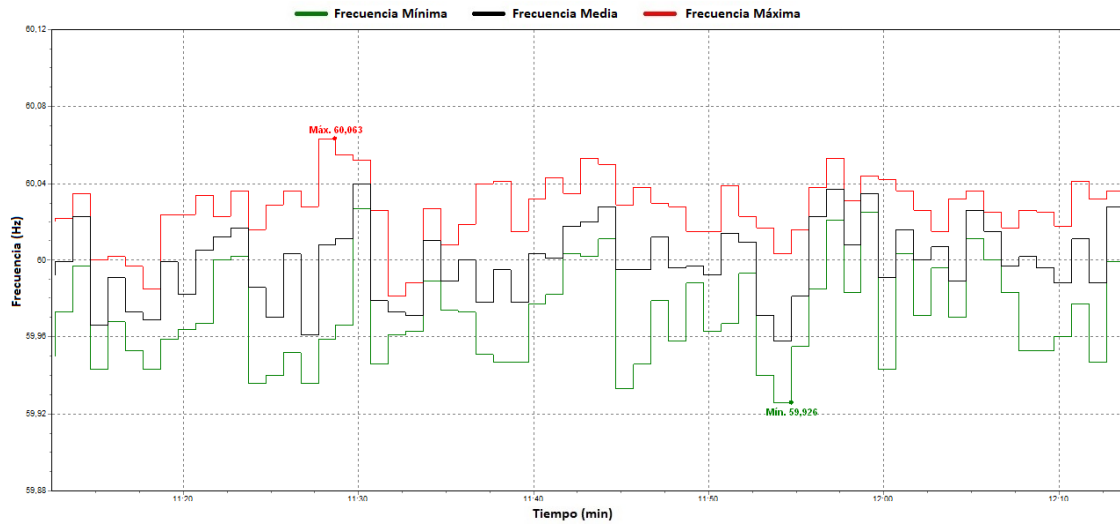


Figura 4.18 Frecuencia máxima, media y mínima.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Planta de Industria 4.0: Las 15 cargas que lo conforman se encuentran conectadas en grupos de cinco cargas a tres regletas, dos de las cuales se conectaban en serie, como se puede observar en la figura 4.19. Se generaron 37 registros, durante 36min de funcionamiento normal

del equipo. Sus resultados se observan en la tabla 4.4, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos evaluados en función de parámetros y líneas según el caso.



Figura 4.19 Evidencia de conexión de cargas por regleta.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4 Resultados de las mediciones realizadas a la Planta de Industria 4.0.

Valores	VOLTAJE (V)						CORRIENTE (A)						FRECUENCIA (Hz)		
	L2N			LNG			L2			LN			MIN	MED	MAX
	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX			
MIN	125,76	126,51	126,88	9,95	58,72	58,82	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00	59,94	59,97	60,00
PROM	126,82	127,47	128,02	57,56	59,44	59,80	1,97	2,11	3,08	1,97	2,95	4,05	59,97	60,00	60,03
MAX	128,26	128,44	129,32	59,77	60,06	60,62	2,00	3,00	4,00	2,00	3,00	5,00	60,01	60,03	60,06

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 4.4 se observa que los valores del voltaje L2N no sobrepasan el límite permitido del $\pm 8\%$ para el voltaje nominal según la regulación ARCONEL 005/18. Se evidencia la presencia de voltajes en la LNG mayores a 2V considerado como normal [87], lo que indica problemas en la conexión en el circuito de alimentación del tomacorriente. Se observa que, en la L2 el consumo máximo de corriente registrado es de 4A y en la LN de 5A, lo que indica que existe presencia de armónicos.

Al analizar la frecuencia se observa que los valores obtenidos no sobrepasan los límites del $\pm 1\%$ establecido por la norma EN50160. Lo cual indica que la frecuencia cumple con la norma.

En la figura 4.20 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N durante el período de evaluación de la Planta de Industria 4.0, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 129,32V y un mínimo de 125,76V.

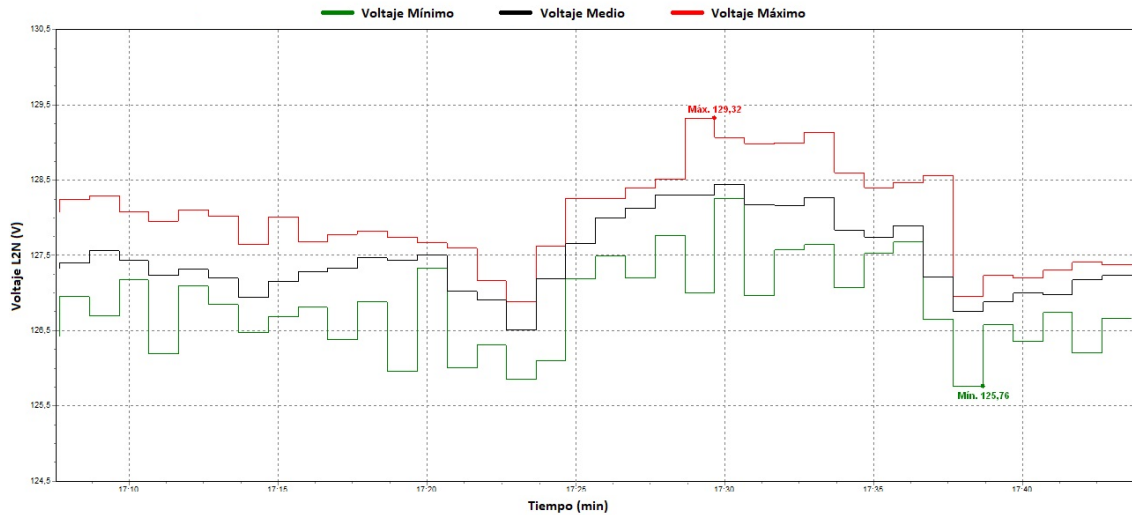


Figura 4.20 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.21 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG durante el tiempo de evaluación de la planta de Industria 4.0, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 60,62V y un mínimo de 9,95V.

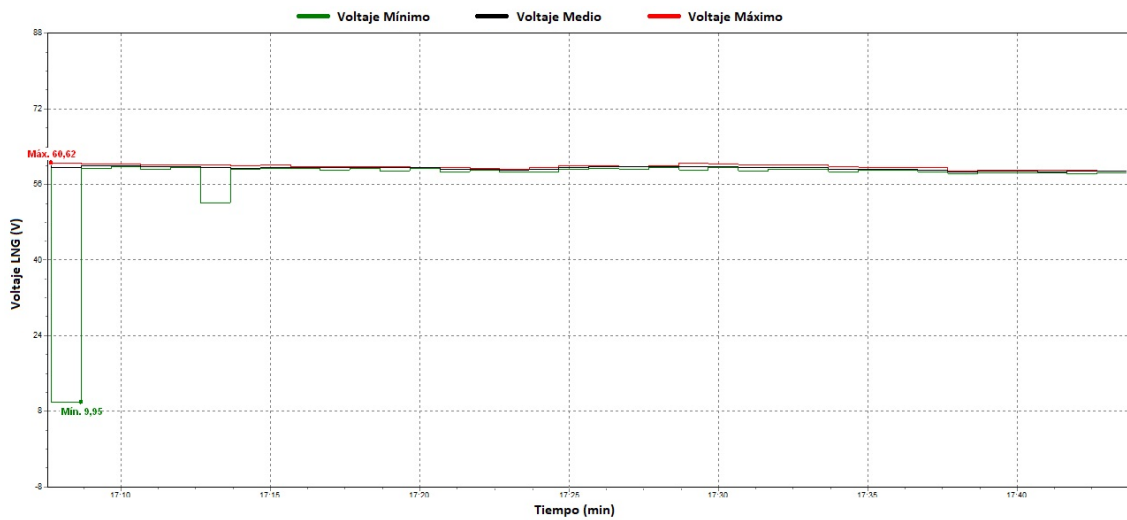


Figura 4.21 Voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.22 se muestra la corriente máxima, media y mínima de la L2 durante el tiempo de evaluación de la planta de Industria 4.0, en la que se evidencia tres valores de corrientes máximas de 4A y un mínimo de 1A.

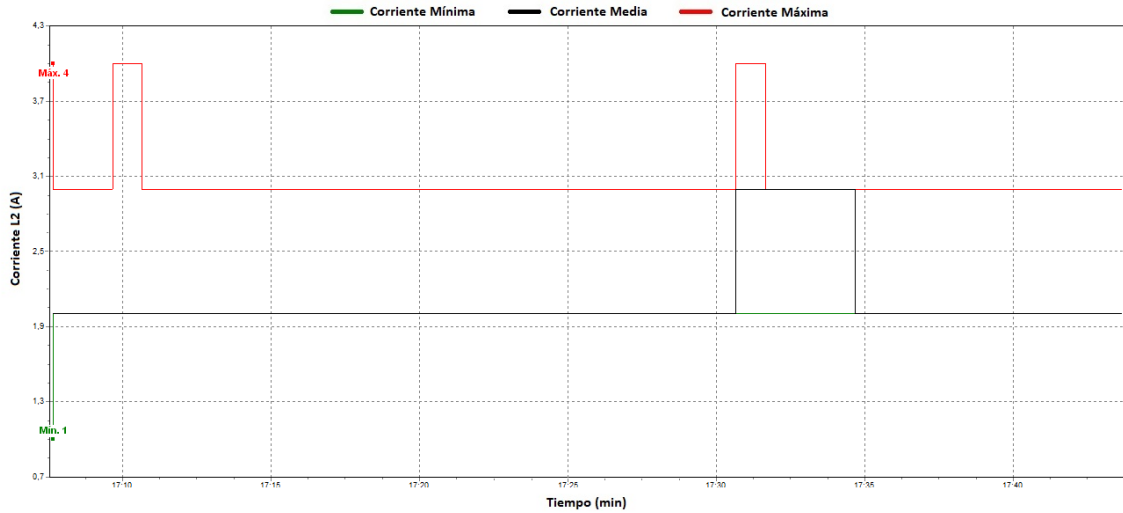


Figura 4.22 Corriente máxima, media y mínima de la L2.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.23 se muestra la corriente máxima, media y mínima de la LN durante el tiempo de evaluación de la planta de Industria 4.0, en la que se evidencia tres valores de corrientes máximas de 5A y un mínimo de 1A.

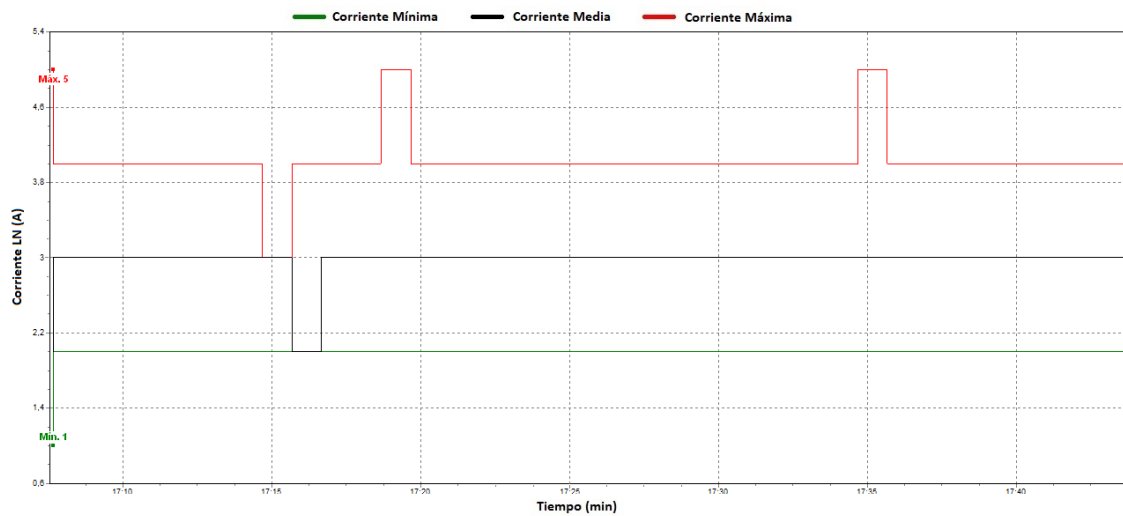


Figura 4.23 Corriente máxima, media y mínima de la LN.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.24 se muestra la frecuencia máxima, media y mínima durante el tiempo de evaluación de la planta de Industria 4.0, en la que se evidencia un único valor de frecuencia máxima de 60,058Hz y un mínimo de 59,935Hz.

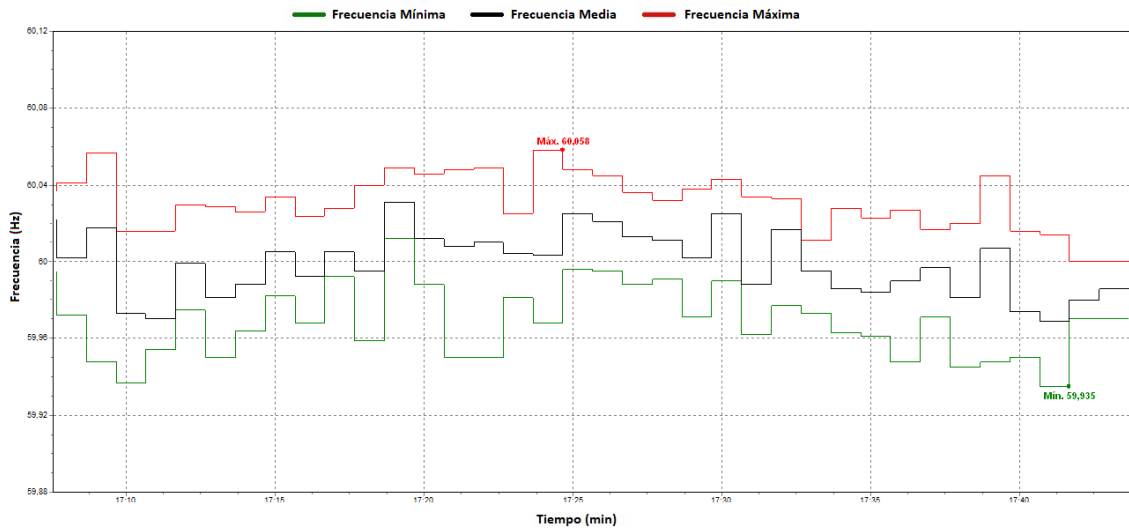


Figura 4.24 Frecuencia máxima, media y mínima.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Compresor: Para esta prueba se generaron 60 registros, durante 1 hora de funcionamiento. Sus resultados se observan en la tabla 4.5, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos evaluados en función de parámetros y líneas según sea el caso.

Tabla 4.5 Resultados de la medición realizada al compresor.

Valores	Voltaje (V)						Corriente (A)						Frecuencia (Hz)		
	L2N			LNG			L2			LN			MIN	MED	MAX
	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX			
MIN	114,28	121,08	121,58	52,20	55,94	56,22	0,00	1,00	2,00	0,00	1,00	3,00	59,93	59,96	59,99
PROM	120,15	121,69	122,46	55,38	56,20	56,63	3,00	3,56	5,88	3,00	4,38	7,69	59,97	60,00	60,02
MAX	121,62	122,90	123,56	56,06	56,48	57,16	4,00	4,00	26,00	4,00	5,00	30,00	60,00	60,02	60,09

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 4.5 se observa que el 1,66% de los datos de voltaje de la L2N sobrepasan el límite del 5% permitido por la regulación de la ARCONEL 005/18. Se evidencia la presencia de voltajes en la LNG mayores a 2V considerado como normal [87], lo que indica problemas en la conexión en el circuito de alimentación del tomacorriente. Se observa que, en la L2 el consumo máximo de corriente registrado es de 26A y en la LN de 30A, lo que indica que existe presencia de armónicos.

Al analizar la frecuencia se observa que los valores obtenidos no sobrepasan los límites del $\pm 1\%$ establecido por la norma EN50160. Lo cual indica que la frecuencia cumple con la norma.

En la figura 4.25 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N durante el tiempo de evaluación del compresor, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 123,78V y un mínimo de 114,28V.

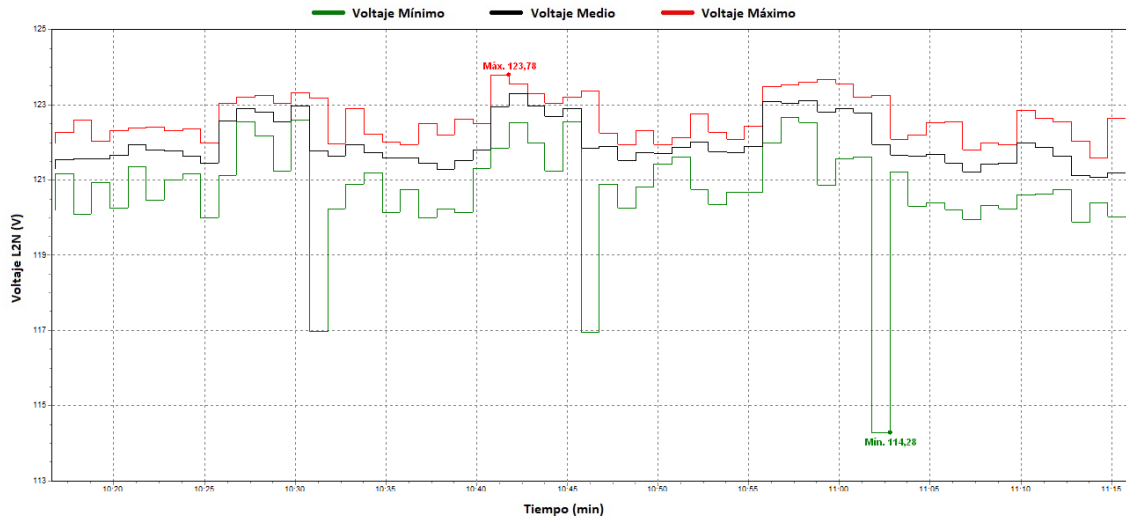


Figura 4.25 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.26 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG durante el tiempo de evaluación del compresor, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 57,16V y un mínimo de 49,73V.

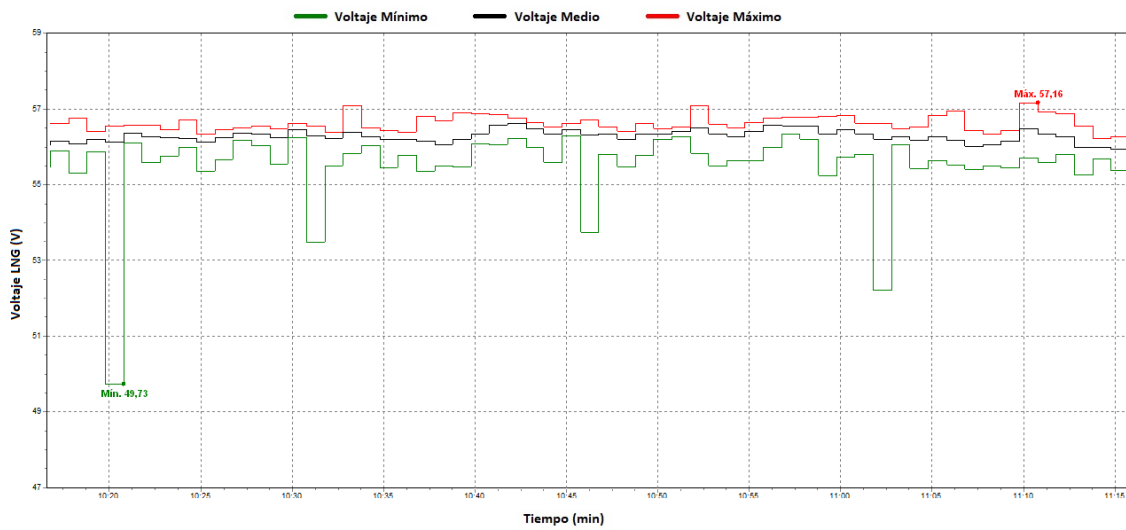


Figura 4.26 Voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.27 se muestra la corriente máxima, media y mínima de la L2 durante el tiempo de evaluación del compresor, en la que se evidencia un único valor de corriente máxima de 26A y valores mínimos de 0A.

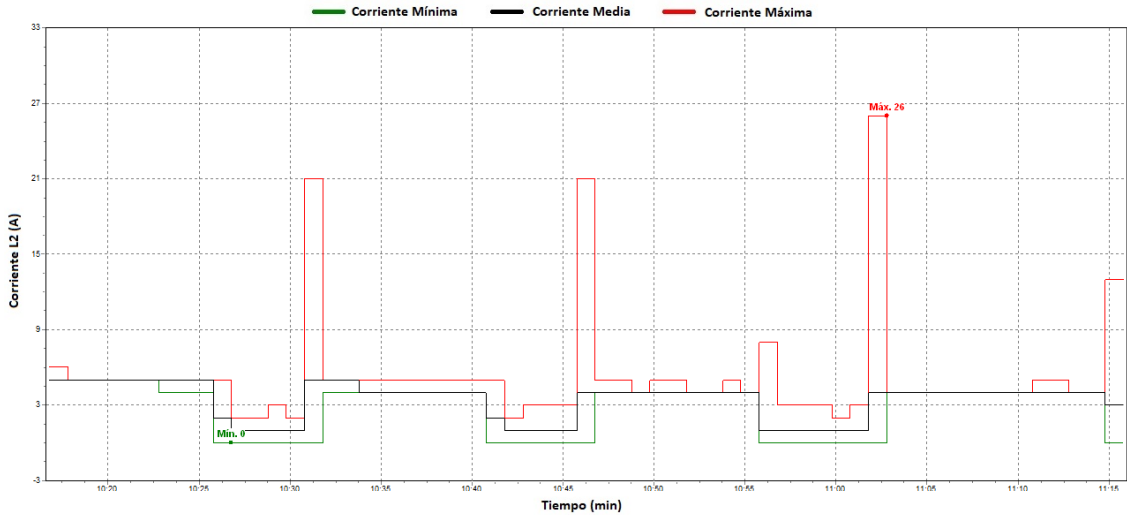


Figura 4.27 Corriente máxima, media y mínima de la L2.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.28 se muestra la corriente máxima, media y mínima LN durante el tiempo de evaluación del compresor, en la que se evidencia un único valor de corriente máxima de 30A y 20 valores mínimos de 0A.

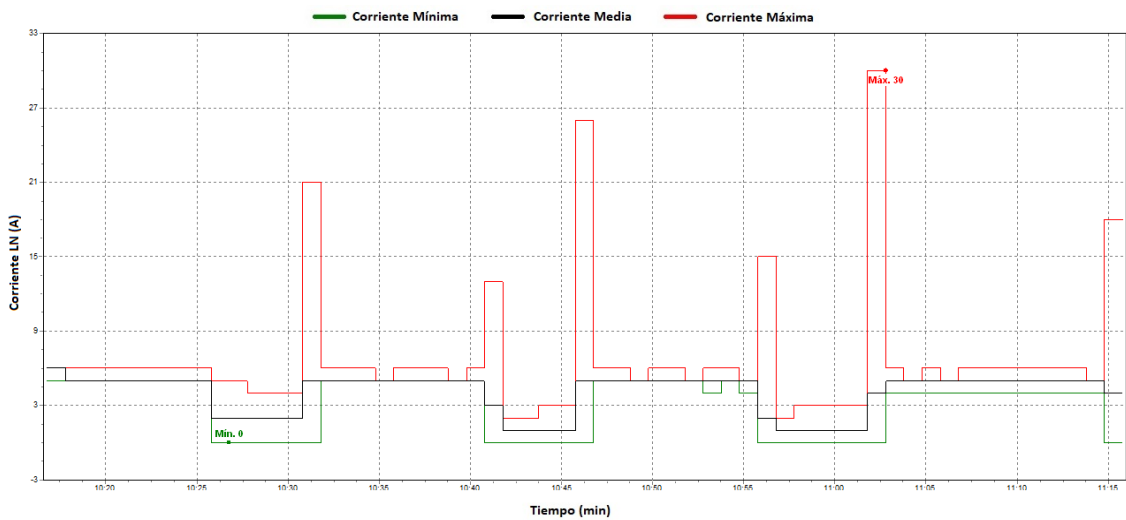


Figura 4.28 Corriente máxima, media y mínima de la LN.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.29 se muestra la frecuencia máxima, media y mínima durante el tiempo de evaluación del compresor, en la que se evidencia un único valor de frecuencia máxima de 60,089Hz y un mínimo de 59,926Hz.

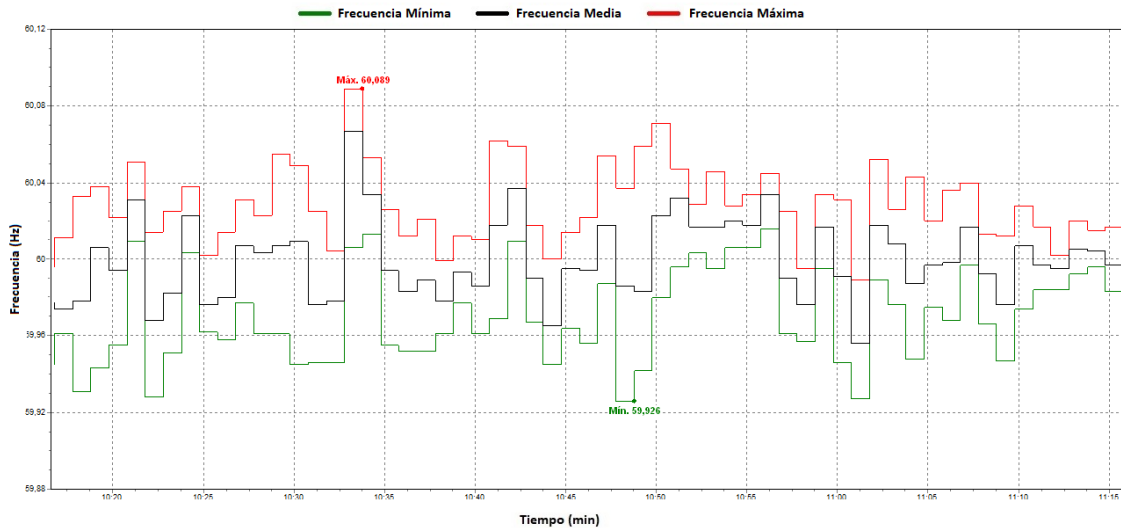


Figura 4.29 Frecuencia máxima, media y mínima.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Robot KUKA: Para esta prueba se generaron 16 registros, en un intervalo de tiempo de 15min de funcionamiento normal del equipo. Sus resultados se observan en la tabla 4.6, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos evaluados en función de parámetros y líneas según sea el caso.

Tabla 4.6 Resultados de las mediciones realizada al robot KUKA.

Valores	VOLTAJE (V)									CORRIENTE (A)									FRECUCIA (Hz)		
	L2N			L3N			LNG			L2			L3			LN			MIN	MED	MAX
	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX			
MIN	117,21	118,77	119,11	128,75	129,62	129,81	38,26	38,51	38,57	1,00	1,00	2,00	1,00	2,00	3,00	0,00	1,00	3,00	59,92	59,96	60,01
PROM	117,87	119,04	119,41	129,19	129,84	130,09	38,84	39,20	39,45	1,00	1,19	3,00	1,00	2,00	3,69	0,00	1,00	3,13	59,97	60,00	60,04
MAX	118,55	119,29	119,78	129,78	130,07	130,27	39,78	40,09	40,32	1,00	2,00	5,00	1,00	2,00	6,00	0,00	1,00	4,00	60,02	60,05	60,08

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los valores de la tabla 4.6 con los límites establecidos por la regulación de la ARCONEL 005/18 se determinó que los voltajes presentes en la L2N y L3N no sobrepasan el límite permitido del $\pm 8\%$ para el voltaje nominal. Se evidencia la presencia de voltajes en la LNG mayores a 2V, considerado como normal [87], lo que indica problemas en la conexión en el circuito de alimentación del tomacorriente. Se observa que el consumo máximo de corriente para la LN es de 4A, valor menor al presentado en las líneas L2 y L3 que son de 5A y 6A respectivamente, lo que indica que existe inconsistencia en el valor de la corriente del neutro.

Al analizar la frecuencia se observa que los valores obtenidos no sobrepasan los límites del $\pm 1\%$ establecido por la norma EN50160. Lo cual indica que la frecuencia cumple con la norma.

En la figura 4.30 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N durante el tiempo de evaluación al robot KUKA, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 119,78V y un mínimo de 117,21V.

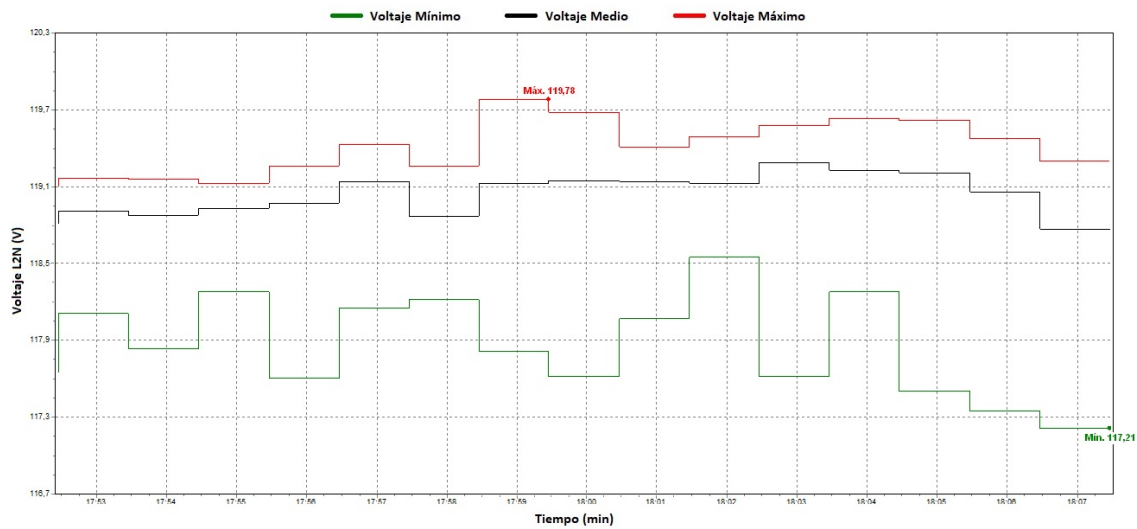


Figura 4.30 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.31 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la L3N durante el tiempo de evaluación al robot KUKA, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 130,27V y un mínimo de 128,75V.

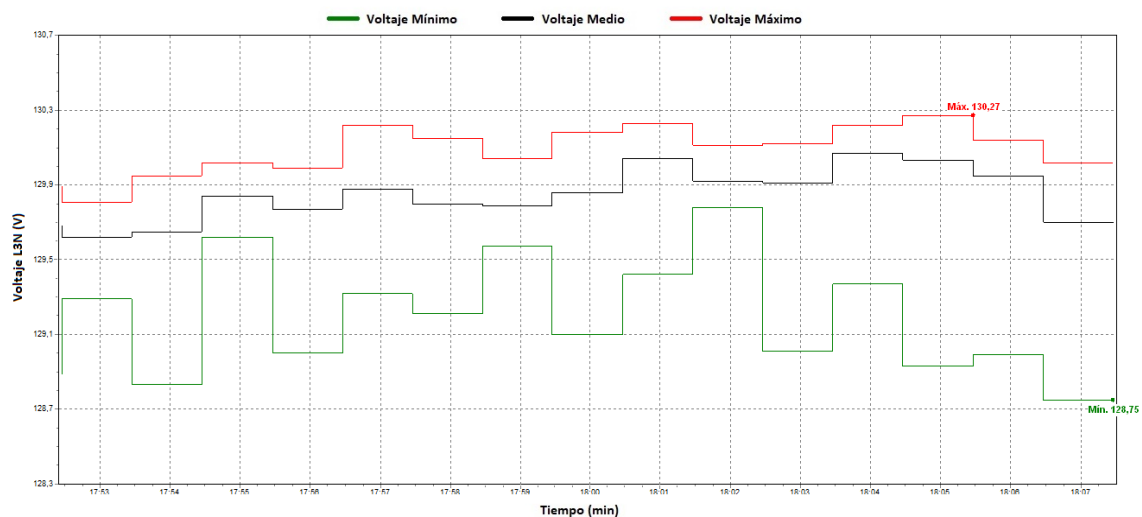


Figura 4.31 Voltaje máximo, medio y mínimo de la L3N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.32 se muestra el voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG durante el tiempo de evaluación al robot KUKA, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 40,32V y un mínimo de 38,26V.

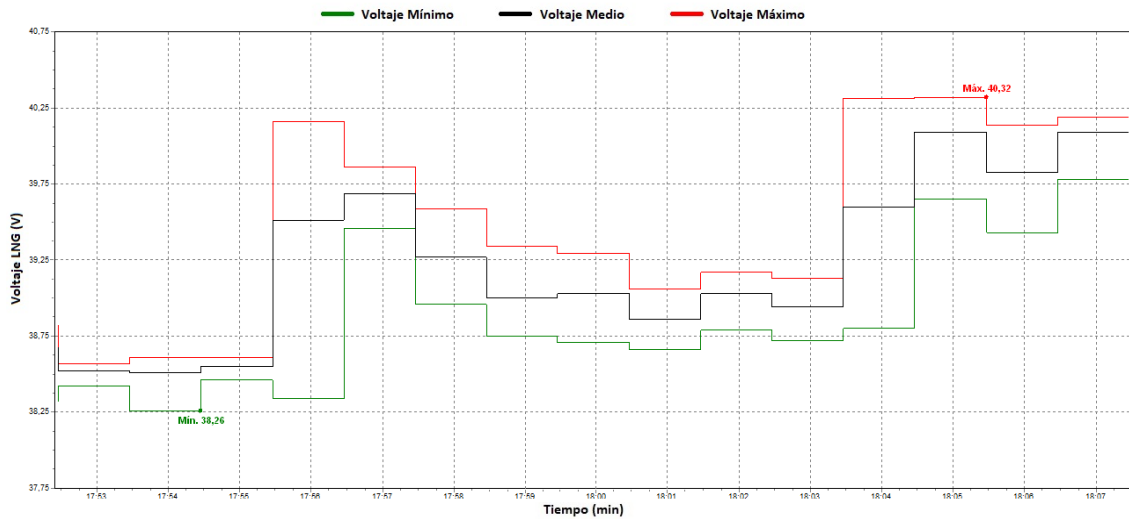


Figura 4.32 Voltaje máximo, medio y mínimo de la LNG.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.33 se muestra la corriente máxima, media y mínima de la L2 durante el tiempo de evaluación al robot KUKA, en la que se evidencia un único valor de corriente máxima de 5A y 16 valores mínimos de 1A.

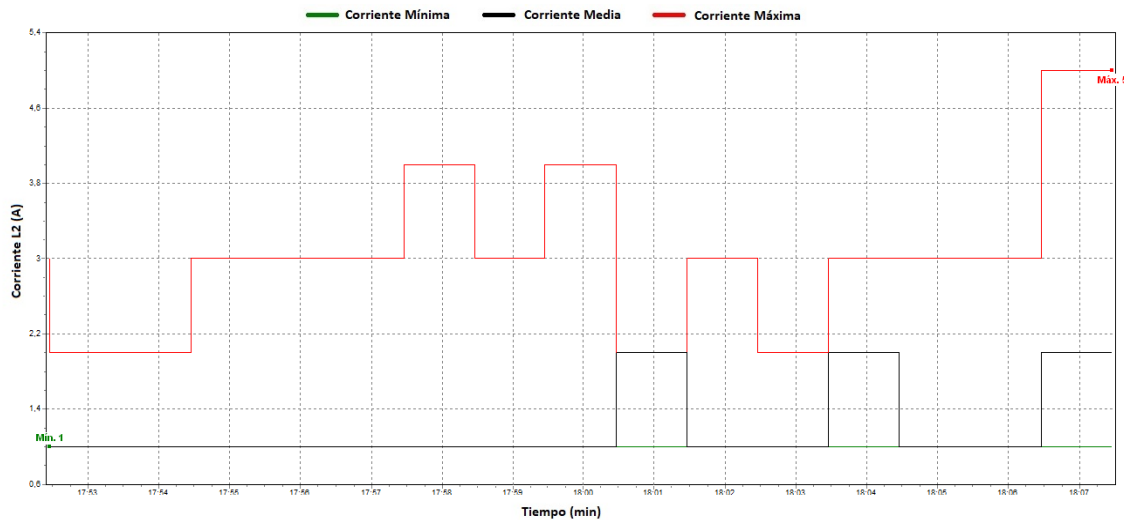


Figura 4.33 Corriente máxima, media y mínima de la L2.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.34 se muestra la corriente máxima, media y mínima de la L3 durante el tiempo de evaluación al robot KUKA, en la que se evidencia un único valor de corriente máxima de 6A y 16 valores mínimos de 1A.

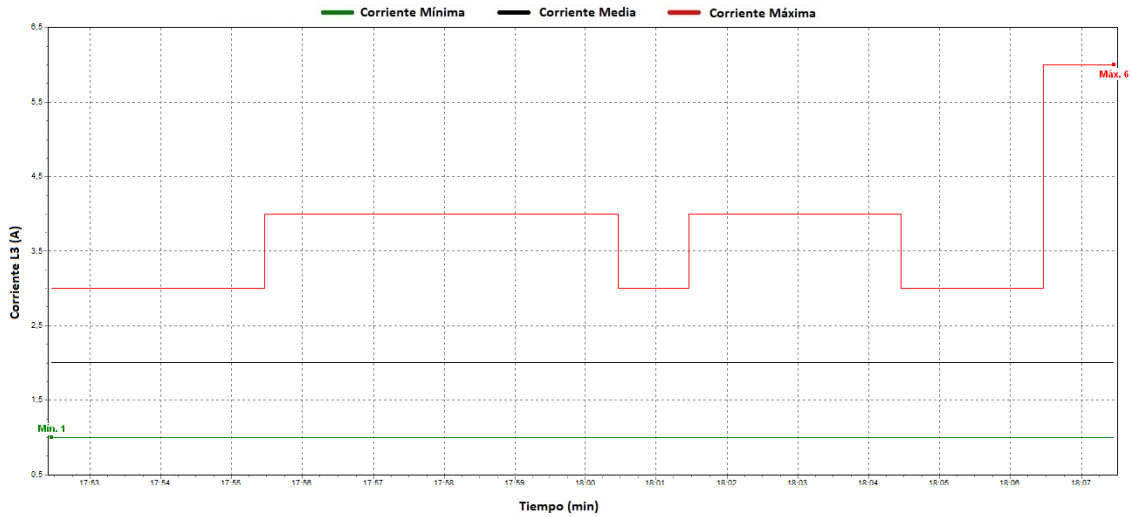


Figura 4.34 Corriente máxima, media y mínima de la L3.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.35 se muestra la corriente máxima, media y mínima de la LN durante el tiempo de evaluación al robot KUKA, en la que se evidencia dos valores de corrientes máximas de 4A y 16 valores mínimos de 0A.

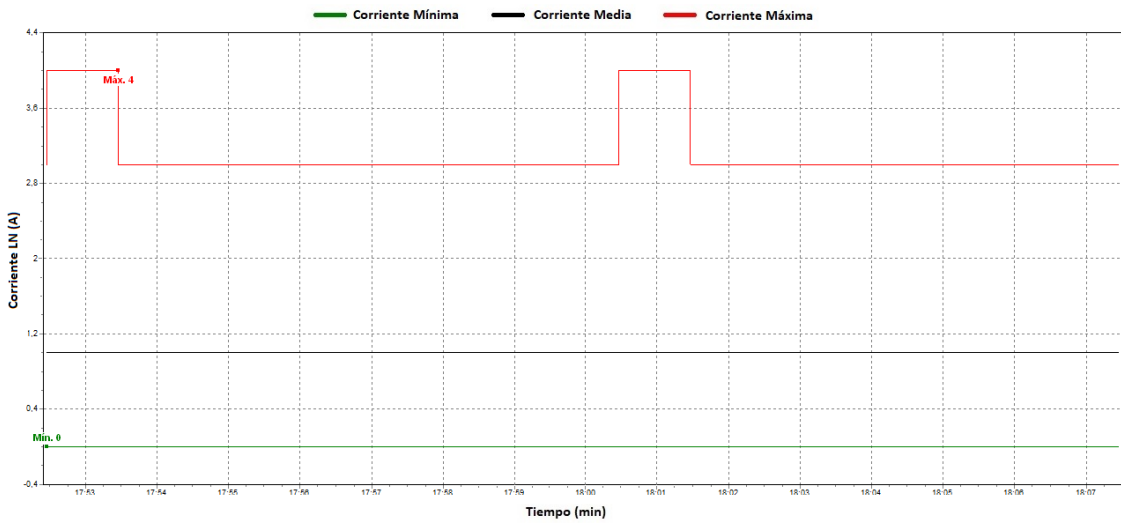


Figura 4.35 Corriente máxima, media y mínima de la LN.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.36 se muestra la frecuencia máxima, media y mínima durante el tiempo de evaluación al robot KUKA, en la que se evidencia un único valor de frecuencia máxima de 60,075Hz y un mínimo de 59,921Hz.

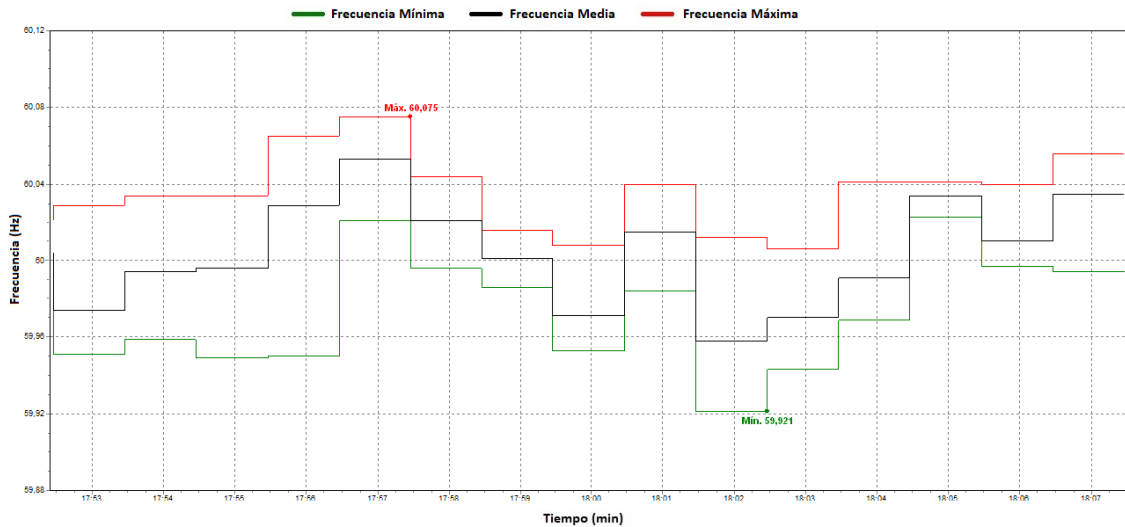


Figura 4.36 Frecuencia máxima, media y mínima.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Al terminar el análisis del robot KUKA se evidencia inconsistencia en los voltajes de LNG de 39,20V y las corrientes presentes en el neutro de 4A, por tal motivo se procede a realizar una evaluación más detallada al equipo. La misma que consiste en:

La revisión de la etapa de conexión que va del robot KUKA al tomacorriente de 220V, del análisis se determinó errores en la conexión de la alimentación del equipo. En la figura 4.37 se muestra el cable de alimentación, enchufe (plug) conector hembra del cable de alimentación y el enchufe conector macho del equipo.

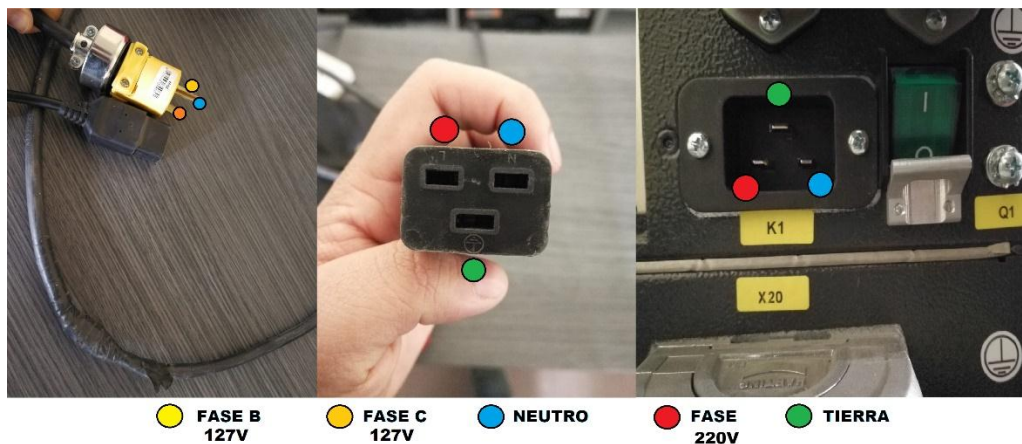


Figura 4.37 Cable de alimentación del equipo.

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de la figura 4.37 se evidencia que el equipo requiere una alimentación directa de 220V para la fase, una línea de neutro y una de tierra. El cable de alimentación del fabricante se une por medio de un empalme, a una extensión de diferente calibre. Se observa que el voltaje de 220V entregado por el tomacorriente está formado por la suma de las dos fases de 127V y adicional presenta la línea de neutro. Esto identifica una inconsistencia en la conexión

debido a que el cable conductor une el equipo con el tomacorriente formando un circuito que conecta, una de las fases de 127V con la fase del equipo, la fase de 127V restante con el neutro del equipo y la línea neutro del tomacorriente con la tierra del equipo.

De un análisis visual se determina que la estructura metálica del robot KUKA no dispone de conexión a tierra externa, pese a que el sistema de tierra del equipo si evidencia conectores para dicho fin, como se observa en la figura 4.38.

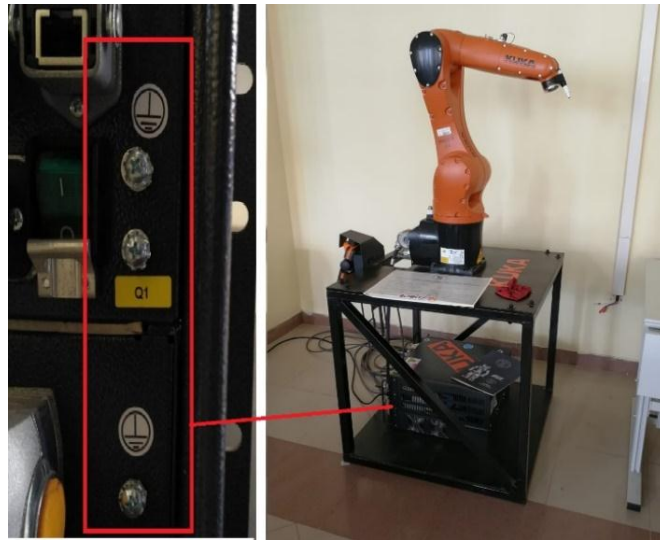


Figura 4.38 Evidencia del robot KUKA sin conexión a tierra en sus conectores.

Fuente: Elaboración propia.

Luego del análisis realizado a los equipos del laboratorio se procede a identificar los valores de los armónicos generados por los equipos.

Armónicos presentes en los equipos: Los más representativos se observan en la tabla 4.7 y 4.8 de los equipos que funcionan a 120V y 220V respectivamente. Aquí se especifica los valores mínimos, promedios y máximos de los armónicos de voltaje y corriente total e individual.

Tabla 4.7 Armónicos generados por los equipos del laboratorio con alimentación de 120V

Valores	Sistema Físico Cibernético						Industria 4.0						Compresor					
	THDV %			THDI %			THDV %			THDI %			THDV %			THDI %		
	TOTAL	H. 3	H. 5	TOTAL	H. 3	H. 5	TOTAL	H. 3	H. 5	TOTAL	H. 3	H. 5	TOTAL	H. 3	H. 5	TOTAL	H. 3	H. 5
MIN	1,80	0,94	1,00	118,42	36,95	27,44	2,22	1,04	1,76	90,36	49,78	47,47	2,42	1,06	1,85	6,26	4,55	2,22
PROM	2,12	1,26	1,42	146,59	88,02	72,81	2,34	1,12	1,86	104,70	62,89	57,57	2,58	1,31	2,03	18,74	10,62	5,90
MAX	2,41	1,44	1,73	327,67	90,84	77,25	2,48	1,22	2,02	108,42	67,45	60,22	2,82	1,52	2,27	49,80	24,70	14,76

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.8 Armónicos generados por los equipos del laboratorio con alimentación de 220V

Valores	KUKA											
	THDV % L2N			THDI % L2N			THDV % L3N			THDI % L3N		
	TOTAL	H. 3	H. 5	TOTAL	H. 3	H. 5	TOTAL	H. 3	H. 5	TOTAL	H. 3	H. 5
MIN	4,21	3,80	0,43	31,83	24,58	9,14	5,54	3,65	3,63	28,46	22,91	7,60
PROM	4,28	3,87	0,52	35,58	26,89	12,36	5,66	3,75	3,76	31,90	24,32	10,64
MAX	4,35	3,94	0,63	36,45	28,38	15,31	5,80	3,80	3,96	33,43	24,81	13,28

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.7 y 4.8 se observa que los equipos que generan mayor porcentaje de distorsión armónica de voltaje total son el compresor y el robot KUKA en la L3N, sus valores promedios son de 2,58% y 5,66% respectivamente. Los equipos que generan mayor porcentaje de distorsión armónica de corriente total son el Sistema Físico Cibernético y el robot KUKA en la L2N sus valores promedios son de 146,59% y 35,58% respectivamente.

Se determinó que estos equipos son los principales generadores de armónicos de voltaje y corriente del laboratorio, los mismos que presentan un alto porcentaje de armónicos de orden 3. Por tal razón se concluye que los equipos analizados son los causantes de que la corriente en el neutro sea mayor al de la fase.

4.8.2 Evaluación del tablero principal con cargas activas.

Consistió en evaluar en funcionamiento continuo de todas las cargas presentes en el edificio tanto permanentes como variables, incluyendo los equipos del laboratorio de automatización.

En esta prueba se registró por cada lectura de los datos mínimos, medios y máximos de: voltajes de las líneas 1, 2, 3 al neutro y neutro con respecto a tierra (L1N, L2N, L3N y LNG), de corriente de las líneas 1, 2, 3 y el neutro (L1, L2, L3 y LN), frecuencia, desequilibrio de voltaje, Sag, Swell, transitorios, flicker, armónicos totales e individuales de voltaje y corriente, factor de potencia y la potencia (Activa, Reactiva, Aparente).

La medición se inició a las 09h:50min:02s del 14 de octubre de 2019 y finalizó siete días después a las 09h:40min:02s. Se obtuvo un total de 1.008 registros trabajando a un voltaje nominal de 127V.

En la figura 4.39 se muestra la conexión del equipo analizador al tablero principal de la facultad.



Figura 4.39 Conexión del equipo analizador en el tablero principal de la facultad.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se hace un detalle de cada uno de las pruebas planificadas en esta investigación.

4.8.2.1 Evaluación de los niveles de voltaje

Se consideró los valores límites de $\pm 8\%$ del voltaje nominal que establece la regulación del ARCONEL 005/18. Siendo el rango permitido de voltaje de 116,84V a 137,16V. La normativa no se cumple cuando más del 5% del total de los datos registrados excedan del valor límite.

Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.9, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos para cada línea y el neutro evaluados en función a los parámetros de voltaje mínimo, medio y máximo.

Tabla 4.9 Valores de voltaje mínimos, promedios, máximos para cada línea y el neutro

Valores	Voltaje Mínimo (V)				Voltaje Medio (V)				Voltaje Máximo (V)			
	L1N	L2N	L3N	LNG	L1N	L2N	L3N	LNG	L1N	L2N	L3N	LNG
MIN	106,02	118,33	117,87	0,42	120,53	120,68	122,72	0,46	121,70	121,79	123,26	0,47
PROM	124,25	125,17	125,69	0,67	125,22	126,32	126,79	0,73	125,85	126,96	127,42	1,03
MAX	128,36	129,06	129,53	1,62	128,85	129,53	130,04	1,87	129,45	130,14	130,65	3,47

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.9 se observa un valor de voltaje mínimo para la L1N que sobrepasa el límite de $\pm 8\%$ según la regulación de la ARCONEL 005/18. Se evidencia que el promedio de los valores del voltaje medio es de 0,73V en la LNG, que al ser menor a los 2V se encuentra dentro de los valores normales indicado según autores [87].

Durante la medición se registró un voltaje mínimo de 106,02V para la L1N, registrado a las 11h:40min:02s del 18 de octubre de 2019. Se evidencia un voltaje máximo alcanzado de 130,65V para la L3N, registrado a la 01h:20min:02s del 16 de octubre de 2019.

En la Tabla 4.10 se resume el número de valores medios de voltaje RMS menores y mayores al 8%, registrados en cada línea durante el período de medición.

Tabla 4.10 Análisis de los valores medios de voltaje RMS para cada línea.

Fases	Promedio del Voltaje Medio (V)	Total de valores medios menores a 116.84V	Total de valores medios mayores a 137.16V	Cumple con la regulación ARCONEL 005/18 (menores a 51)
L1N	125.22	0	0	SI
L2N	126.32	0	0	SI
L3N	126.79	0	0	SI

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.10 se observa que los promedios del voltaje RMS de los valores medios obtenidos para cada línea cumplen con la regulación de la ARCONEL 005/18. Por lo que se concluye que no hay problemas en los niveles de voltaje en las fases A (L1N), B (L2N) y C (L3N).

En la figura 4.40 se muestra los voltajes máximos, medios y mínimos de la L1N durante el período de medición, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 129,45V y un mínimo de 106,02V.



Figura 4.40 Valores máximos, medios y mínimos del voltaje en la L1N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.41 se muestra los voltajes máximos, medios y mínimos de la L2N durante el período de medición, en la que se evidencia dos valores de voltajes máximos de 130,14V y un mínimo de 118,33V.

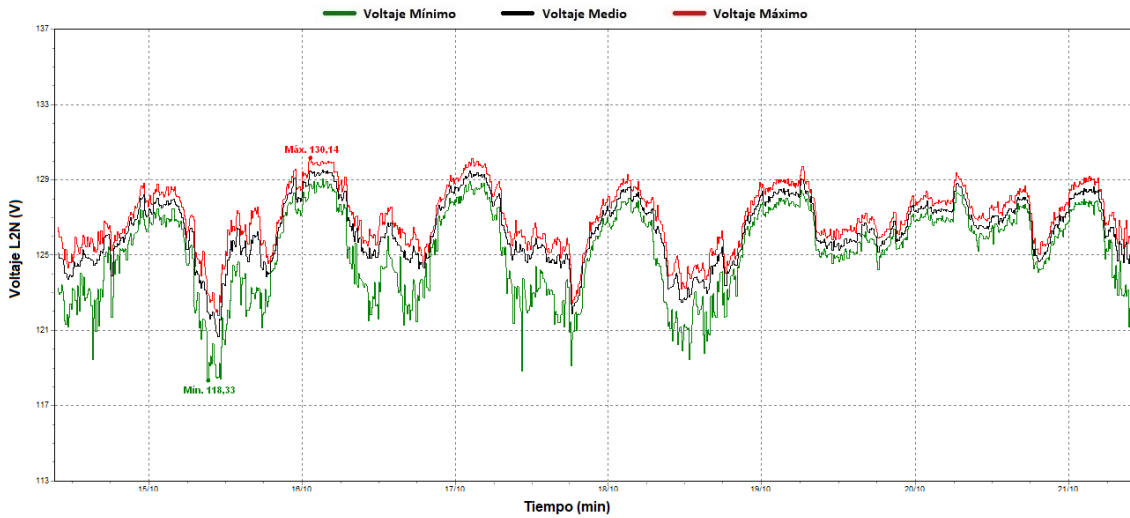


Figura 4.41 Valores máximos, medios y mínimos del voltaje en la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.42 se muestra los voltajes máximos, medios y mínimos de la L3N durante el período de medición. Se evidencia un único valor de voltaje máximo de 130,65V y un mínimo de 117,87V.

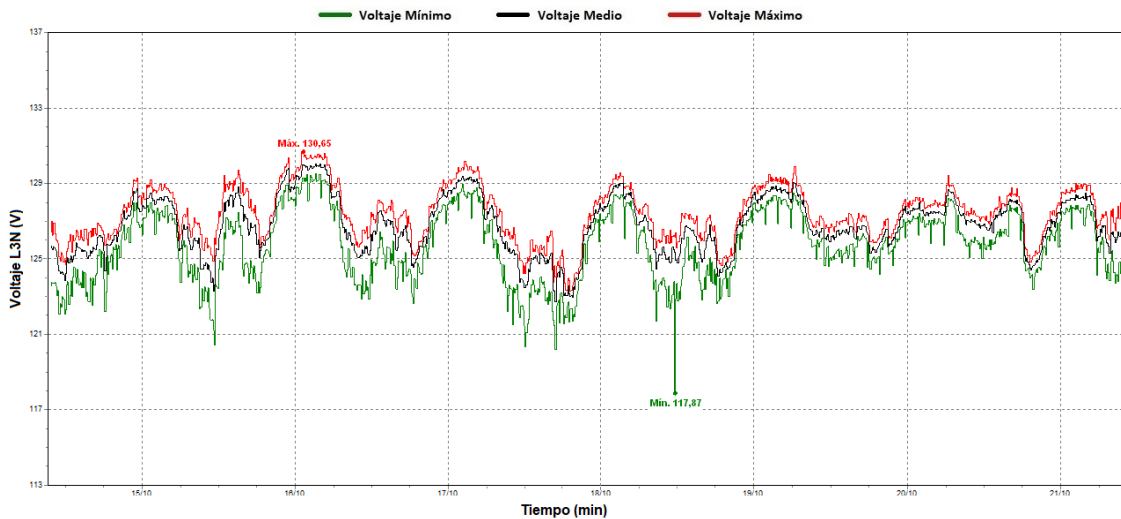


Figura 4.42 Valores máximos, medios y mínimos del voltaje en la L3N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.43 se muestra los voltajes máximos, medios y mínimos de la LNG durante el período de medición, en la que se evidencia un único valor de voltaje máximo de 3,47V y un mínimo de 0,42V.

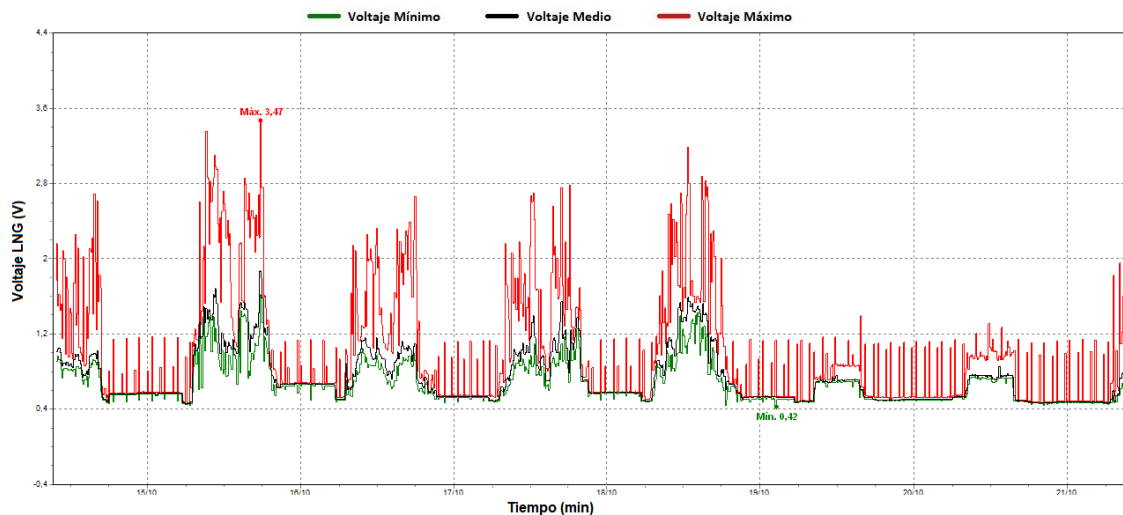


Figura 4.43 Valores máximos, medios y mínimos del voltaje en la LNG.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

4.8.2.2 Evaluación de la corriente

Esta prueba determina el consumo máximo de corriente que se registra en el edificio de la facultad. Consistió en evaluar en funcionamiento continuo las cargas permanentes, variables y las cargas presentes en el laboratorio. Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.11, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos para las fases A (L1), B (L2), C (L3) y el neutro (LN) evaluados en función a los parámetros de corriente mínima, media y máxima.

Tabla 4.11 Valores obtenidos de la corriente mínima, promedio, máxima de las fases y neutro

Valores	Corriente Mínima (A)				Corriente Media (A)				Corriente Máxima (A)			
	L1	L2	L3	LN	L1	L2	L3	LN	L1	L2	L3	LN
MIN	4,00	5,00	2,00	0,00	4,00	5,00	2,00	1,00	4,00	6,00	3,00	3,00
PROM	6,58	9,42	5,66	0,00	7,29	10,50	6,78	1,00	16,66	20,81	18,19	3,79
MAX	20,00	35,00	23,00	0,00	21,00	38,00	28,00	2,00	45,00	70,00	58,00	6,00

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.11 se observa que el mayor consumo de corriente de 70A se registra en la fase B (L2) a las 18h:00min:02s del 15 de octubre de 2019. En la figura 4.44 se muestra las corrientes máximas de cada línea, donde L1 se presenta de color azul, L2 de color naranja y L3 de color gris.

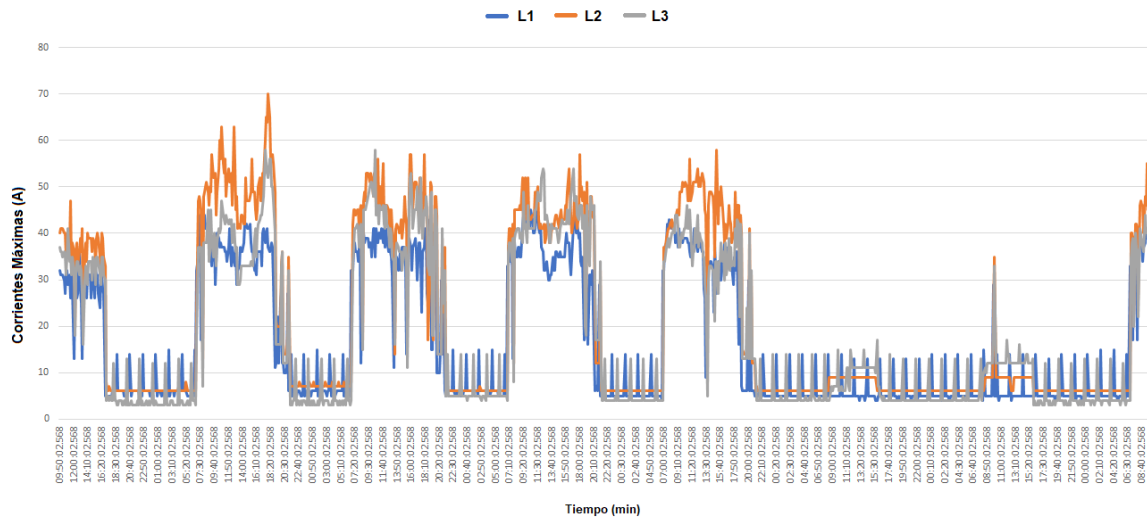


Figura 4.44 Corrientes máximas para cada una de las líneas.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.45 se muestra las corrientes máximas, medias y mínimas de L1 registradas durante el período de medición. Se observa dos valores de corriente máxima de 45A y 477 lecturas mínimas de 4A.

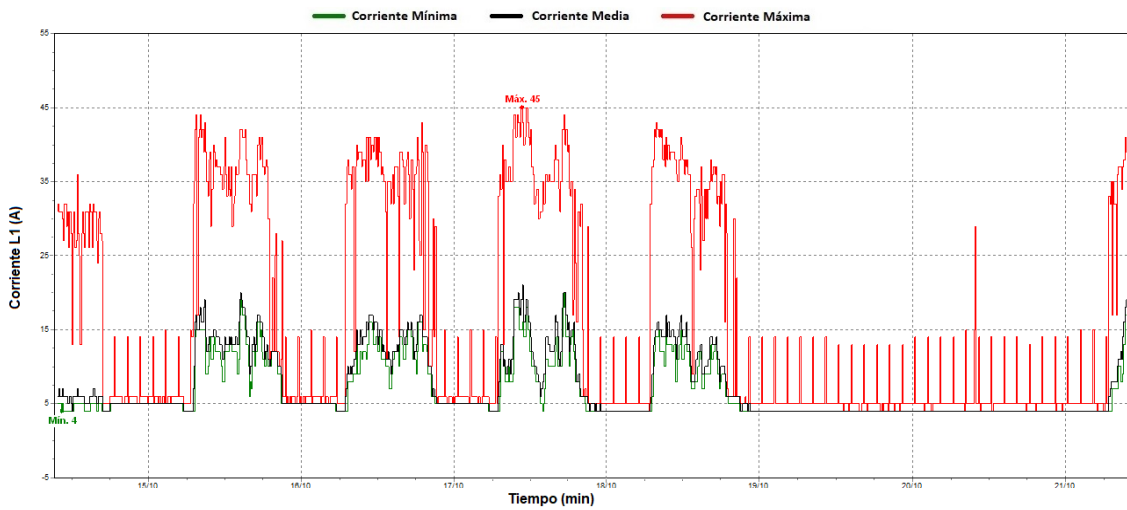


Figura 4.45 Valores máximos, medios y mínimos de la corriente para la L1.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.46 se muestra las corrientes máximas, medias y mínimas de L2 registradas durante el período de medición. Se observa un único valor de corriente máxima de 70A y 477 lecturas mínimas de 5A.

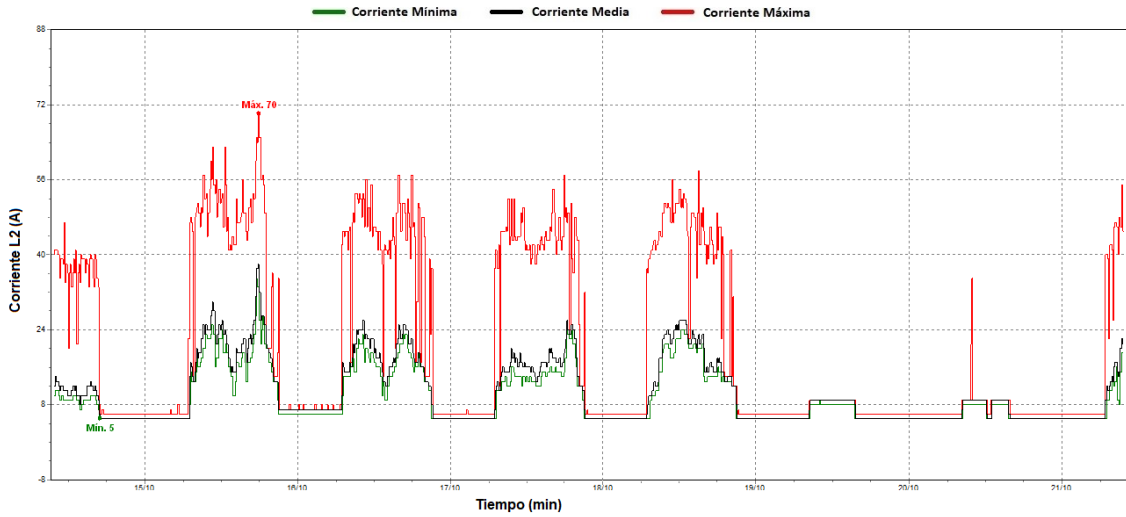


Figura 4.46 Valores máximos, medios y mínimos de la corriente para la L2.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.47 se muestra las corrientes máximas, medias y mínimas de L3 registradas durante el período de medición. Se evidencia dos valores de corriente máxima de 58A y 256 lecturas mínimas de 2A.

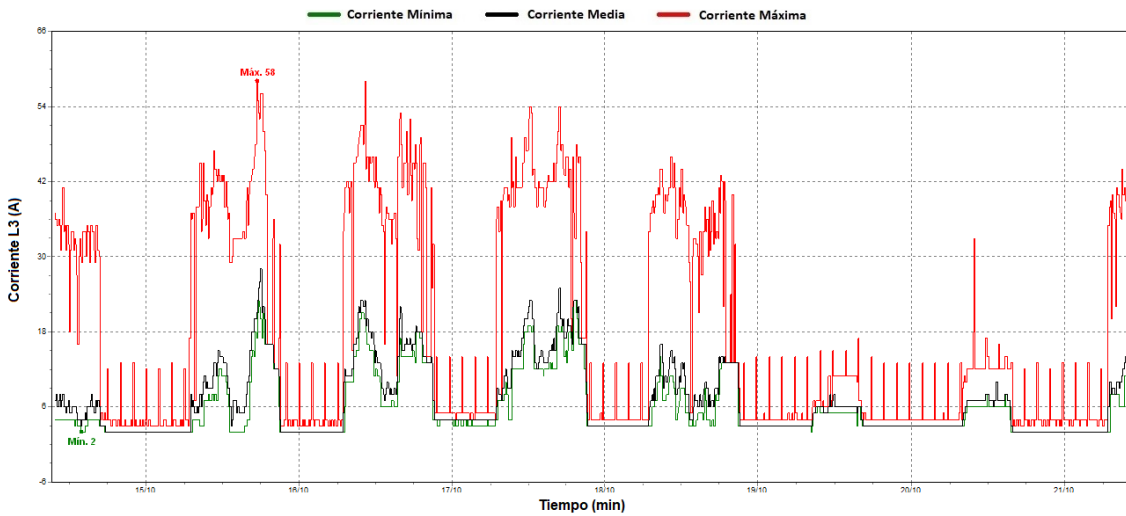


Figura 4.47 Valores máximos, promedios y mínimos de la corriente para la L3.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.48 se muestra las corrientes máximas, medias y mínimas de LN registradas durante el período de medición, en la que se evidencia un único valor de corriente máxima de 6A y 1.008 lecturas mínimas de 0A.

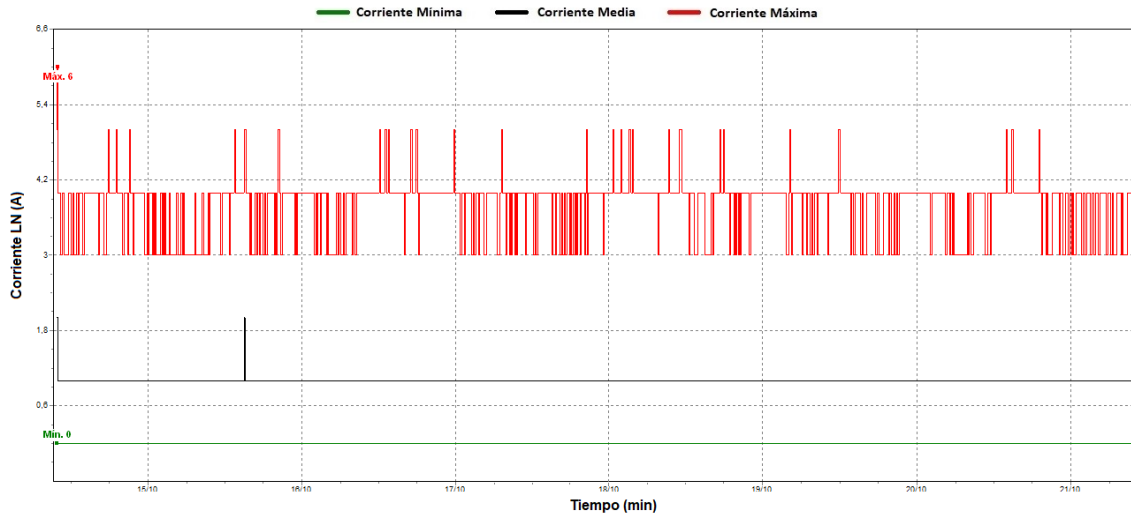


Figura 4.48 Valores máximos, promedios y mínimos de la corriente para la LN.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

4.8.2.3 Evaluación de la frecuencia

Para la evaluación se consideró los valores límites de $\pm 1\%$ de la frecuencia nominal (60Hz) que establece la norma EN50160. Siendo el rango permitido de 59,40Hz a 60,60Hz a condiciones normales de operación. La norma establece que para los casos críticos el rango permitido sea de 56,40 a 62,40 Hz (-6% al $+4\%$). La normativa no se cumple cuando más del 5% del total de los datos registrados excedan del valor límite.

Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.12, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos de los parámetros de frecuencia mínima, media y máxima registrados.

Tabla 4.12 Valores de frecuencia registrados.

Valores	Frecuencia Mínima (Hz)	Frecuencia Media (Hz)	Frecuencia Máxima (Hz)
MIN	59,84	59,94	60,01
PROM	59,93	60,00	60,06
MAX	60,01	60,05	60,16

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.12 se observa que el valor mínimo obtenido es de 59.84Hz y la máxima es de 60.16Hz, los que se encuentran dentro de los límites normales, establecidos por la norma EN50160. Por lo que se concluye que no existe problemas en la frecuencia.

En la figura 4.49 se muestra las frecuencias máximas, medias y mínimas obtenidas durante el período de medición. Se evidencia un único valor de frecuencia máxima de 60,158Hz y una mínima de 59,836Hz.

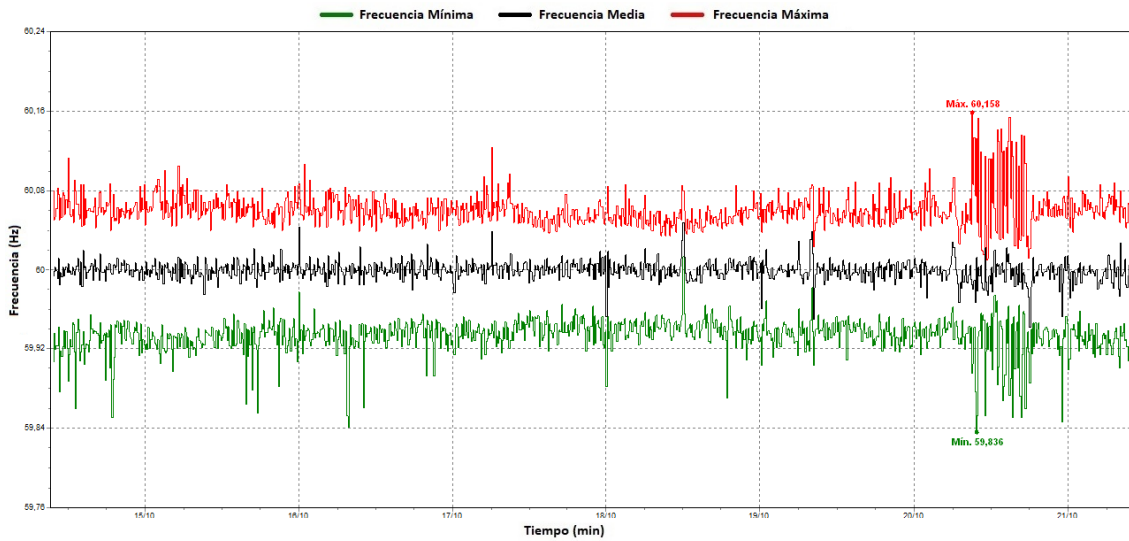


Figura 4.49 Valores máximos, medios y mínimos de la frecuencia.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

4.8.2.4 Evaluación del desequilibrio de voltaje

Para esta evaluación se consideró el valor límite de 2% para el desequilibrio de voltaje como lo establece la regulación de la ARCONEL 005/18. La normativa no se cumple cuando más del 5% del total de los datos registrados excedan del valor límite.

Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.13, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos evaluados en función a los parámetros del desequilibrio de voltaje mínimos, medios y máximos. Adicionalmente se presenta el total de valores mayores al 2%.

Tabla 4.13 Valores mínimos, promedios y máximos del desequilibrio de voltaje.

Valores	Voltaje [%]			Total de valores mayores al 2%	Cumple con la regulación ARCONEL 005/18 (menores a 51)
	MIN	MED	MAX		
MIN	0,10	0,39	0,49	0	SI
PROM	0,64	0,80	0,96	0	SI
MAX	1.25	1,40	8.30	2	SI

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.50 se muestra los valores máximos alcanzados del desequilibrio de voltaje en el período de medición.

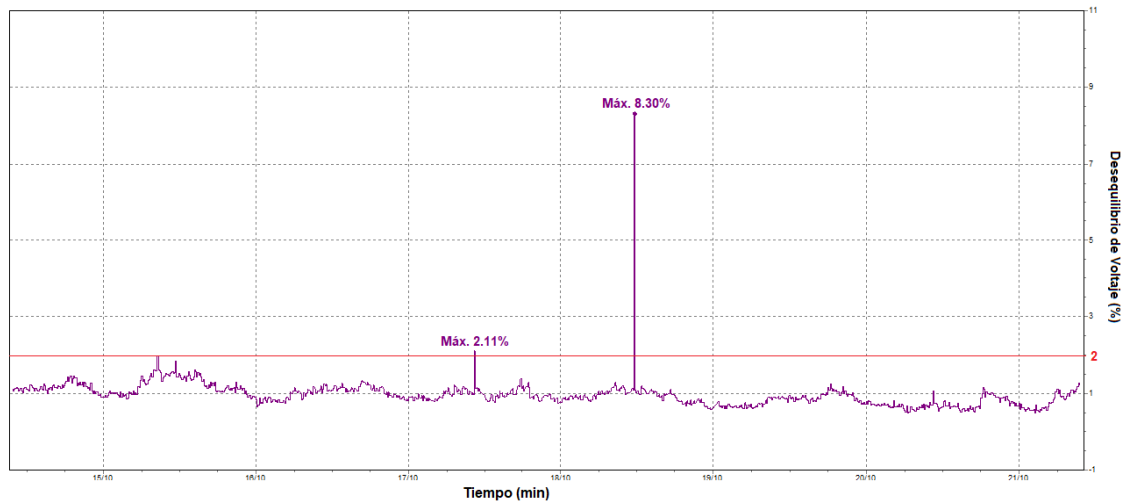


Figura 4.50 Valores máximos alcanzados del desequilibrio de voltaje.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Al analizar la tabla 4.13 y la figura 4.50 se observa dos valores del desequilibrio de voltaje máximo, uno de 2,11% registrado a las 10h:30min:02s del 17 de octubre de 2019 y otro de 8,30% presentado a las 11h:40min:02s del 18 de octubre de 2019. Los mismos que superan el límite máximo permitido del 2% según la regulación ARCONEL 005/18.

De esta prueba se concluye que estos valores representan el 0,198% del total de datos obtenidos, que al ser menores al 5% permitido por regulación indica que no existe problemas de desequilibrio de voltaje.

4.8.2.5 Evaluación Sag, Swell y Transitorios

De la información obtenida durante el periodo de análisis se observa la ausencia de datos relacionados con huecos o caídas de voltaje (Sag), elevaciones de voltaje (Swell), interrupciones y transitorios, lo que indica que estos parámetros no están presentes en el sistema eléctrico analizado.

4.8.2.6 Evaluación del flicker

Para la evaluación se consideró los valores límites establecidos por la norma IEC 61000-4-15, que define un valor de flicker de corta duración (P_{st}) no superior al 1,0p.u. y de larga duración (P_{lf}) no superior al 0,65p.u. La normativa no se cumple cuando más del 5% del total de los valores registrados excedan del valor límite definido para cada caso.

Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.14, en la que se especifica los valores de P_{st} y P_{lt} mínimos, promedios y máximos evaluados para cada línea.

Tabla 4.14 Valores de P_{st} y P_{lt} mínimos, promedios y máximos evaluados para cada línea.

Valores	Valor del Flicker corta duración – P_{st} (p.u.)			Valor del Flicker larga duración – P_{lt} (p.u.)		
	L1N	L2N	L3N	L1N	L2N	L3N
MIN	0,26	0,25	0,24	0,00	0,00	0,00
PROM	0,43	0,47	0,45	0,46	0,49	0,47
MAX	6.45	1.65	2.81	2.82	1.24	1.27

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.14 se observa que los valores obtenidos del flicker de corta duración (P_{st}) y larga duración (P_{lt}) sobrepasan los límites del 1,0p.u. y 0,65p.u. respectivamente para cada línea.

El P_{st} más alto se presenta en la fase A (L1N) con un valor de 6,45p.u. registrado a las 11h:40min:02s del 18 de octubre de 2019. El P_{st} mínimo se presenta en la fase C (L3N) con un valor de 0,24p.u. y se registra a las 10h:30min:02s del 15 de octubre de 2019.

El valor mínimo de P_{lt} es de 0p.u. y se presenta en las tres líneas, es registrado a las 09h:50min:02s del 14 de octubre de 2019. El valor más alto de P_{lt} es de 2,82p.u. y se presenta en la fase A (L1N) a las 11h:40min:02s del 18 de octubre de 2019.

En la Tabla 4.15 se observa el total de flicker de corta duración (P_{st}) y larga duración (P_{lt}) para cada línea.

Tabla 4.15 Total de flicker de corta y larga duración para cada línea.

Fases	P_{st}		P_{lt}	
	Total de valores mayores a 1 p.u.	Cumple con la norma IEC 61000-4-15 (menores a 51)	Total de valores mayores a 0,65 p.u.	Cumple con la norma IEC 61000-4-15 (menores a 51)
L1N	1	SI	12	SI
L2N	5	SI	61	NO
L3N	23	SI	73	NO

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de los valores en p.u. del P_{st} para la L1N, L2N y L3N se muestra en la figura 4.51, 4.52 y 4.53 respectivamente, en las cuales se aprecia un único valor de flicker máximo de corta duración de 6,446p.u. para la L1N, de 1,646p.u. para la L2N y de 2,814p.u. para la L3N.

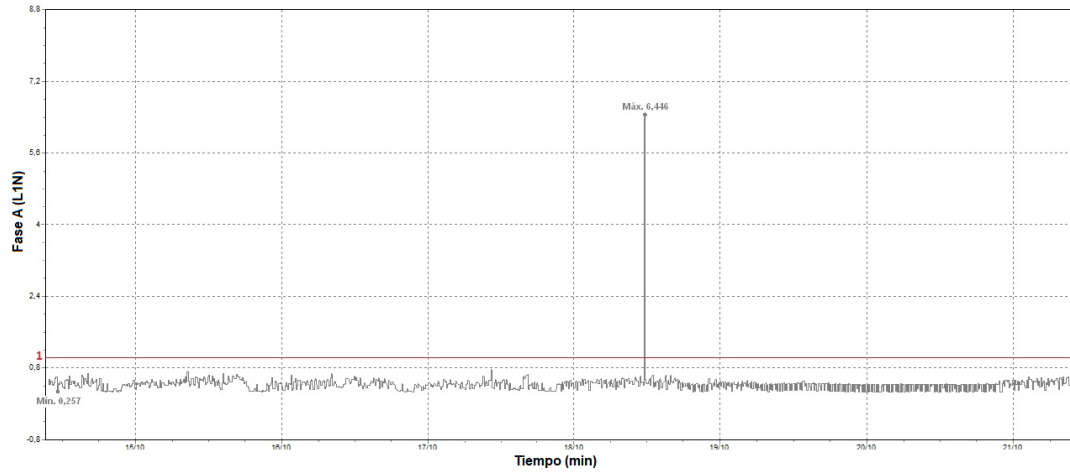


Figura 4.51 Valores en p.u. del P_{st} para la L1N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

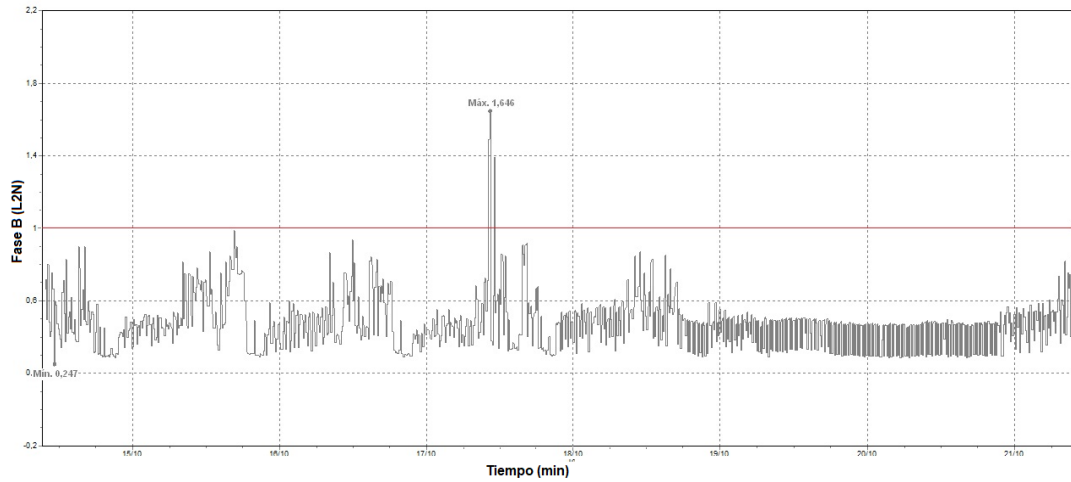


Figura 4.52 Valores en p.u. del P_{st} para la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

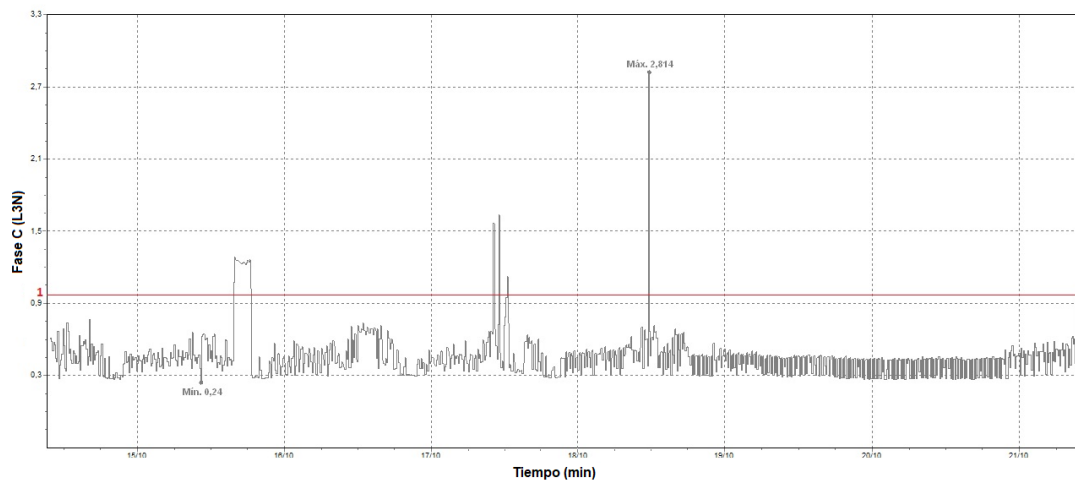


Figura 4.53 Valores en p.u. del P_{st} para la L3N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

El gráfico de los valores en p.u. del P_{it} para la L1N, L2N y L3N se muestra en la figura 4.54, 4.55 y 4.56 respectivamente, en las cuales se aprecia un único valor de flicker máximo de larga duración de 2,821p.u. para la L1N, de 1,239p.u. para la L2N y de 1,265p.u. para la L3N.

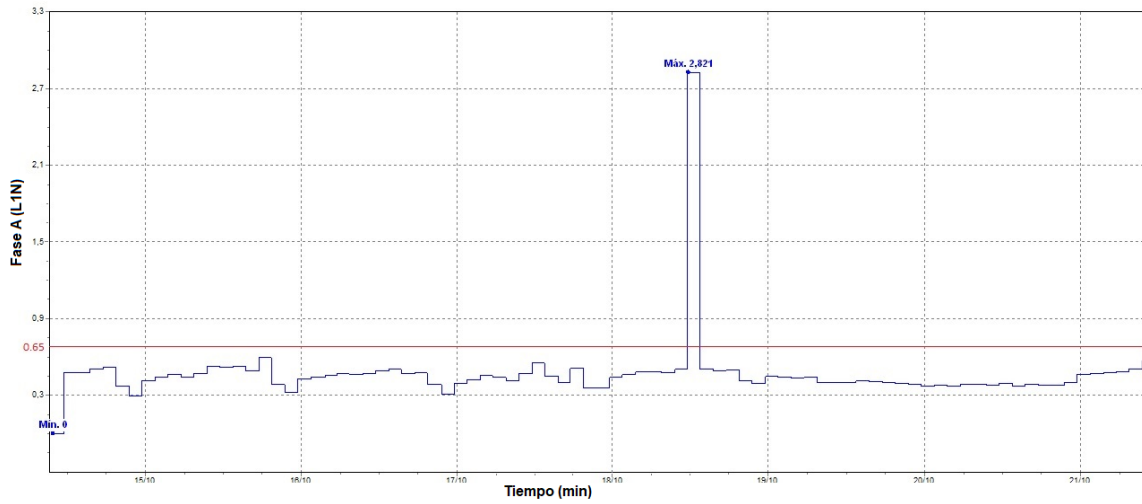


Figura 4.54 Valores en p.u. del P_{it} para la L1N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

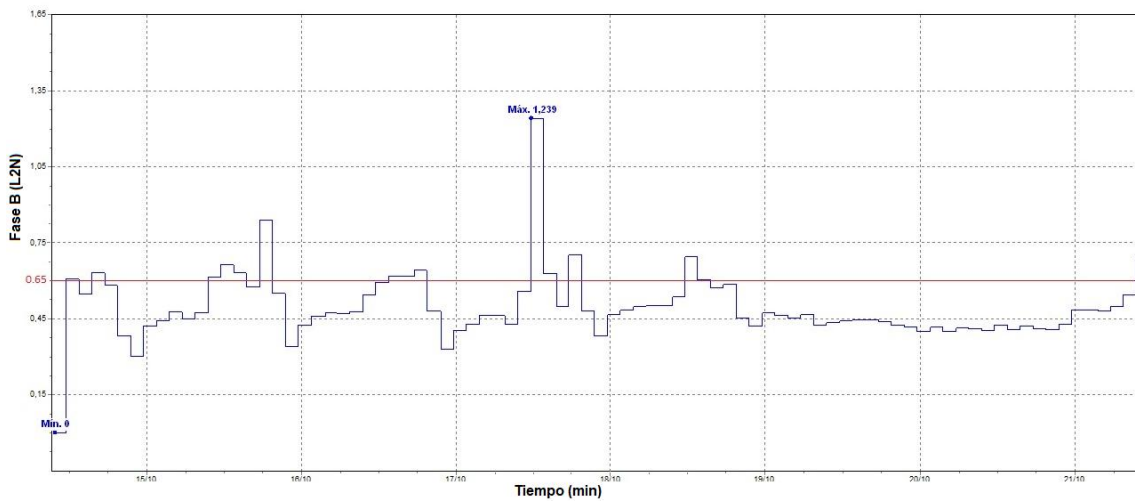


Figura 4.55 Valores en p.u. del P_{it} para la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

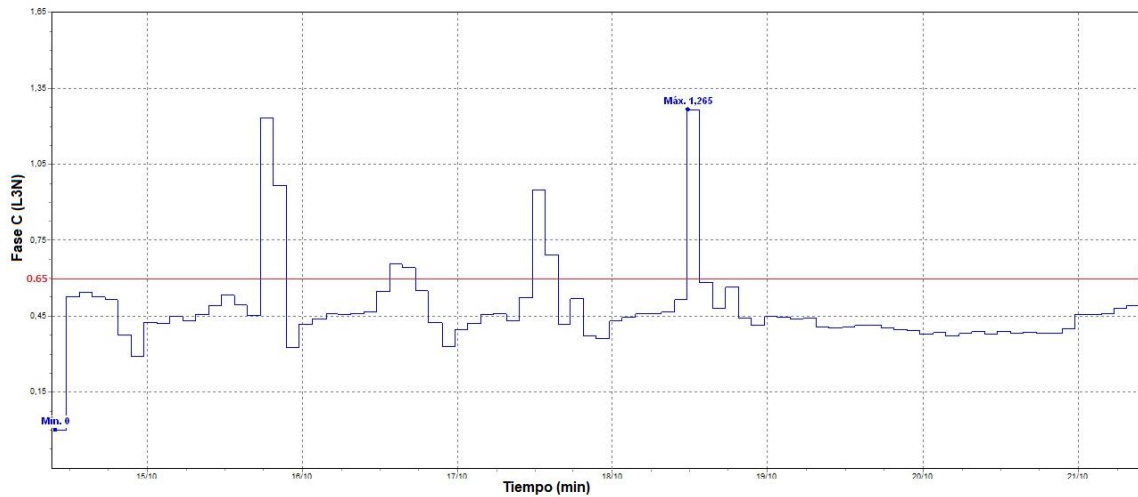


Figura 4.56 Valores en p.u. del P_{It} para la L3N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Al analizar la tabla 4.15 y las figuras 4.51 a la 4.56, se determina que los niveles de flicker de P_{St} en todas las fases cumplen con la normativa. Para los flicker de P_{It} las fases que no cumplen presentan valores de: 7,24% en la fase C (L3N) y de 6,05% en la fase B (L2N). Se concluye que al ser mayores al 5% de lo establecido por la norma IEC 61000-4-15 existen problemas de flicker de P_{It} en las fases B y C.

4.8.2.7 Evaluación de armónicos de voltaje.

La distorsión armónica de voltaje total e individual se evaluó considerando los límites establecidos en el estándar IEEE 519-2014, que se presentan en la tabla 3.7 en el capítulo 3. La normativa no se cumple cuando más del 5% del total de los valores registrados por el equipo excedan del límite establecido. A continuación, se detalla el análisis realizado.

a) Análisis de la distorsión armónica de voltaje total.

El estándar IEEE 519-2014 para el THDV total establece un valor máximo de 8% para los niveles de bajo voltaje. Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.16, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos para la fase A (L1N), fase B (L2N) y fase C (L3N), evaluados en función a los parámetros del THDV mínimo, medio y máximo.

Tabla 4.16 Valores mínimos, promedios y máximos del THDV total por línea.

Valores	THDV Mínimo [%]			THDV Medio [%]			THDV Máximo [%]		
	L1N	L2N	L3N	L1N	L2N	L3N	L1N	L2N	L3N
MIN	1,15	1,01	0,83	1,30	1,13	1,02	1,40	1,27	1,23
PROM	1.96	1.79	1.80	2.14	1.94	1.96	2,67	2,43	2,56
MAX	3.36	2.90	2.96	3,50	3,00	3.08	4.22	4,78	4.20

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.57 se presenta los valores del THDV total de la L1N registrados durante los siete días de medición, en la que se evidencia un único valor de THDV máximo de 4,22% y dos valores mínimos de 1,15%.

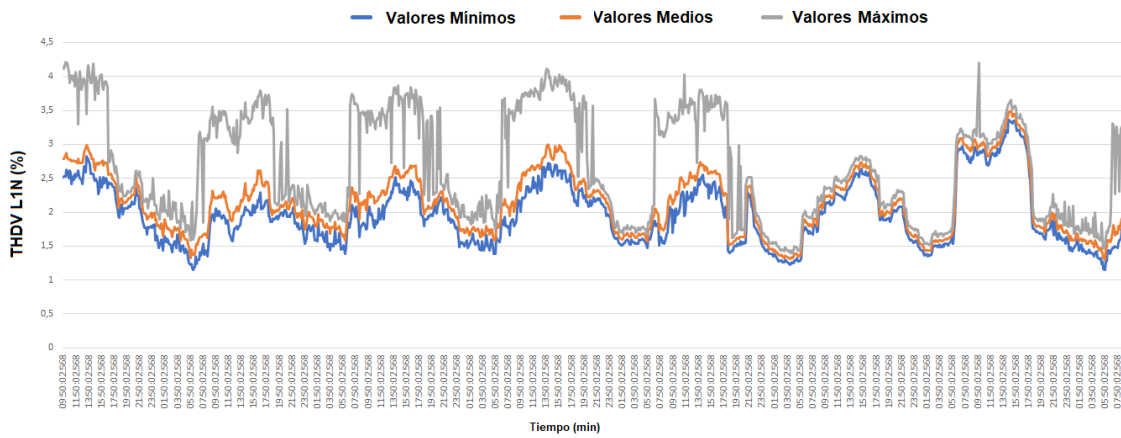


Figura 4.57 Valores del THDV total de la L1N.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.58 se presenta los valores del THDV total de la L2N registrados durante los siete días de medición, en la que se destaca un único valor de THDV máximo de 4,78% y tres valores mínimos de 1,01%.

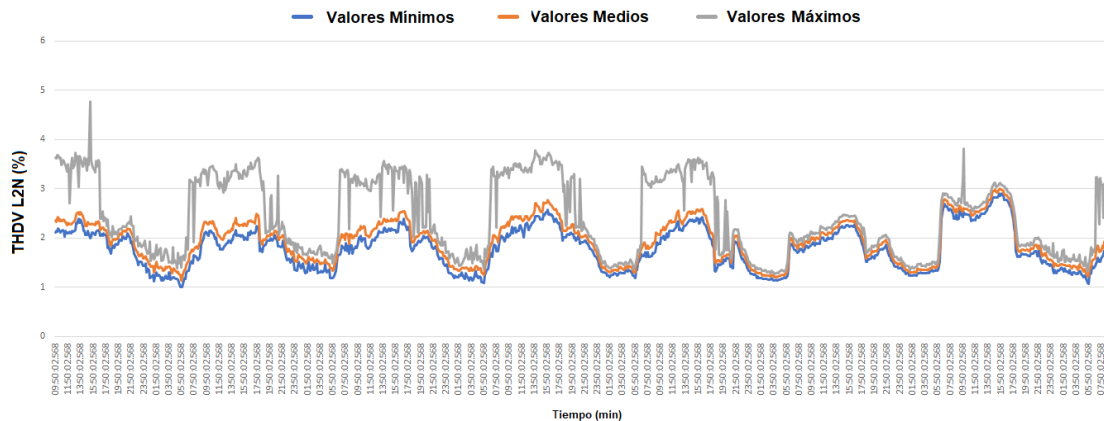


Figura 4.58 Valores del THDV total de la L2N.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.59 se presenta los valores del THDV total de la L3N registrados durante los siete días de medición. La que evidencia un valor único de THDV máximo de 4,20% y un mínimo de 0,83%.

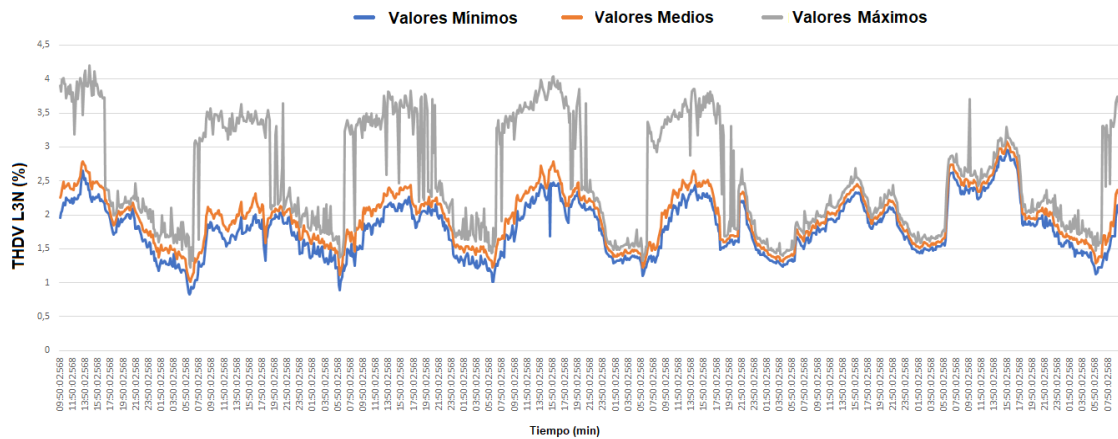


Figura 4.59 Valores del THDV total de la L3N.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.16 y las figuras 4.57, 4.58 y 4.59 se observa que los valores máximos de armónicos para cada fase se repiten una sola vez. En la figura 4.60 se observa la representación del espectro armónico de los valores medios del THDV mínimo, promedio y máximo.

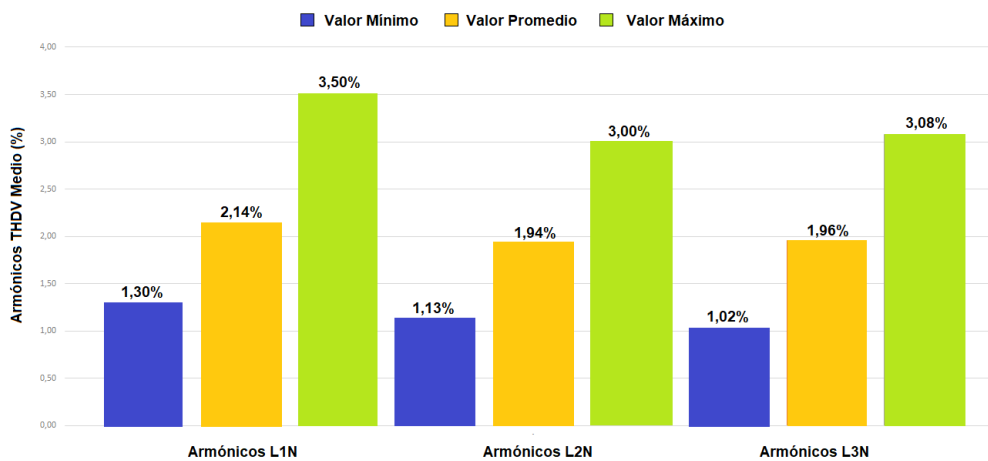


Figura 4.60 Espectro armónico de los valores medios del THDV mínimo, promedio y máximo.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.16 y la figura 4.60 se observa que el promedio del THDV de los valores medios para la fase A (L1N) representa el 2,14%, para la fase B (L2N) el 1,94% y para la fase C (L3N) el 1,96%. En base a esto se concluye que cumple con la normativa establecida, debido a que el voltaje de las fases presenta porcentajes menores al 8% definido por el estándar IEEE 519-2014.

b) Análisis de la distorsión armónica de voltaje individual.

Para niveles de bajo voltaje, el estándar IEEE 519-2014 para el THDV individual establece un valor máximo del 5%. Para el análisis se ha considerado evaluar en cada fase a los armónicos de orden 2 hasta el 50.

En la figura 4.61 se presenta el espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L1N. Se observa un mayor porcentaje en los armónicos de orden 3 y 5, con valores medios de 0,73% y 1,84% respectivamente.

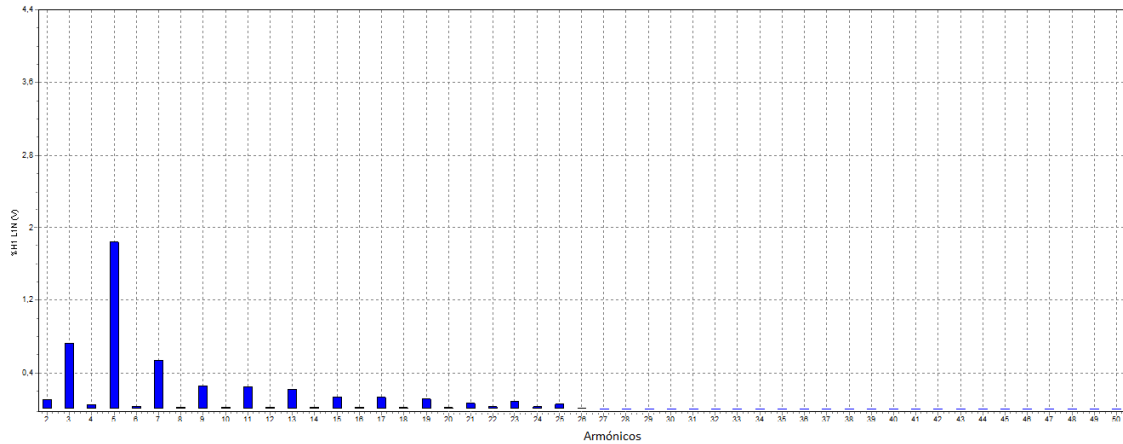


Figura 4.61 Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L1N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.62 se presenta el espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L2N. Se observa un mayor porcentaje en los armónicos de orden 3 y 5, con valores medios de 0,71% y 1,46% respectivamente.

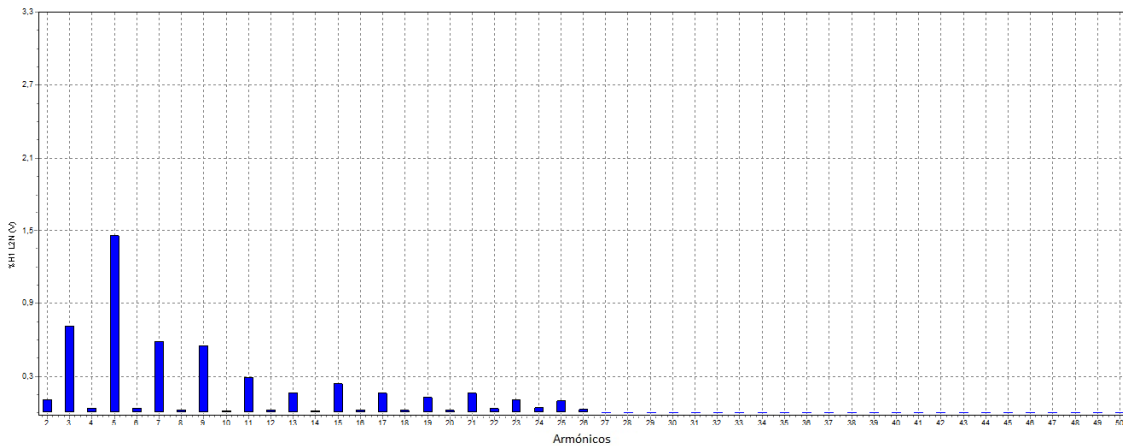


Figura 4.62 Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.63 se presenta el espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L3N. Se observa un mayor porcentaje en los armónicos de orden 3 y 5, con valores medios de 0,89% y 1,58% respectivamente.

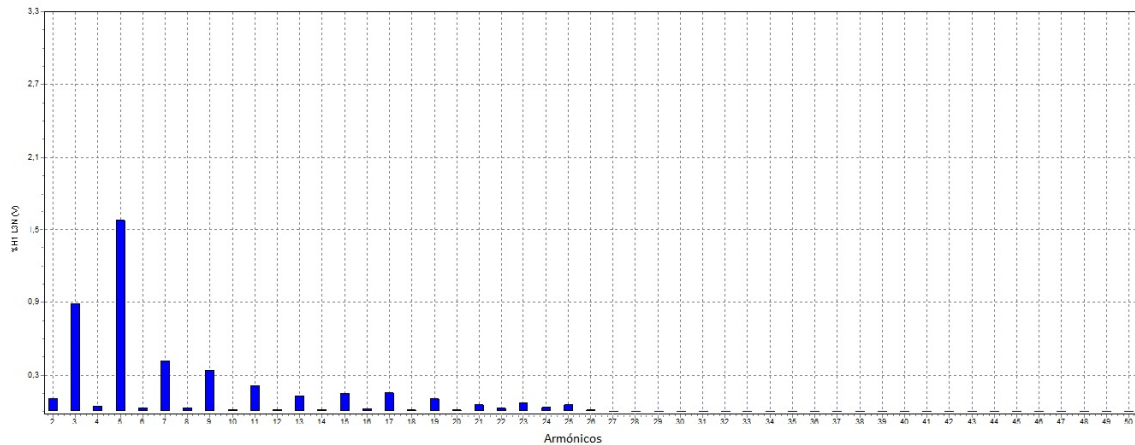


Figura 4.63 Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L3N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Del análisis de las figuras 4.61, 4.62 y 4.63 se concluye que los valores de THDV individual cumplen para cada una de las fases, debido a que sus valores son menores al límite del 5% definidos por el estándar IEEE 519-2014.

4.8.2.8 Evaluación de armónicos de corriente.

Para la evaluación del THDI total e individual se consideró los valores límites que establece el estándar IEEE 519-2014 que se presentan en la tabla 3.7. Valores que dependen de los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones 7 y 9; y de los valores límites para cada armónico de bajo voltaje (120V – 69kV), definidos en la tabla 3.2. La norma no se cumple cuando más del 5% del total de los valores registrados por el equipo excedan del límite permitido.

a) Análisis de la distorsión armónica de corriente total

Se determinó que la distancia entre el tablero trifásico principal del edificio y el punto de entrega del suministro es de 45m, los cuales se encuentran unidos por un conductor AWG calibre #4 de 7 hilos por cada fase. La resistencia del conductor es de $0,0008486 \Omega/m$ en base a los datos proporcionados por el fabricante y que se encuentra al final del documento en el ANEXO 4. Para realizar este análisis, se obtuvo la corriente de cortocircuito (I_{sc}), se identificó la corriente máxima de carga (I_L) y se obtuvo la relación de cortocircuito (SCR), a continuación, se detalla el proceso:

Para el cálculo de la I_{sc} se aplicó la ecuación 9, analizada en el capítulo 3, obteniéndose un valor de 3.325,74A.

Se consideró la I_L como la corriente máxima promedio cuyo valor es de 20,81A presente en la fase B (L2), que se observa en la tabla 4.9. Con estos valores se calcula la SCR , aplicando la ecuación 7 descrita en el capítulo 3, dando como resultado 159,81. El valor de SCR obtenido se compara con la tabla 3.2.

De la comparación se obtiene que el valor de 159,81 del SCR se encuentra dentro del rango de 100 a 1000 para bajo voltaje, lo que determina que el valor límite de la distorsión armónica de corriente total (THDI) a considerar es del 15%.

Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.17, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos para las fases A (L1), B (L2), C (L3) y el neutro (LN), evaluados en función a los parámetros del THDI mínimo, medio y máximo.

Tabla 4.17 Valores mínimos, promedios y máximos del THDI total por cada fase y el neutro.

Valores	THDI Mínimo [%]				THDI Medio [%]				THDI Máximo [%]			
	L1	L2	L3	LN	L1	L2	L3	LN	L1	L2	L3	LN
MIN	8,52	12,14	4,60	19,39	13,87	16,41	7,39	46,22	18,80	20,81	7,63	84,80
PROM	36,93	55,78	40,63	35,31	44,61	65,24	55,27	231,94	49,70	69,57	64,51	307,59
MAX	60,74	96,14	95,18	81,67	65,79	100,06	101,10	327,67	74,64	104,95	106,09	327,67

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.64 y 4.65 se observa el espectro armónico de los valores medios del THDI mínimo, promedio y máximo para cada línea y el neutro respectivamente.

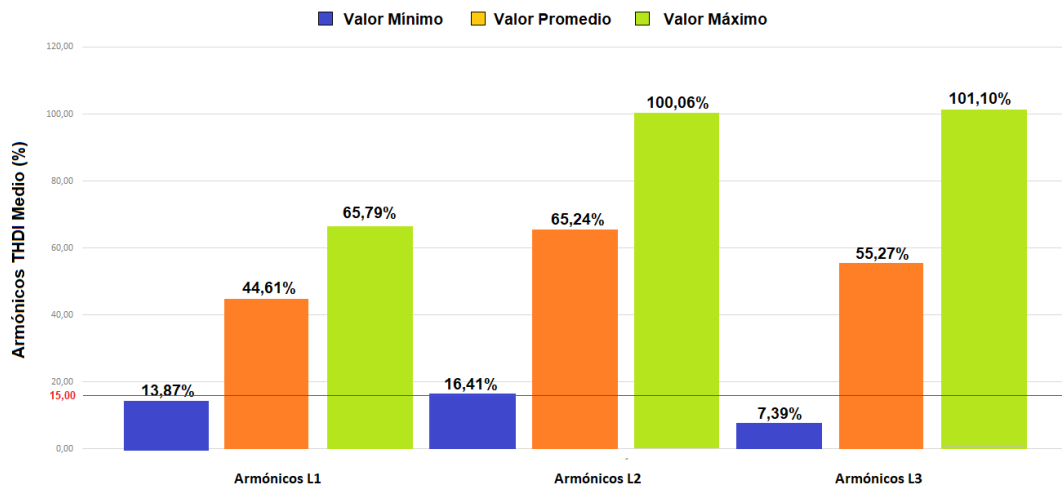


Figura 4.64 Espectro armónico de los valores medios del THDI mínimo, promedio y máximo por fase.

Fuente: Elaboración propia.

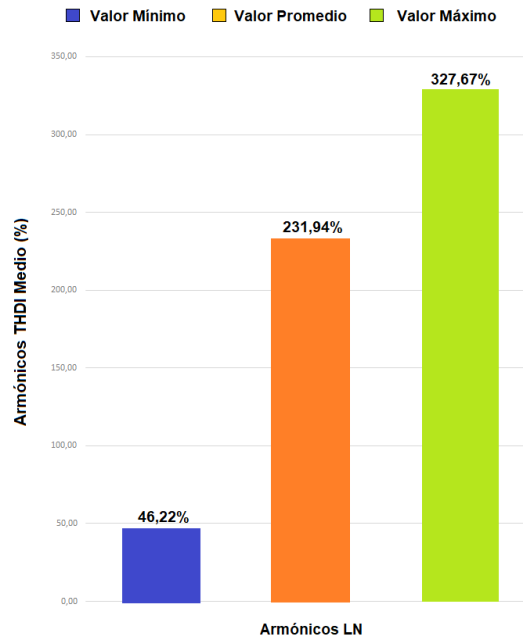


Figura 4.65 Espectro armónico de los valores medios del THDI mínimo, promedio y máximo del neutro.

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.17 y las figuras 4.64 y 4.65 se observa que el promedio del THDI total de los valores medios para la fase A (L1) es de 44,61%, para la fase B (L2) es de 65,24%, para la fase C (L3) es de 55,27% y para el neutro (LN) es de 231,94%. De esto se concluye que existe presencia de armónicos de corriente en cada fase y el neutro debido a que los valores indicados sobrepasan el límite del 15% propuesto por el estándar IEEE 519-2014.

b) Análisis de la distorsión armónica de corriente individual.

En función al valor de *SCR* obtenido y el rango establecido de 100 a 1000 para bajo voltaje según la tabla 3.2, se determina que los límites de armónicos individuales a considerar son:

- 12% para armónicos menores al orden 11.
- 5,5% para armónicos de orden 11 al 17.
- 5% para armónicos de orden 17 al 23.
- 2% para armónicos de orden 23 al 35.
- 1% para armónicos mayores al orden 35.

En la figura 4.66 se presenta el espectro del THDI Individual para la L1N. Se observa armónicos de orden 3, 5 y 7 con valores medios de 29,65%, 23,87% y 16,86% respectivamente, que superan al límite establecido del 12%. Para el armónico de orden 11 el valor medio es de 8,26%, que supera al límite establecido del 5,5%.

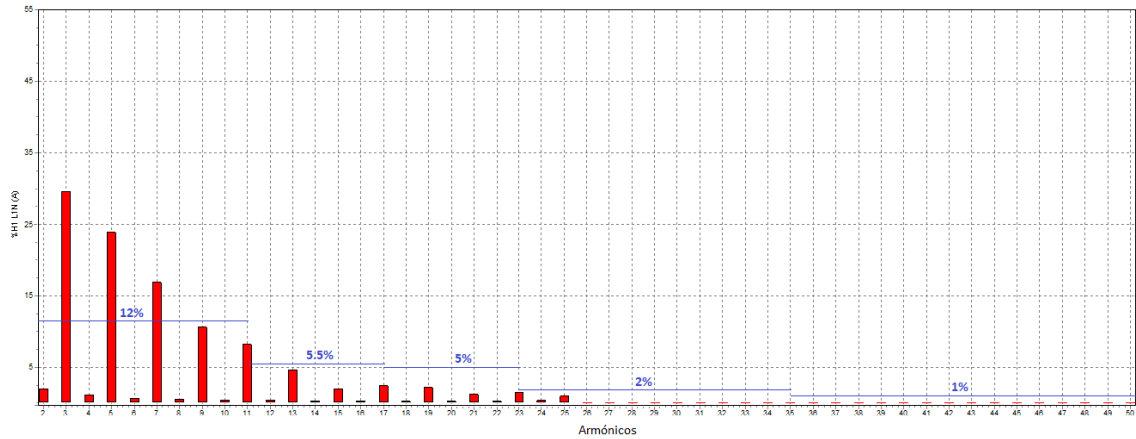


Figura 4.66 Espectro de la distorsión armónica de corriente individual para la L1N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.67 se presenta el espectro de THDI Individual para la L2N. Se observa armónicos de orden 3, 5, 7 y 9 con valores medios de 46,22%, 34,52%, 22,15% y 15,26% respectivamente, que superan al límite establecido del 12%. Para el armónico de orden 11 el valor medio es de 9,14%, que supera al límite establecido del 5,5%.

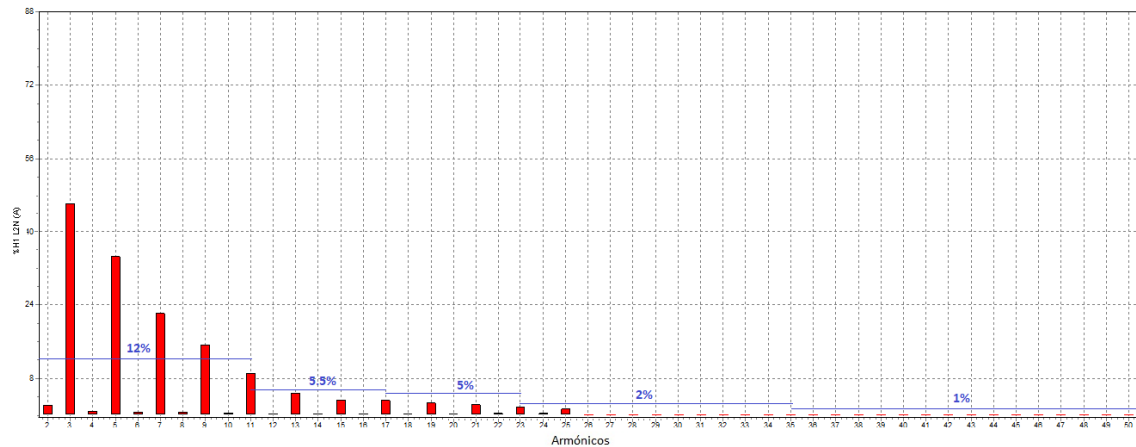


Figura 4.67 Espectro de la distorsión armónica de corriente individual para la L2N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

En la figura 4.68 se presenta el espectro de THDI Individual para la L3N. Se observa armónicos de orden 3, 5 y 7 con valores medios de 38,56%, 30,57% y 18,19% respectivamente, que superan al límite establecido del 12%. Para los armónicos de orden 11 y 13 sus valores medios son de 7,14% y 5,54% respectivamente, que superan al límite establecido del 5,5%.

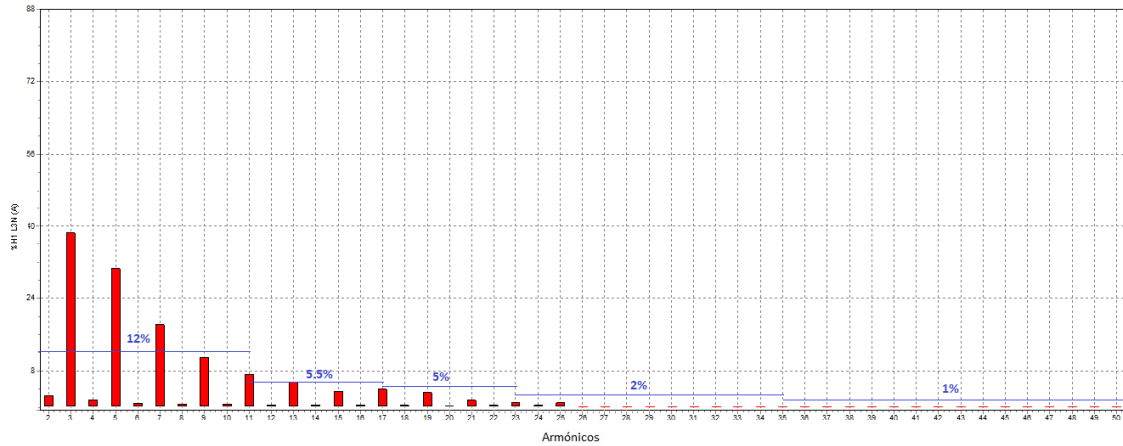


Figura 4.68 Espectro de la distorsión armónica de corriente individual para la L3N.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Al analizar las figuras 4.66, 4.67 y 4.68 se determina que, el porcentaje de THDI individual para cada fase no cumple con el estándar IEEE 519-2014 establecido, debido a que se presentan armónicos de orden 11 para las fases A y B; y de orden 13 para la fase C. Siendo la fase B (L2N) la que mayor porcentaje de THDI individual presenta.

4.8.2.9 Evaluación del factor de potencia.

Para la evaluación se consideró un valor mínimo de 0,92p.u. en base a lo establecido en la regulación de la ARCONEL 004/18. La normativa no se cumple cuando más del 5% del total de los datos registrados excedan del valor límite.

Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.18, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos evaluados en función a los parámetros del factor de potencia mínimos, medios y máximos por fase (A=L1N, B=L2N, C=L3N) y a nivel total.

Tabla 4.18 Valores mínimos, promedios y máximos del factor de potencia por fase y a nivel total.

Valores	L1N			L2N			L3N			TOTAL		
	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX
MIN	0,44	0,59	0,59	0,43	0,57	0,60	0,46	0,58	0,72	0,57	0,72	0,74
PROM	0,76	0,84	0,92	0,73	0,79	0,82	0,75	0,85	0,97	0,77	0,83	0,87
MAX	0,97	0,99	1,00	0,97	0,98	0,99	0,98	1,00	1,00	0,96	0,98	0,98

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.18 se observa que registra niveles bajos de factor de potencia para cada fase y a nivel total. La L1N muestra un valor de 0,44p.u. desde las 00h:30min:02s hasta las 02h:20min:02s del 21 de octubre de 2019. Para la L2N un valor de 0,43p.u. registrado a las 05h:20min:02s del 15 de octubre de 2019 y para la L3N un valor de 0,46p.u. a las 15h:50min:02s



del mismo día. El factor de potencia total presenta un valor mínimo de 0,57p.u., registrado a las 22h:30min:02s del 20 de octubre de 2019.

En la tabla 4.19 se muestra los resultados del análisis de los valores medios del factor de potencia para cada línea y a nivel total.

Tabla 4.19 Resultados del análisis de los valores medios del factor de potencia por línea.

Fases - Nivel	VALORES MEDIOS			Total de valores medios menores a 0,92p.u.	Cumple con la regulación ARCONEL 004/18 (menores a 51)
	MIN	PROM	MAX		
L1N	0,76	0,84	0,92	580	NO
L2N	0,73	0,79	0,82	752	NO
L3N	0,75	0,85	0,97	552	NO
TOTAL	0,77	0,83	0,87	675	NO

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.69 se muestra los valores mínimos, medios y máximos del factor de potencia total, registrados durante los siete días de evaluación, en la que se evidencia un único valor máximo de 0,98% y un valor mínimo de 0,57%.

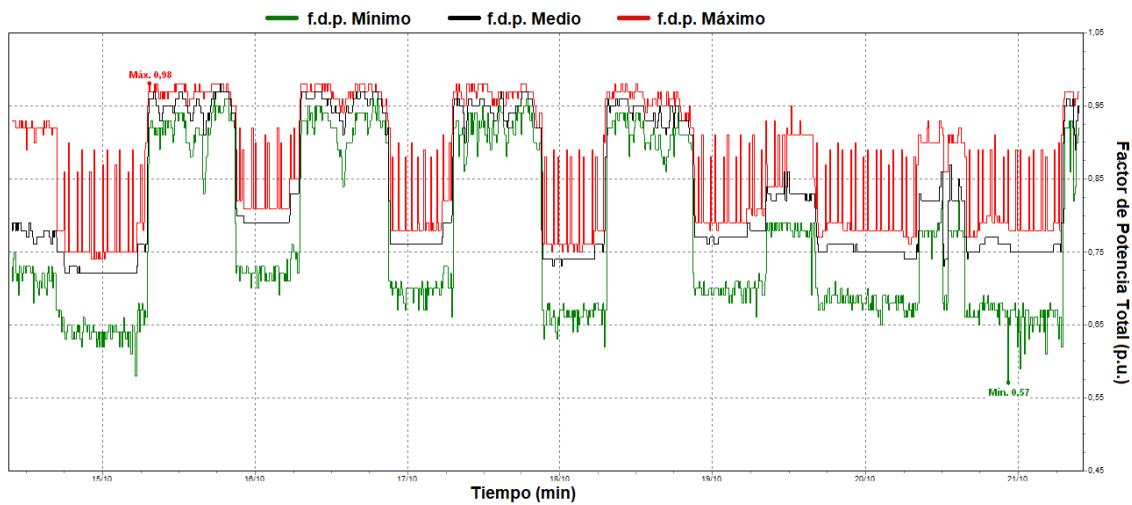


Figura 4.69 Valores mínimos, medios y máximos del factor de potencia.

Fuente: Equipo FLUKE 435.

Al analizar la tabla 4.19 y la figura 4.69 se determina que el total de los valores medios que sobrepasan el 0.92p.u. del factor de potencia representa el 57,53% para la L1N, 74,60% para la L2N, 54,76% para la L3N y a nivel total el 66,96%. Por lo que se concluye que estos valores sobrepasan el 5% de lo establecido por la regulación de la ARCONEL 004/18, lo que indica que el factor de potencia es bajo.

4.8.2.10 Evaluación de la potencia

Se determinó la demanda de potencia activa, reactiva y aparente partiendo de los valores mínimos, promedios y máximos de cada línea, y a nivel general. Los resultados del análisis se observan en la tabla 4.20, en la que se especifica los valores mínimos, promedios y máximos para la fase A (L1N), B (L2N) y C (L3N), evaluados en función a los parámetros de la potencia activa, reactiva y aparente.

Tabla 4.20 Valores mínimos, promedios y máximos de la potencia activa, reactiva y aparente.

Valores	Potencia Activa (kW)				Potencia Reactiva (kVAR)				Potencia Aparente (kVA)			
	L1N	L2N	L3N	TOTAL	L1N	L2N	L3N	TOTAL	L1N	L2N	L3N	TOTAL
MIN	0,40	0,40	0,20	1,00	-0,30	-0,10	-0,10	-0,40	0,40	0,40	0,20	1,00
PROM	0,80	1,13	0,74	2,66	-0,02	0,03	0,02	0,05	0,83	1,14	0,74	2,70
MAX	2,40	4,50	3,30	9,60	0,30	0,70	0,40	1,20	2,50	4,50	3,30	9,70

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.20 se observa que la demanda máxima de las potencias totales: activa es de 9,60kW, la reactiva es de 1,20kVAR y la aparente es de 9,70kVA, presentes durante el período de evaluación. Esta última se registra a las 18h:00min:02s del 15 de octubre de 2019.

A. Análisis de la potencia activa (kW)

El registro máximo de la potencia activa se presenta en la fase B (L2N) con un valor de 4,50kW registrado a las 17h:40min:02s del 15 de octubre de 2019. En la fase C (L3N) con un valor de 3,30kW identificado a las 18h:10min:02s del 15 de octubre de 2019 y en la fase A (L1N) con un valor de 2,40kW presente a las 10h:50min:02s del 17 de octubre de 2019.

En la figura 4.70 se muestra los valores medios de la potencia activa total y por línea.

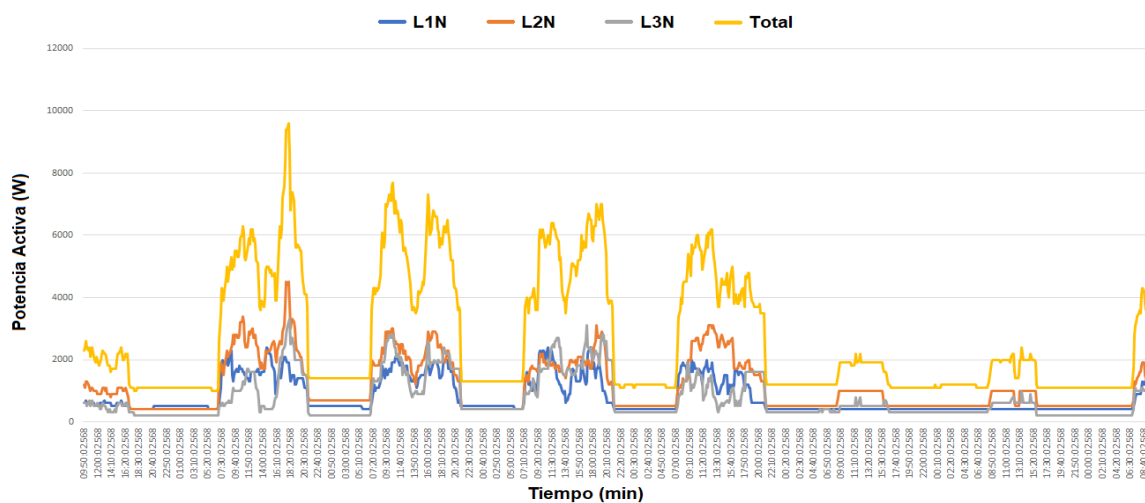


Figura 4.70 Valores medios de la potencia activa total y por línea.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.71 se presenta los valores máximos registrados de la potencia activa diaria, considerando para cada fase y a nivel total. Se observa un valor máximo para la fase A (L1N) de 1,14kW y de 1,65kW para la fase B (L2N) que se evidencia el 15 de octubre de 2019. Para la fase C (L3N) de 1,26kW presente el 17 de octubre de 2019. Se observa un valor máximo de potencia activa total de 3,77kW presente el 16 de octubre de 2019.

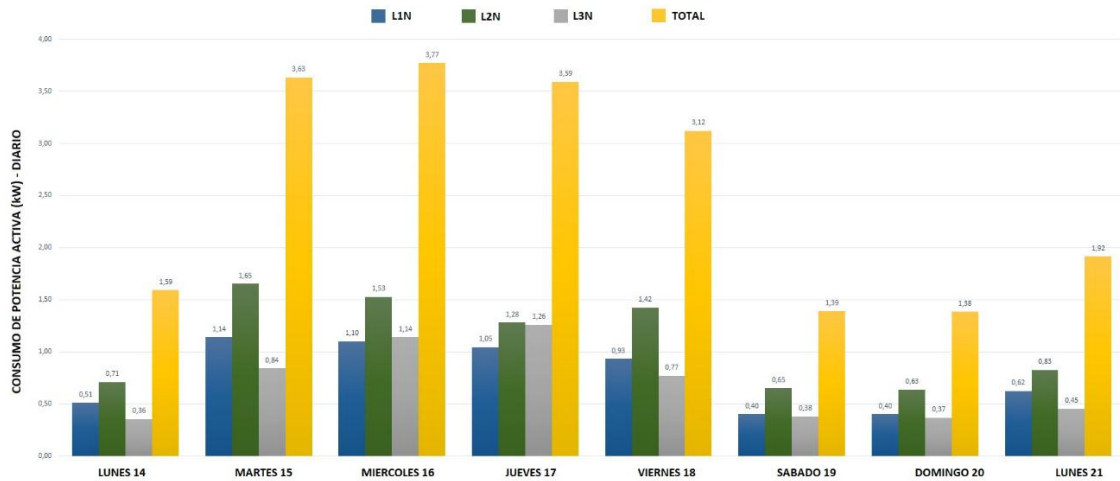


Figura 4.71 Valores máximos registrados de la potencia activa diaria por fase y total.

Fuente: Elaboración propia.

B. Análisis de la potencia reactiva (kVAR)

El registro máximo de la potencia reactiva capacitiva se presenta en la fase A (L1N) con un valor de -0,3kVAR, registrado a las 18h:20min:02s del 15 de octubre de 2019. El registro máximo de la potencia reactiva inductiva se presenta en la fase B (L2N) con valor de 0,7kVAR, evidenciado a las 18h:00min:02s del 18 de octubre de 2019.

En la figura 4.72 se presenta los valores medios de la potencia reactiva total y por línea.

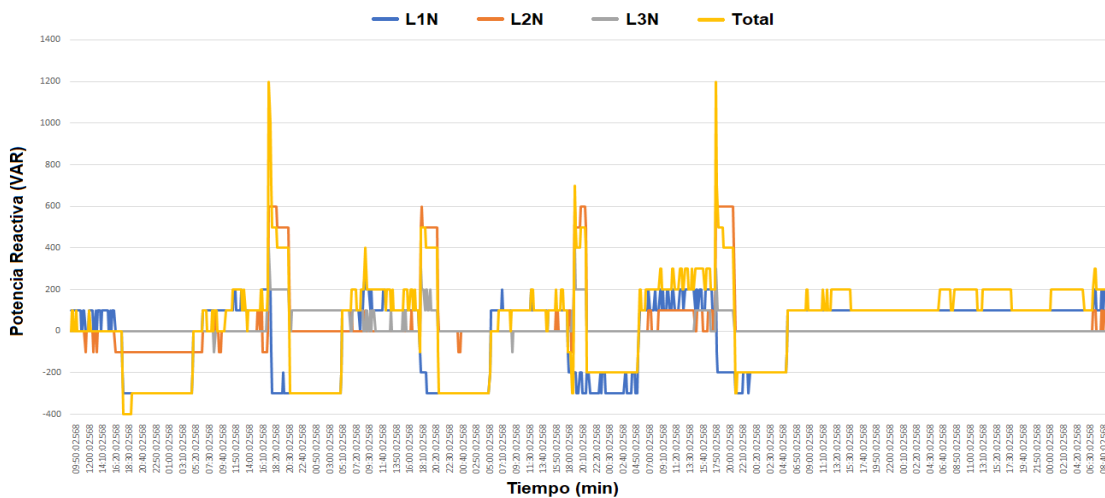


Figura 4.72 Valores medios de la potencia reactiva para cada línea y el total.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.73 se presenta los valores máximos registrados de la potencia reactiva diaria considerando para cada fase y a nivel total. Se puede observar que la demanda máxima de potencia reactiva capacitiva total es de $-0,13\text{kVAR}$, presente el 14 de octubre de 2019 y la potencia reactiva inductiva total es de $0,19\text{kVAR}$ que se evidencia el 21 de octubre de 2019.

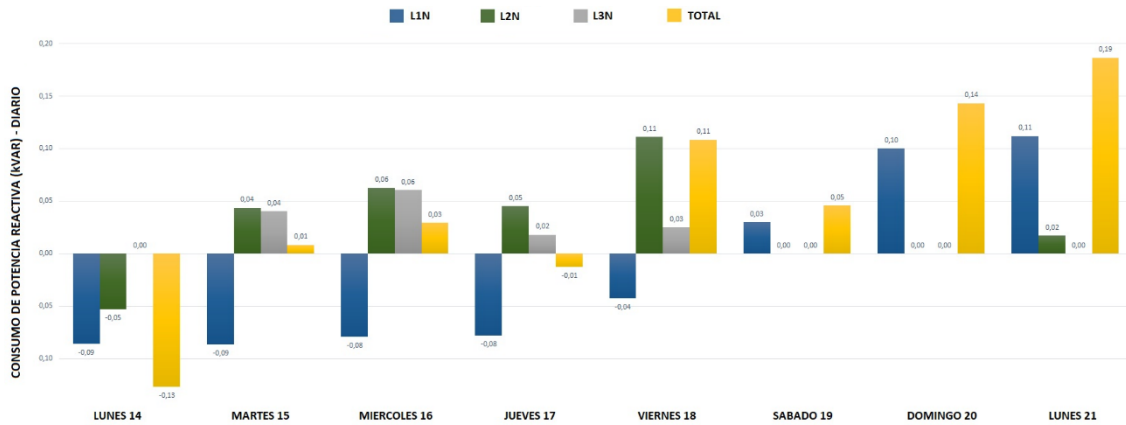


Figura 4.73 Valores máximos registrados de la potencia reactiva diaria por fase y total.

Fuente: Elaboración propia.

C. Análisis de la potencia aparente (kVA)

El registro máximo de la potencia aparente se presenta en la fase B (L2N) con un valor de $4,50\text{kVA}$ a las $17\text{h}:40\text{min}:02\text{s}$ y para la fase C de $3,30\text{kVA}$ que fueron registrados el 15 de octubre de 2019. Para la fase A (L1N) de $2,50\text{kVA}$ evidenciado a las $17\text{h}:30\text{min}:02\text{s}$ del 17 octubre de 2019.

En la figura 4.74 se muestra los valores medios de la potencia aparente total y por línea.

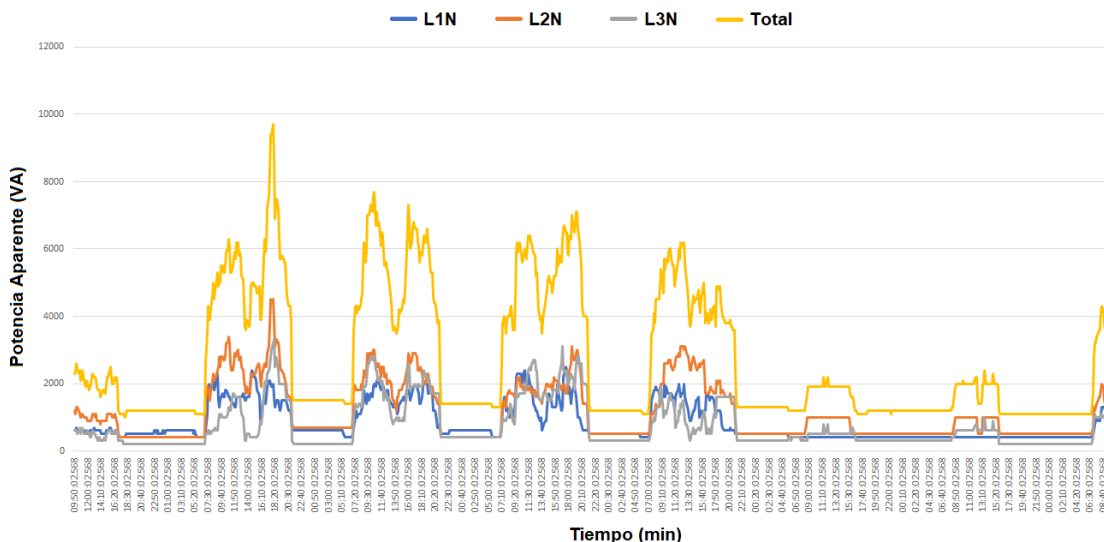


Figura 4.74 Valores medios de la potencia aparente por cada línea y el total.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.75 se presenta los valores máximos registrados de la potencia aparente diaria, considerando para cada fase y a nivel total. Se observa un valor máximo para la fase A (L1N) de 1,18kVA y de 1,66kVA para la fase B (L2N) registrados el 15 de octubre de 2019. Para la fase C (L3N) de 1,26kVA evidenciado el 17 de octubre de 2019. Se puede observar un valor máximo de potencia aparente total de 3,82kVA, mostrado el 16 de octubre de 2019.

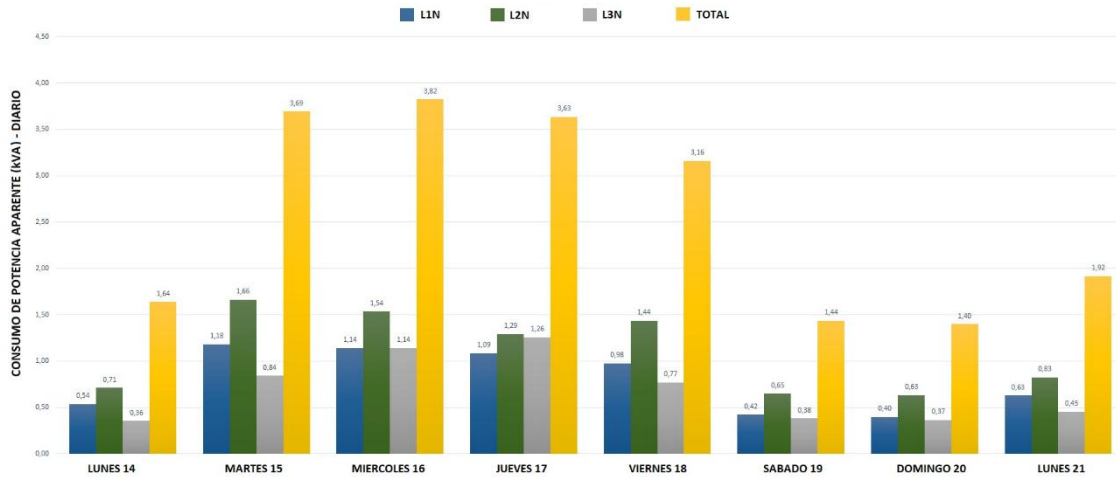


Figura 4.75 Valores máximos registrados de la potencia aparente diaria por fase y total.

Fuente: Elaboración propia.

4.8.2.11 Identificación de los problemas.

Después de realizar la evaluación de la calidad de energía en funcionamiento continuo de las cargas activas en el laboratorio, las cargas permanentes y las cargas variables del edificio, se presenta un resumen de los problemas identificados en el análisis los mismos que se observan en la tabla 4.21.

Tabla 4.21 Resumen de los problemas identificados en el análisis calidad de energía para el edificio.

Fases	Flicker – P _{It} Menores 5%	Armónicos de Corriente		Factor de potencia	
		Total Menores 15%	Individual General	FASES Menores 5%	TOTAL Menores 5%
Fase A (L1N)		No cumple (44,61 %)	No cumple H. orden 3, 5, 7 - 11	No cumple Registra 580 valores – 57,53% (0,84p.u.)	No cumple Registra 675 valores – 66,96% (0,83p.u.)
Fase B (L2N)	No cumple registra 61 valores (6,05%)	No cumple (65,24%)	No cumple H. orden 3, 5, 7, 9 - 11	No cumple Registra 752 valores – 74,60% (0,79p.u.)	



Fase C (L3N)	No cumple registra 73 valores (7,24%)	No cumple (55,27%)	No cumple H. orden 3, 5, 7 - 11- 13	No cumple Registra 552 valores – 54,76% (0,85p.u.)	
--------------	---------------------------------------	--------------------	-------------------------------------	--	--

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la tabla 4.21 se puede observar los parámetros de calidad de energía eléctrica que no se cumple en esta evaluación y son:

Flicker (nivel P_{it}) para la fase B y C sobrepasa con el 1,05% y 2,24% respectivamente.

Armónicos de corriente total sobrepasa para la fase A el 29.61%, para la fase B el 50.24% y para la fase C el 40.27%. Para armónicos de corriente individual para la fase A y para la fase B se presentan armónicos hasta del orden 11 y para la fase C presentan armónicos hasta el orden 13.

Factor de potencia para la fase A sobrepasa con el 52,53%, para la fase B con el 69,60% y para la fase C con el 49,76%. Se evidencia que la fase B es la que mayor carga y problema presenta. El factor de potencia a nivel total sobrepasa con el 61,96%.

El problema general es por la presencia de armónicos de corriente, la misma que está relacionada con el bajo factor de potencia y flicker. Este problema se soluciona incorporando un filtro activo según la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 2.



CAPÍTULO 5: PLANTEAMIENTO DE MEJORAS

5.1 Introducción

En el presente capítulo se resumen los problemas identificados en el capítulo anterior, se detallan los diferentes filtros para armónicos, se presenta el cálculo de la corriente armónica a filtrar, se establece una descripción y selección del filtro más adecuado para la solución al problema y se presenta una propuesta de instalación del filtro.

5.2 Resumen de los problemas identificados

En base al análisis realizado en el capítulo anterior, se presenta un resumen de todos los problemas identificados durante la evaluación de la calidad de energía al laboratorio y la facultad, su causa y la solución a aplicar.

5.2.1 Análisis del entorno

Problema 1: En fase y neutro en tomacorrientes con cables inadecuados.

Sustentación: Se evidenció incumplimiento de la norma NEC para instalaciones eléctricas, debido al uso en los circuitos de tomacorrientes de cables de calibres #10, #12 y #16.

Recomendación: Cumplir con la norma NEC para instalaciones eléctricas. Sustituir los cables instalados en los circuitos de tomacorrientes con cables de calibre #12 AWG (Circuitos normales) o #10 AWG (Circuitos especiales) para fase y neutro según sea el caso [85].

Respetar el código de colores establecido en la norma NEC para el cableado eléctrico, para la fase utilizar el color NEGRO y para el neutro el color BLANCO [85].

Problema 2: La línea de tierra en tomacorrientes, con cables inadecuados o falla en la conexión.

Sustentación: Se evidencia el incumplimiento de la norma NEC para instalaciones eléctricas, debido a que los tomacorrientes de pared usan en su línea de tierra cables de calibre #16.

En los tomacorrientes superpuestos no se respeta el código de colores establecidos por la norma NEC para instalaciones eléctricas ya que utiliza cables de color rojo.



Algunos tomacorrientes presentan fallas en la conexión a tierra.

Recomendación: Cumplir con la norma NEC para instalaciones eléctricas. Sustituir los cables instalados en los circuitos de tomacorrientes con cables de calibre #14 AWG (Circuitos normales) o #12 AWG (Circuitos especiales) para tierra según sea el caso.

Respetar el código de colores establecido en la norma NEC para el cableado eléctrico, para la línea de tierra utilizar el color VERDE o VERDE con AMARILLO.

Problema 3: La alimentación al subtablero de 220V para cargas especiales.

Sustentación: Se evidenció dos cables (de color rojo y azul) de calibre #10 AWG superpuestos a las conexiones en el cuarto breaker de cargas del tablero principal, para brindar el suministro eléctrico al subtablero de 220V ubicado dentro del laboratorio de automatización. El mismo cable es utilizado para el circuito de alimentación de las cargas especiales del laboratorio (robot KUKA).

Recomendación: Para la conexión de la alimentación que va del tablero principal al subtablero de 220V es recomendable utilizar un conductor de mayor calibre al que va desde el subtablero hasta los tomacorrientes. De acuerdo a las especificaciones de la normativa NEC para instalaciones eléctricas que textualmente dice *“El calibre de los alimentadores deberá estar en función de la demanda en cada subtablero”* [85]. Ya que su incumplimiento puede generar sobrecalentamientos de conductores e incendios.

Para los circuitos especiales con alimentación de 220V, se recomienda instalar protecciones individuales de mínimo 40A según establece la norma NEC para instalaciones eléctricas y así garantizar el buen funcionamiento del equipo.

Se debe incorporar en el tablero principal un breaker Cutler Hammer Bifásico Fi 225, 2 Polos de 40A independiente como elemento de protección del subtablero.

5.2.2 Equipos de laboratorio

Problema 1: En Sistemas Físicos Cibernéticos.

Sustentación: Durante el funcionamiento del equipo se evidencia:

- Presencia de un voltaje promedio de 45,05V en relación a la línea Neutro – Tierra.
- El consumo máximo del equipo es de 3A y una corriente en el neutro de 5A, siendo este mayor al de fase debido a la presencia de corrientes armónicas.

Problema 2: En la planta de Industria 4.0.

Sustentación: Durante el funcionamiento del equipo se evidencia:



- Presencia de un voltaje promedio de 59,44V en relación a la línea Neutro – Tierra.
- El consumo máximo del equipo es de 4A y una corriente en el neutro de 5A lo que indica presencia de armónicos.
- Por observación se determinó la conexión de dos regletas en serie.

Problema 3: En el compresor.

Sustentación: Durante el funcionamiento del equipo se evidencia:

- Presencia de un voltaje promedio de 56,20V en relación a la línea Neutro – Tierra.
- El consumo máximo del equipo es de 26A y una corriente en el neutro de 30A lo que indica presencia de armónicos.

Problema 4: En el robot KUKA.

Sustentación: Durante el funcionamiento del equipo se evidencia:

Presencia de un voltaje promedio entre la línea neutro – tierra (LNG) de 39,20V y una corriente máxima en el neutro de 4A, valor menor a 5A y 6A registrados en la fase B (L2) y C (L3) respectivamente, lo que indica que existe corrientes inconsistentes en el neutro.

Se evidencia que el equipo requiere una alimentación directa de 220V para la fase, una línea de neutro y una de tierra, que no es suministrada por el tomacorriente de 220V debido a que este se forma por la suma de dos fases de 127V y un conductor neutro. El equipo con el tomacorriente se conecta por un cable que une la fase de 127V con la fase del equipo, la fase de 127V restante con el neutro del equipo y la línea neutro del tomacorriente con la tierra del equipo. Se observa que la estructura metálica del robot KUKA no dispone de conexión a tierra externa.

Recomendación general: Al evidenciarse la presencia de voltajes mayores a los 2V sugeridos por autores [87], en la línea neutro - tierra (LNG). Se recomienda inspeccionar el circuito eléctrico de los tomacorrientes que van hasta el tablero principal del edificio, específicamente de las líneas antes mencionadas, de modo que se verifique el cumplimiento de la norma NEC para instalaciones eléctricas en lo referente a:

Calibre de los conductores #10 AWG para el neutro y #12 AWG para tierra en los circuitos de tomacorrientes especiales. Respetando el código de colores establecido por la norma NEC.

Para reducir las corrientes armónicas se recomienda incorporar filtros para armónicos.

Se recomienda que no se conecten en serie las regletas y que su uso no debe superar las cuatro horas. Debido a que puede generar incendios producto de las sobrecargas [88].

Se recomienda que se diseñe y se implemente una instalación con bases técnicas de los circuitos de tomacorriente de 220V presentes en el laboratorio, que se acojan a las

características de conexión requeridas por los equipos (robot KUKA). Las mismas que deben tener concordancia con las normativas eléctricas específicas, con la finalidad de salvaguardar la integridad de los equipos y personal que trabajan en el laboratorio.

Se recomienda implementar el sistema de puesta a tierra de los robots KUKA, con la finalidad de evitar posibles fallos o pérdida del equipo, evitar fugas de corriente que puedan ocasionar descargas al personal que manipula el equipo.

Para acondicionar el circuito de conexión de 220V al requerido por el robot KUKA se recomienda incorporar como una solución fiable y de bajo costo, un transformador LiteFuze LT-5000 que convierte 110/120V americanos a 220/240V europeos, con una potencia de 5000W en un tiempo hasta 30min de funcionamiento y de 2500W en funcionamiento continuo [89] [90], el cual proporcionará las líneas de 220V, neutro y tierra requeridas por el equipo. Este tipo de transformador se puede observar en la figura 5.1, con alimentación de 120V con conector de 3 polos y su información técnica se presenta en el ANEXO 5 en este documento.



Figura 5.1 Transformador LiteFuze LT-5000 5000W de 120V a 220V [86].

5.2.3 Tablero principal

Problema 1: Flicker P_{It} .

Sustentación: Se evidenció valores de P_{It} superiores al 5% establecido por la normativa IEC 61000-4-15, en la fase B (6,05%) y C (7,24%).

Problema 2: Armónicos de corriente.

Sustentación:

En la FASE A se evidenció valores de: Armónicos totales de 44,61%, superior al 15% establecido por el estándar IEEE 519-2014. Armónicos individuales de orden 3, 5 y 7 superiores al 12% y de orden 11 superior al 5,5% que incumplen con los límites establecidos por el estándar IEEE 519-2014.



En la FASE B se evidenció valores de: Armónicos totales de 65,24%, superior al 15% establecido por el estándar IEEE 519-2014. Armónicos individuales de orden 3, 5, 7 y 9 superiores al 12% y de orden 11 superior al 5,5% que incumplen con los límites establecidos por el estándar IEEE 519-2014.

En la FASE C se evidenció valores de: Armónicos totales de 55,27%, superior al 15% establecido por el estándar IEEE 519-2014. Armónicos individuales de orden 3, 5 y 7 superiores al 12% y de orden 11 y 13 superiores al 5,5% que incumplen con los límites establecidos por el estándar IEEE 519-2014.

Problema 3: Factor de potencia.

Sustentación:

Para la FASE A se evidenció un promedio de 0,84p.u. de los valores medios. El 57,53% de los valores del factor de potencia son mayores a 0.92p.u. los que sobrepasan el 5% establecido por la regulación ARCONEL 004/18.

Para la FASE B se evidenció un promedio de 0,79p.u. de los valores medios. El 74,60% de los valores del factor de potencia son mayores a 0.92p.u. los que sobrepasan el 5% establecido por la regulación ARCONEL 004/18.

Para la FASE C se evidenció un promedio de 0,85p.u. de los valores medios. El 54,76% de los valores del factor de potencia son mayores a 0.92p.u. los que sobrepasan el 5% establecido por la regulación ARCONEL 004/18.

El factor de potencia a nivel total se evidenció un promedio de 0,83p.u. de los valores medios. El 66,96% de los valores del factor de potencia son mayores a 0.92p.u. los que sobrepasan el 5% establecido por la regulación de la ARCONEL 004/18.

Recomendación general: Se recomienda instalar un filtro para Armónicos que permita eliminar o reducir todas las corrientes armónicas generadas en las fases.

A continuación, se realiza un análisis para identificar el tipo de filtro que dé solución a la problemática identificada.

5.3 Filtros para armónicos.

En base a revisiones bibliográficas se determina que existen dos tipos de filtros básicos para dar solución a los problemas de armónicos, que se clasifican en dependencia de sus elementos que lo constituyen. El primer grupo denominados filtros pasivos, son aquellos que están constituidos por bobinas y capacitores, y se aplican a dar solución a un solo tipo de armónico, pero presentan problemas de resonancia en la red [91], por lo que no son considerados como elementos de solución aplicables para esta investigación.

El segundo grupo denominados filtros activos, están constituidos por elementos pasivos y convertidores con modulación de ancho de pulso (PWM, *por sus siglas en ingles*), que permiten cancelar los armónicos de voltaje o corriente generados por las cargas no lineales conectadas a la red, mejorar el factor de potencia y equilibrar las corrientes en las fases [91] [92]. Por tal razón se concluye que el filtro activo es aplicable para dar solución a esta investigación.

Los filtros activos se clasifican en serie y paralelo. Los primeros se usan cuando la distorsión armónica de voltaje es alta [93], por lo que no son aplicables en esta investigación. Los segundos se caracterizan por compensar potencia reactiva a la red, corregir el consumo de corrientes desequilibradas por fase, eliminar las corrientes presentes en el conductor neutro y mejorar el factor de potencia [94]. Son utilizados cuando la distorsión armónica de corriente es alta [93], muchos autores recomiendan su uso cuando se trata de cumplir normas o estándares relacionados a armónicos, como la IEEE 519 [92]. Las características del filtro deben ser bien definidas ya que ellas dimensionan la cantidad de corriente a filtrar, un error en su dimensionamiento anularía por completo su objetivo.

En la figura 5.2 se presenta el principio de funcionamiento de un filtro activo en paralelo, el cual es ubicado entre la fuente de alimentación y la carga no lineal. Este tipo de filtro actúa como una fuente de corriente inyectando la diferencia de corriente que existe entre la onda senoidal y la señal deformada por el armónico, con el fin de cancelar o contrarrestar a cada corriente armónica generada por las cargas no lineales [95].

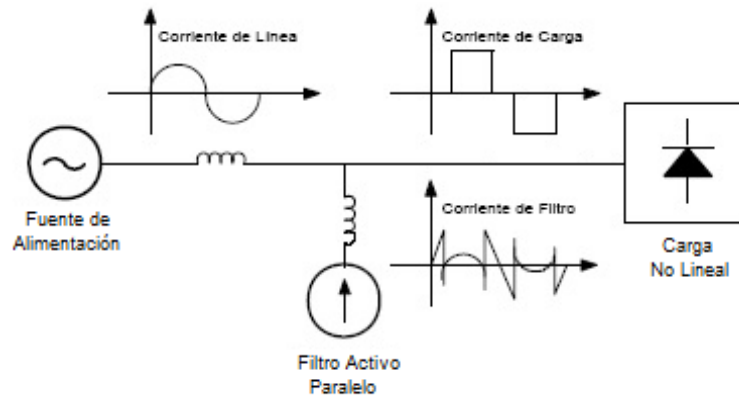


Figura 5.2 Funcionamiento de un filtro activo en paralelo [96].

5.4 Cálculo del filtro activo en paralelo

Para identificar el filtro que dé solución al problema presentando es necesario calcular la corriente armónica a filtrar, la que se describe en la ecuación 15 [94].

$$I_{AFQ} = SF_h * I_{CARGA} * THDI\% \quad [A] \quad (15)$$



Donde:

SF_h : Es un valor teórico que establece el factor de sobrecarga del filtro.

I_{CARGA} : Es la corriente de carga.

$THDI\%$: Es la distorsión armónica de corriente total expresado en porcentaje.

El valor de SF_h está relacionado con el valor del THDV [94]:

Si el THDV = 3% el factor de seguridad a aplicar es de 1,2.

Si el THDV = 5% el factor de seguridad a aplicar es de 1,5.

Si el THDV > 5% el factor de seguridad a aplicar es de 1,8 a 2,0.

Para determinar la corriente nominal del filtro se requiere los valores medios obtenidos del THDI% total, cuyos valores son: para la L1N de 44,61%, para la L2N de 65,24%, para la L3N de 55,27% y para el neutro de 231,94%. El promedio de la corriente máxima de carga obtenida de la tabla 4.9 es de 20,81A.

Los valores del THDV alcanzados para la L1N es de 2,14%, para la L2N es de 1,94% y para la L3N es de 1,96%. El factor de sobre carga del filtro en base a los datos del THDV mencionados será de 1,2. Remplazando los datos en la ecuación 15 se obtiene:

$$I_{AFQL1N} = 1,2 * 20,81 A * 44,61 \% = 11,14 A$$

$$I_{AFQL2N} = 1,2 * 20,81 A * 65,24 \% = 16,29 A$$

$$I_{AFQL3N} = 1,2 * 20,81 A * 55,27 \% = 13,80 A$$

$$I_{AFQLNG} = 1,2 * 20,81 A * 231,94 \% = 57,92 A$$

La corriente de filtrado para la fase A es de 11,14A, para la fase B es de 16,29A, para la fase C es de 13,80A y para el neutro es de 57,92A. El valor de la fase B y el neutro son los más altos, por lo que el filtro a considerar debe filtrar corrientes máximas de 30A por fase y 90A para el neutro. De acuerdo a la configuración del sistema eléctrico de la facultad, se considera que el equipo sea trifásico de 4 hilos.

5.5 Selección del filtro

En la tabla 5.1 se presenta una comparativa de varios modelos de filtros activos en paralelo de 4 hilos que se acoplan a los requerimientos establecidos en base a los cálculos anteriores.

Tabla 5.1 Comparativa de varios modelos de filtros activos en paralelo.

Descripción	Fabricante				
	ABB	CIRCUTOR	LIFASA	SCHNEIDER-ELECTRIC	MERUS POWER
Modelo	PQFS	AFQm	SINAF M	AccuSine PCSn	SERIE A2
Voltaje de operación	208-240V 380-415V	230 - 400V	230 - 400V	208 - 415V	200 - 480V
Corrientes de Filtrado	30 - 45 - 60 -70 - 80 - 90 - 100A	30 - 60 - 100A	30 - 60 - 90 - 100A	20 - 30 - 50 - 60A	50 - 100 - 150 A
Orden de Armónicos	2 - 50	2 - 50	2 - 50	2 - 50	2 - 50
Corrección del factor de potencia seleccionable	0,6 inductivo 0,6 capacitivo	0,7 inductivo 0,7 capacitivo	0,7 inductivo 0,7 capacitivo	-	-
Filtrado de Armónicos	Hasta orden 15 consecutivo	Hasta orden 25 consecutivo	Hasta orden 25 consecutivo	Hasta orden 25 consecutivo	-
THDV máximo	-	Hasta el 25%	Hasta el 25%	Hasta el 20%	-
Altura de operación	-	3000m	3000m	4800m	-
Tiempo de respuesta	0,5ms	0,1ms	0,1ms	0,8ms	0,1ms
Número de filtros en paralelo que se puede incorporar	Hasta 4	Hasta 100	Hasta 100	-	Hasta 7
Dimensiones	58,5X31,0X70,0 cm	43,0 x 17,8 x 53,0cm	30,0 x 17,8x 50,0 cm	44,0 x 26,5 x 96 cm	52,0 x 22,5 x 85,0 cm

Fuente: Elaboración propia.

En base a la tabla 5.1 se determina que los filtros AFQm de 30A, cuyo modelo específico es AFQm-4WF-030M-400, fabricado por la empresa CIRCUTOR de España [97] y el SINAF M de 30A, cuyo modelo específico es SINAFM440030W, fabricado por la empresa LIFASA del mismo país [98]. Se consideró debido a que la altura de operación del filtro cubre los 2.750m s. n. m., que se encuentra la ciudad de Riobamba. Los filtros seleccionados se pueden apreciar en la figura 5.3 y sus características técnicas se adjuntan en el ANEXO 6 y 7 respectivamente.



Figura 5.3 Filtro activo en paralelo multifunción de CIRCUTOR y LIFASA.

Fuente: Elaboración propia.

5.6 Lugar de instalación

Según información proporcionada por los fabricantes menciona que la instalación se debe realizar lo más cercano a las cargas, después del interruptor trifásico general de 60A. En la figura 5.4 se observa la propuesta del diagrama de conexión del filtro para la Facultad de Informática y Electrónica.

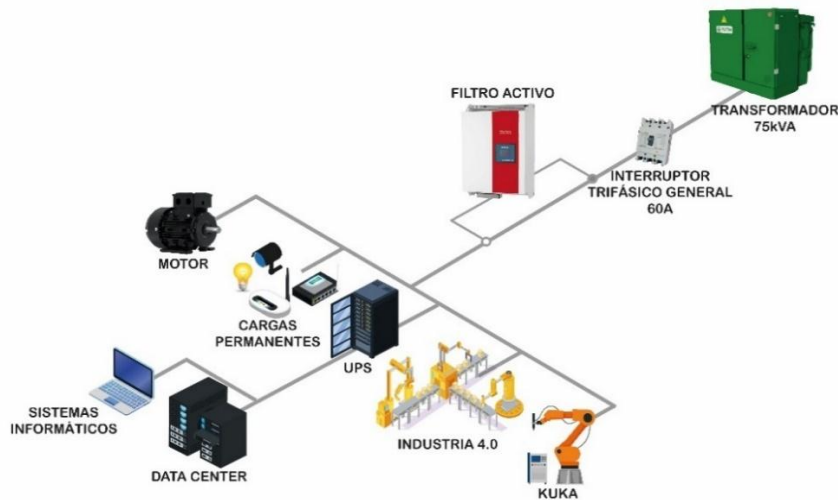


Figura 5.4 Propuesta del diagrama de conexión del filtro activo para el edificio de la facultad.

Fuente: Elaboración propia.

La finalidad de incorporar el filtro activo es garantizar la calidad de energía eléctrica para el edificio de la facultad prolongando la vida útil y el buen funcionamiento de todos los equipos existentes, disminuyendo el riesgo de sobrecalentamiento y pérdida (equipos), costos excesivos en mantenimiento y facturación eléctrica.

Se recomienda realizar las evaluaciones de la calidad de energía eléctrica en toda la infraestructura de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, al menos dos veces al año



específicamente en zonas donde se encuentren instalados equipos sensibles que operen a voltajes de 110V, 220V o superiores, en especial aquellos cuya infraestructura no fue construida para ese propósito, para evidenciar a tiempo problemas y dar soluciones que prevean daños o pérdidas irreparables de los mismos.

De los resultados obtenidos en el proceso de análisis y las sugerencias enunciadas en este capítulo se generó un informe que se entregó a las autoridades responsables de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo vinculados con el desarrollo de este proyecto. El documento de aceptación del análisis y la propuesta de solución se presenta en el ANEXO 8, como elemento de respaldo del trabajo realizado en el proceso de titulación, junto a la documentación generada en todas las etapas de investigación.

En el ANEXO 9 se presenta los costos aproximados que implicarían el ejecutar las propuestas presentadas. Debido a que se desconoce de un distribuidor en el país, del transformador LiteFuze LT-5000 y del filtro activo de las empresas CIRCUTOR o LIFASA, se presentan precios sin considerar los costos de importación.



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se evaluó la calidad de energía eléctrica del laboratorio de automatización de la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, considerando la variación de la frecuencia, amplitud, forma de onda y simetría en base a las normativas de la ARCONEL 005/18 y 004/18, EN50160, IEC 61000-4-15 y la IEEE 519-2014.

Al analizar las instalaciones eléctricas del laboratorio se determinó que de 10 tomacorrientes de 120V, cuatro presentaron la fase y el neutro invertido. El resto no identificaba a la línea de tierra que lo conectaba. Se identificó que algunos cables conductores no cumplen con la normativa establecida por el NEC para instalaciones eléctricas en lo que se refiere al calibre, tipo de conductor y código por colores. Se observó conexiones con canaletas para cuatro tomacorrientes de 120V que son alimentados por uno de pared.

De las pruebas individuales realizadas a los equipos del laboratorio se determinó la presencia de voltajes en la línea neutro – tierra (LNG) de 46,05V para el Sistema Físico Cibernético, de 59,80V para la planta de Industria 4.0, de 56,63V para el Compresor y de 39,45V para el robot KUKA. Se pudo evidenciar que estos equipos son generadores de armónicos de orden 3, donde el Sistema Físico Cibernético presenta una mayor distorsión armónica de corriente total de 146,59%. Se determinó que el mayor generador de distorsión armónica de voltaje total es el robot KUKA con un 5,66%.

De los datos obtenidos de las mediciones realizadas se identifican flicker de P_{it} en la fase C (L3N) con un 7,24% y un 6,05% en la fase B (L2N), valores que sobrepasan el 5% del total de los datos registrados, según lo establecido por la norma IEC 61000-4-15. De esto se concluye que existen problemas de flicker P_{it} en las fases.

Del análisis realizado se obtuvo que el promedio del THDI de los valores medios para la fase A (L1N), B (L2N), C (L3N) y para el neutro (LNG) es de 44,61%, 65,24%, 55,27% y 231,94%, respectivamente, que sobrepasan el 15% propuesto por el estándar IEEE 519-2014. Esto pone en evidencia la presencia de armónicos de corriente en las fases y el neutro.

Al evaluar los datos obtenidos del THDI individual de cada fase se determinó que no se cumple con el estándar IEEE 519-2014 establecido, debido a que existe la presencia de armónicos en la fase C que llegan al orden 13. En la fase A y B los armónicos alcanzan al orden 11, siendo la fase B la que mayor porcentaje de THDI Individual presenta con valores de 46,22%, 34,52%, 22,15%, 15,26% y 9,14% para armónicos de orden 3, 5, 7, 9 y 11, respectivamente.

Respecto al factor de potencia, se determinó que los valores medios que sobrepasan el 0,92p.u. representan a nivel total el 66,96% y para las fases A, B y C el 57,53%, 74,60% y 54,76%,



respectivamente. De esto se concluye que al ser valores mayores al 5% establecido en la regulación de la ARCONEL 004/18, existe un bajo factor de potencia.

De las pruebas realizadas se determinó que la evaluación a los niveles de voltaje, frecuencia, desequilibrio de voltaje, flicker de P_{st} y la distorsión armónica de voltaje total e individual cumplen con las normativas establecidas por la ARCONEL 005/18, EN50160, IEC 61000-4-15, IEEE 519-2014 respectivamente. Se observó la ausencia de datos relacionados con caídas y subidas de voltaje (Sag y Swell), interrupciones y transitorios.

Cabe indicar que la propuesta de solución a los problemas detectados representa apenas el 1,44% de la inversión realizada en la adquisición de los equipos presentes en el laboratorio, lo que se concluye que la aplicación de la propuesta es de bajo costo.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda planificar y realizar evaluaciones de la calidad de energía eléctrica específicamente en áreas donde se encuentren instalados equipos sensibles, para evidenciar problemas y dar soluciones a tiempo, previniendo daños o pérdidas irreparables de los mismos.

En todo proyecto de construcción se recomienda incorporar un estudio que contemple los tipos de cargas especiales, fijas y variables a las que se someterán las instalaciones eléctricas, acatando rígidamente las normativas nacionales e internacionales vigentes relacionadas con el tema. Esto tiene la finalidad de evitar problemas en el suministro eléctrico y la incorporación de soluciones parches que generen pérdidas y que afecten al funcionamiento de los equipos.

Se recomienda que a medida que se incorpore nuevas cargas o se modifique las instalaciones eléctricas de una infraestructura, se generen planos AS_BUILT. Con la finalidad de disponer un histórico de las modificaciones realizadas como una herramienta de apoyo para la identificación de posibles problemas que se presenten en la parte eléctrica.

Se recomienda realizar proyectos de investigación con grupos interdisciplinarios que permitan desarrollar equipos de bajo costo que trabajen bajo la regulación ecuatoriana de la ARCONEL 005/18 y con normativas internacionales no contempladas en esta regulación, que tengan la capacidad de supervisar y corregir en tiempo real la calidad de energía eléctrica. Esto permitirá informar, registrar y consultar en bases de datos históricas con acceso a internet las anomalías identificadas y las correcciones realizadas.

Se recomienda incorporar a la regulación de la ARCONEL 005/18 normativas sobre los parámetros que involucran la calidad de energía eléctrica y que actualmente no contemplan, específicamente a lo referente a transitorios y frecuencia. Esto permitirá fortalecer la normativa sobre la calidad de energía eléctrica necesaria en el país.

Se recomienda hacer un estudio de normativas internacionales referentes al sector eléctrico con la finalidad de definir ventajas y desventajas que presentan cada una de ellas y compararlas con



las existentes en nuestro país. Esto permitirá estructurar estándares acordes a nuestra realidad que aún no se encuentran regulados.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Bernal, «www.timetoast.com,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-la-calidad-de-la-energia-electrica-88ebbf72-32a6-4344-9aa2-ce34cfa603b0>. [Último acceso: 2019].
- [2] W. E. COUNCIL, «worldenergy.org,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.worldenergy.org/ecuador-se-integra-al-consejo-mundial-de-la-energia/>. [Último acceso: 2019].
- [3] ARCONEL, «regulacionelectrica.gob.ec,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/el-consejo-mundial-de-energia-ubica-al-ecuador-entre-los-5-mejores-paises-en-seguridad-energetica-a-nivel-mundial/>.
- [4] W. E. COUNCIL, «worldenergy.org,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2018/10/World-Energy-Trilemma-Index-2018.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [5] UTE, «portal.ute.com.uy,» 21 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://portal.ute.com.uy/noticias/el-servicio-electrico-uruguayo-es-de-los-mas-confiables-de-la-region>. [Último acceso: 2019].
- [6] ARCONEL, «Regulación No. ARCONEL 005/18,» de *Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica.*, Quito, 2018, p. 38.
- [7] Nobreak, «Nobreak energía sin interrupciones,» 2007. [En línea]. Available: <http://nobreak.com.ec/>. [Último acceso: 2019].
- [8] «CEIN Centro Eléctrico Industrial,» 1988. [En línea]. Available: <http://cein.com.ec/>. [Último acceso: 2019].
- [9] I. C. Ltda, «www.imetel.com.ec,» S.F. [En línea]. Available: http://www.imetel.com.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=2. [Último acceso: 2019].
- [10] K. L. Hiler German y D. B. Lozada Ortiz, «Análisis de la calidad de energía eléctrica en la Industria Alimenticia Agrovanic S. A,» Guayaquil, 2018.
- [11] V. P. Guachamin Cheza y E. G. Naranjo Andrade, «Análisis y Estudio de la Calidad de Energía Eléctrica en la planta industrial de Quito Imprenta Mariscal,» Quito, 2011.
- [12] J. M. Gómez Orellana, «Análisis de calidad de energía eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca,» Cuenca, 2019.
- [13] J. M. Camaho Alban, «Estudio de Factibilidad para el mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en la planta industrial INDUCUERDAS,» Riobamba, 2015.
- [14] J. E. Calderón Yautibug y J. L. Guachi Guanín, «Análisis de la eficiencia energética en los sistemas eléctricos en laboratorios y talleres de mecánica de la ESPOCH,» Riobamba, 2014.
- [15] ARCONEL, «Codificación del Reglamento de Tarifas,» Quito, 2002.
- [16] ARCONEL, «Pliego tarifario para las Empresas Eléctricas - Servicio Público de Energía Eléctrica,» Quito, 2016.
- [17] IECOR, «iecor.com,» 2007-2016. [En línea]. Available: <https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>. [Último acceso: 2019].
- [18] C. F. d. Electricidad, «lapem.cfe.gob.mx,» 2009. [En línea]. Available: <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/c/L0000-70.pdf>. [Último acceso: 2019].



- [19] R. &. Schwarz, «rohde-schwarz.com,» s.f.. [En línea]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/lat/aplicaciones/medici-n-de-la-calidad-de-la-energ-a-en-instalaciones-el-ctricas-ficha-de-aplicacion_56279-469952.html?rusprivacypolicy=0. [Último acceso: 2019].
- [20] Midebien.com, «Midebien.com,» 2017. [En línea]. Available: <https://midebien.com/5-razones-para-realizar-un-analisis-de-calidad-de-energia/>. [Último acceso: 2019].
- [21] S. I. y. s. d. D. S.A, «sisdasa.com,» 2016. [En línea]. Available: <http://sisdasa.com/estudios-de-calidad-electrica.html>. [Último acceso: 2019].
- [22] V. Mercado Polo, J. B. Peña y L. Pacheco, «www.redalyc.org,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.redalyc.org/jatsRepo/5075/507555007009/html/index.html>. [Último acceso: 2019].
- [23] R. Poyato. [En línea]. Available: https://d1hbuu0ofon117.cloudfront.net/sites/www.voltimum.es/files/pdflibrary/presentacion_webinar_fluke_31102017.pdf. [Último acceso: 2019].
- [24] EnergyTel, «energytel.typepad.com,» 12 Julio 2013. [En línea]. Available: <https://energytel.typepad.com/energytel/2013/07/cargas-no-lineales-en-los-transformadores-de-distribuci%C3%B3n.html>. [Último acceso: 2019].
- [25] F. Piolet, «www.sectorelectricidad.com,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.sectorelectricidad.com/13810/armonicos-que-son-y-como-nos-afectan/>. [Último acceso: 2019].
- [26] F. Jacobo Garzón, C. Juárez Sosa y R. Rodríguez Nuñez, UNAM, México, D.F, 2008, p. 139.
- [27] FLUKE, «cedesa.com.mx,» 2011. [En línea]. Available: www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke_434II-435II_notas1.pdf. [Último acceso: 2019].
- [28] J. I. Sánchez López, «http://calidadenerguia.blogspot.com,» 2016. [En línea]. Available: <http://calidadenerguia.blogspot.com/2016/04/que-son-los-disturbios-electricos.html>. [Último acceso: 2019].
- [29] E. Canabal, «Gesternova Energía,» 29 Octubre 2013. [En línea]. Available: <https://gesternova.com/los-armonicos-causas-consecuencias-y-soluciones/>. [Último acceso: 2019].
- [30] J. Baptise y J. Fourier, Los Armonicos y la Calidad de la Energía Eléctrica, s.f, p. 12.
- [31] D. Eléctricos, «calidadenergetica2016.blogspot.com,» 2016. [En línea]. Available: <http://calidadenergetica2016.blogspot.com/2016/04/disturbios-electricos.html>. [Último acceso: 2019].
- [32] E. Haina, «egehaina.com,» 2016. [En línea]. Available: <http://egehaina.com/glosario/variaciones-de-frecuencia/>. [Último acceso: 2019].
- [33] M. A. Manzanares Araica y E. J. Torres Bermudez, «ESTUDIO DE PARAMETROS ELECTRICOS Y ARMONICOS DE LA RED ELECTRICA DE LA INDUSTRIA TEXTIL VALIDOS SA”,.» Managua, 2017.
- [34] I. d. E. E. y. E. S. d. C.V, «www.variacionesdevoltaje.com,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.variacionesdevoltaje.com/>. [Último acceso: 2019].
- [35] E. Téllez Ramírez, «AUTOMATIZACION, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD S.A. de C.V.,» [En línea]. Available: www.watergymex.org/contenidos/rtecnicos/.../Calidad%20de%20la%20Energia.pdf. [Último acceso: 2019].
- [36] VOLTIMUM, «voltimum.es,» 21 12 2004. [En línea]. Available: <https://www.voltimum.es/noticias-del-sector-electrico/analisis-calidad>. [Último acceso: 2019].
- [37] Powerqualityworld, «www.powerqualityworld.com,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.powerqualityworld.com/2011/05/impulsive-transients-power-system.html>. [Último acceso: 2019].



2019].

- [38] R. K. Jena, «ELECTRICAL POWER QUALITY,» Odisha - India, S.F.
- [39] powerqualityworld, «www.powerqualityworld.com,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.powerqualityworld.com/2011/05/oscillatory-transients-power-system.html>. [Último acceso: 2019].
- [40] E. Pérez Fernández, «Nuevo Método de Detección y Análisis en Tiempo Real de Eventos en la Tensión de Suministro de Energía Eléctrica Empleando un Modelo Combinado Wavelets-Filtro de Kalman Extendido,» Santander, 2006.
- [41] T. E. expertise, «www.tecsaqro.com.mx,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.tecsaqro.com.mx/blog/problemas-mas-comunes-en-las-instalaciones-electricas-industriales/>. [Último acceso: 2019].
- [42] J. J. Mora Flórez, «eia.udg.es,» 2003. [En línea]. Available: http://eia.udg.es/~secse/curso_calidad/curso4-huecosdetension.pdf.. [Último acceso: 2019].
- [43] A. M. Obado Acevedo, «IMPLEMENTACIÓN DE UN FLICKERMETER EN PSCAD™ PARA DETECTAR LAS POSIBLES CAUSAS DE PERTURBACIÓN,» PEREIRA, 2008.
- [44] D. Pozo, «www.linkedin.com,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-es-el-efecto-flicker-y-c%C3%B3mo-influye-en-nosotros-daniel-pozo>. [Último acceso: 2019].
- [45] J. J. Mora Flórez, «Fluctuaciones de Tensión y Flicker,» Girona, 2002.
- [46] Ingeniería Internacional, «ingenieriainternacional.wordpress.com,» s.f. [En línea]. Available: <https://ingenieriainternacional.wordpress.com/ingenieria-internacional-e-informatica-2/%C2%BFsabias-que/calidad-de-energia/>. [Último acceso: 2019].
- [47] D. A. Saucedo Martinez, J. L. Taxis Villagran y Z. C. Flores Carrera, México D.F, 2008, p. 182.
- [48] SectorElectricidad, «www.sectorelectricidad.com,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.sectorelectricidad.com/13810/armonicos-que-son-y-como-nos-afectan/>. [Último acceso: 2019].
- [49] IEEE, «IEEE STANDARDS ASSOCIATION,» 2014. [En línea]. Available: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=800727>. [Último acceso: 2019].
- [50] A. Katz, «www.seencogroup.com,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.seencogroup.com/distorsion-armonica-total-que-paso-con-mi-onda-perfecta/>. [Último acceso: 2019].
- [51] F. Fornieles, «fornieles.es,» 04 06 2017. [En línea]. Available: <https://fornieles.es/perturbaciones-electricas/origen-armonicos-electricos/>. [Último acceso: 2019].
- [52] F. Fornieles, «fornieles.es,» 2017. [En línea]. Available: <https://fornieles.es/perturbaciones-electricas/secuencia-armonicos-electricos/>. [Último acceso: 2019].
- [53] E. Téllez Ramírez, «AUTOMATIZACION, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD S.A. de C.V.,» S.F. [En línea]. Available: <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf..> [Último acceso: 2019].
- [54] P. Concha, «patricioconcha.ubb.c,» s.f. [En línea]. Available: <http://patricioconcha.ubb.cl/410113/accionamientos/limites.htm>. [Último acceso: 2019].
- [55] V. Huerta Sánchez, «www.afinidadelectrica.com,» s.f. [En línea]. Available: <http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=165>. [Último acceso: 2019].



- [56] electricaplicada, «www.electricaplicada.com,» S.F. [En línea]. Available: <https://www.electricaplicada.com/efectos-de-los-armonicos/>. [Último acceso: 2019].
- [57] J. A. García Álvarez, «[asifunciona.com](http://www.asifunciona.com),» 2015. [En línea]. Available: http://www.asifunciona.com/respuestas/respuesta_2/respuestas_2.htm. [Último acceso: 2019].
- [58] A. B. Zbigniew Hanzelka, «Guía de calidad de la Energía Eléctrica - Armónicos Interarmónicos,» European Copper Institute, España, 2004.
- [59] G. Rubio, «www.slideshare.net,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/gomezrubio/curso-pq-capitulo2>. [Último acceso: 2019].
- [60] L. Morán y M. Torres, «[sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com),» 2018. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/voltage-unbalance>. [Último acceso: 2019].
- [61] P. Ogunboyo Taiwo, R. Tiako y D. Innocent E. , «www.researchgate.net,» 2017. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/321229156_Investigation_of_Voltage_Unbalance_in_Low_Voltage_Electric_Power_Distribution_Network_under_Steady_State_Mode. [Último acceso: 2019].
- [62] powerqualityworld, «[powerqualityworld.com](http://www.powerqualityworld.com),» 2011. [En línea]. Available: <http://www.powerqualityworld.com/2011/06/voltage-unbalance-power-quality-basics.html>. [Último acceso: 2019].
- [63] P. Mexico, «www.pilz.com,» S.F. [En línea]. Available: <https://www.pilz.com/es-MX/knowhow/law-standards-norms/standards/iso-iec-standards>. [Último acceso: 2019].
- [64] M. Holguin y D. Gomez Coello, ANALISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL "NUEVO CAMPUS" DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA, Guayaquil, 2010, p. 275.
- [65] «IEEE Xplore,» [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459>. [Último acceso: 2019].
- [66] C. D. Association, «copperalliance.org.uk,» 2005. [En línea]. Available: <http://copperalliance.org.uk/uploads/2018/03/523-flicker-measurement.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [67] Newtons 4th Ltd, «www.newtons4th.com,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.newtons4th.com/electromagnetic-compatibility-iec61000-3-32013-flicker-analysis/>. [Último acceso: 2019].
- [68] 3. G. A. d. l. Energía, «www.3seficiencia.com,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.3seficiencia.com/servicios-energeticos/calidad-de-suministro-electrico-une-en-50160>. [Último acceso: 2019].
- [69] ARCONEL, «REGULACIÓN No. ARCONEL-004/018,» de *Distribución y Comercialización de energía eléctrica*, Quito, 2018, p. 46.
- [70] E. S.A, 2017. [En línea]. Available: <https://www.eproteca.com/la-importancia-la-medicion-la-calidad-energia-la-red-distribucion-electrica/>.
- [71] P. I. S.L., «pce-iberica.es,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/metros/categorias-sobretension-info.htm>. [Último acceso: 2019].
- [72] P. Zuñiga, «instalacioneselctricasresidenciales.blogspot.com,» 2010. [En línea]. Available: <https://instalacioneselctricasresidenciales.blogspot.com/2015/11/4-categorias-de-los-instrumentos-de.html>. [Último acceso: 2019].
- [73] F. T. SA., «finaltest.com.mx,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.finaltest.com.mx/category-s/110.htm>.



[Último acceso: 2019].

- [74] L. N. E. T. S.A., «lanotaenergetica.com,» 3 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://lanotaenergetica.com/tag/fluke/>. [Último acceso: 2019].
- [75] F. CORPORATION, «fluke.com,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-es/productos/comprobacion-electrica/analizadores-de-calidad-electrica>. [Último acceso: 2019].
- [76] C. E. D. T. S. E.S.P., 2018. [En línea]. Available: <http://www.enertolima.com/index.php/clientes/norma-tecnica-enertolima/norma-tecnica-enertolima#capitulo-5-calidad-de-la-potencia-el%C3%A9ctrica>. [Último acceso: 2019].
- [77] FLUKE, «www.distron.es,» S.F. [En línea]. Available: <http://www.distron.es/pdf/cat/fluke/11-calidad-de-la-energia-el%C3%A9ctrica/D-13365-spa.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [78] FLUKE, «assets.fluke.com,» 2008. [En línea]. Available: http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umeng0300.pdf. [Último acceso: 2019].
- [79] M. T. S. Company, «marcapl.com,» 2018. [En línea]. Available: <https://marcapl.com/blog/2018/05/riesgo-electrico-y-normativas/>. [Último acceso: 2019].
- [80] A. T. SL, «www.treballo.com,» s.f. [En línea]. Available: http://www.treballo.com/catalogo/proteccion_epis/normativas_epis/normativas_epis_cabeza.asp. [Último acceso: 2019].
- [81] A. P. d. E. d. I. E. y. T. d. Madrid., «apiem.org,» 2016. [En línea]. Available: <http://apiem.org/noticias/item/1679-gu%C3%ADa-sobre-equipos-de-protecci%C3%B3n-individual-en-trabajos-el%C3%A9ctricos-en-baja-tensi%C3%B3n>. [Último acceso: 2019].
- [82] U. d. Cantabria, «personales.gestion.unican.es,» 1997. [En línea]. Available: https://personales.gestion.unican.es/martinji/Archivos/EProtIndividual.pdf?fbclid=IwAR2byPtFR2gYliOAVpMWxZHKQe_7aBhi1FBpXB35JJysFFHAP6aQFOWn6WU. [Último acceso: 2019].
- [83] Logicbus, «www.logicbus.com.mx,» S.F. [En línea]. Available: <https://www.logicbus.com.mx/que-es-la-industria-4-0.php>. [Último acceso: 2019].
- [84] DELLOITTE, «www2.deloitte.com,» s.f. [En línea]. Available: <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/manufacturing/articles/que-es-la-industria-4.0.html>. [Último acceso: 2019].
- [85] M. d. D. U. y. Vivienda, «www.habitatyvivienda.gob.ec,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/NEC-SB-IE-Final.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [86] C. Eficiencia, «corporativoeficiencia.com,» 2018. [En línea]. Available: <http://corporativoeficiencia.com/beneficios-de-realizar-un-analisis-de-calidad-de-energia/>. [Último acceso: 2019].
- [87] F. 1, «www.fluke.com,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/electrica/diagnostico-de-problemas-de-energia-electrica-en-el-receptaculo>. [Último acceso: 2019].
- [88] Programa casa segura, «programacasasegura.org,» s.f. [En línea]. Available: <http://programacasasegura.org/pe/2014/03/25/conoce-el-uso-correcto-y-riesgos-de-las-extensiones-electricas/>. [Último acceso: 2019].



- [89] bombay electronics, «www.bombayelectronics.com,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.bombayelectronics.com/products/litefuze-lt-5000-5000-watt-heavy-duty-voltage-converter-transformer>. [Último acceso: 2019].
- [90] Amazon, «www.amazon.com,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/LiteFuze-LT-3000-Voltage-Converter-Transformer/dp/B008GQTW7W>. [Último acceso: 2019].
- [91] E. Reyes Trujillo, J. J. Rodríguez Rivas y J. Robles García, «[scielo.org.mx](http://www.scielo.org.mx),» 2010. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432010000400003. [Último acceso: 2019].
- [92] CIRCUTOR, «circutor.es,» 2015. [En línea]. Available: <http://circutor.es/es/formacion/armonicoselectricos/filtros-activos-la-calidad-de-red-mas-versatil>. [Último acceso: 2019].
- [93] L. M, «www.crit.upc.edu,» 2006. [En línea]. Available: http://www.crit.upc.edu/JCEE2006/pdf_ponencias/PDFs/JCEE06_09_11_T1.pdf. [Último acceso: 2019].
- [94] CIRCUTOR, «circutor.es,» s.f. [En línea]. Available: <http://circutor.es/es/formacion/armonicoselectricos/como-dimensionar-un-filtro-activo>. [Último acceso: 2019].
- [95] CIRCUTOR SA, «www.circutor.es,» s.f. [En línea]. Available: <http://docs.circutor.com/docs/M98241701-01.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [96] A. Alzate Gómez, D. Murillo Yarce y R. L. Silva Cárdenas, «www.scielo.org.co,» 2016. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2016000400007. [Último acceso: 2019].
- [97] CIRCUTOR, «circutor.es,» s.f. [En línea]. Available: http://circutor.es/docs/FT_AFQm30_60_100_ES.pdf. [Último acceso: 2019].
- [98] LIFASA, «lifasa.com,» 2019. [En línea]. Available: https://lifasa.com/pdf/SINAFM_ACTIVEFILTER.pdf. [Último acceso: 2019].

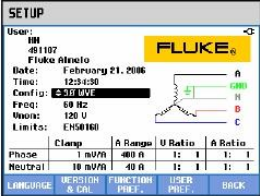


ANEXOS

ANEXO 1: Esquemas de conexión del equipo según a la configuración del transformador

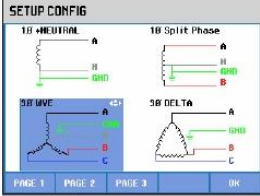
Below you will find a step-by-step example on how to change wiring configuration to 3-phase Wye IT (IT = Interrupted Terra = Interrupted Ground).

① **SETUP** →



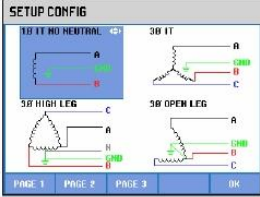
The active configuration is indicated behind Config. Config is highlighted indicating that this item can be adjusted when you press the ENTER key. The belonging configuration symbol is shown on the right side of the screen.

② **ENTER** →




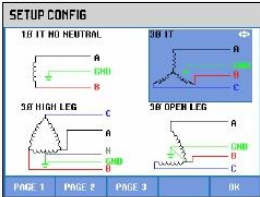
The screen shows 4 wiring configurations; 3-phase Wye IT configuration is not among them. Press F2 to access a second screen with 4 other configurations.

③ **F2** →



The second screen incorporates 3-phase Wye IT (3φ IT) configuration.

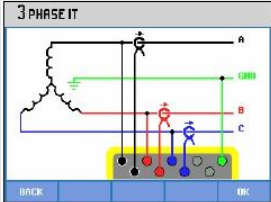
④  →



Use the arrow keys to highlight 3φ IT. Press F5 to confirm the selection.

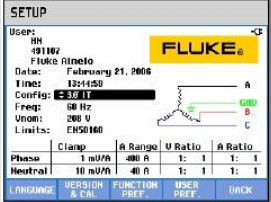
Fluke 434/435
Users Manual

⑤ **F5** →



An information screen shows up that informs you on how to connect the Analyzer to the power system under test. When done press F5.

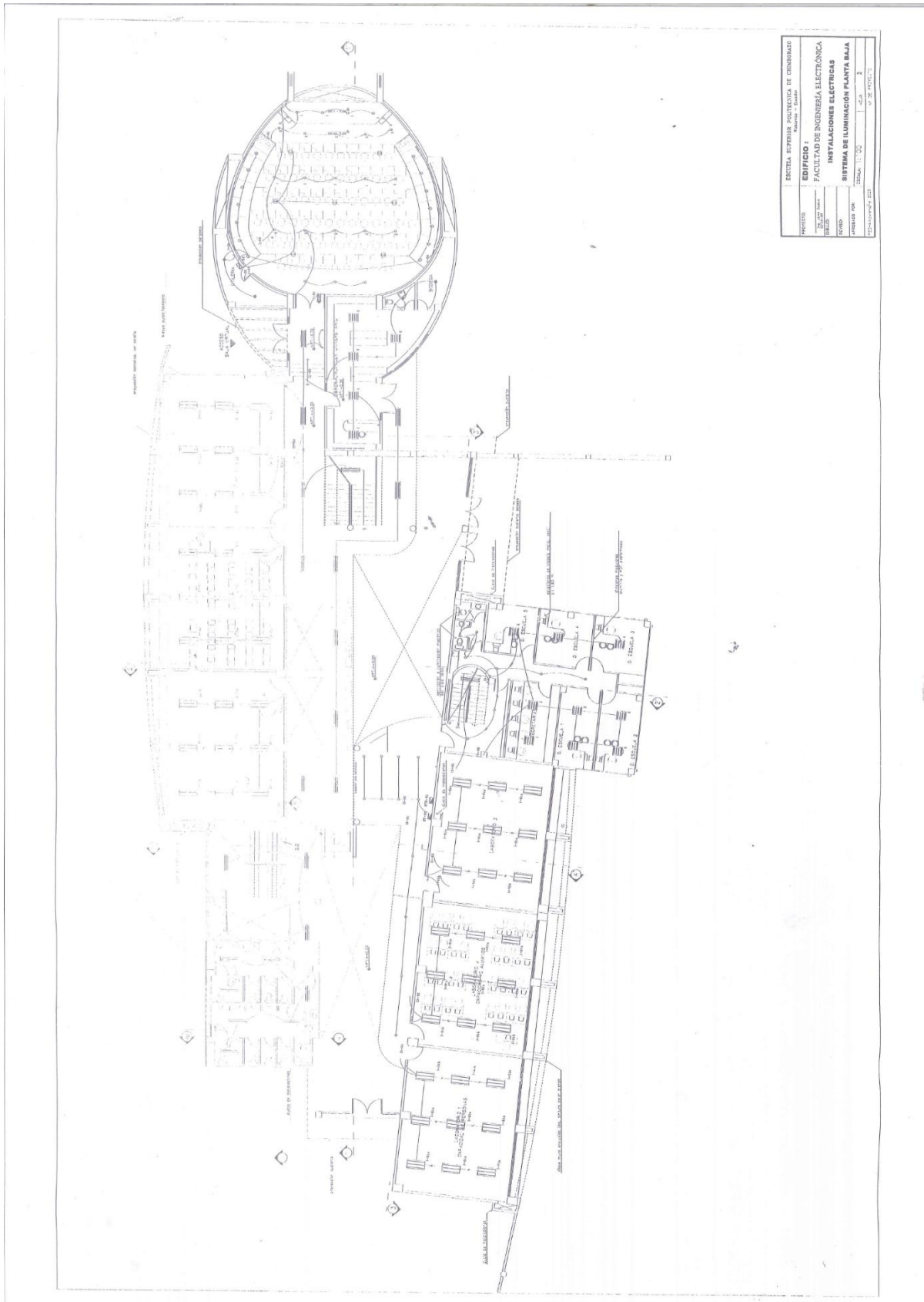
⑥ **F5** →



Return to Setup entry screen. The new configuration is indicated behind Config, and the belonging configuration symbol is shown on the right side of the screen.

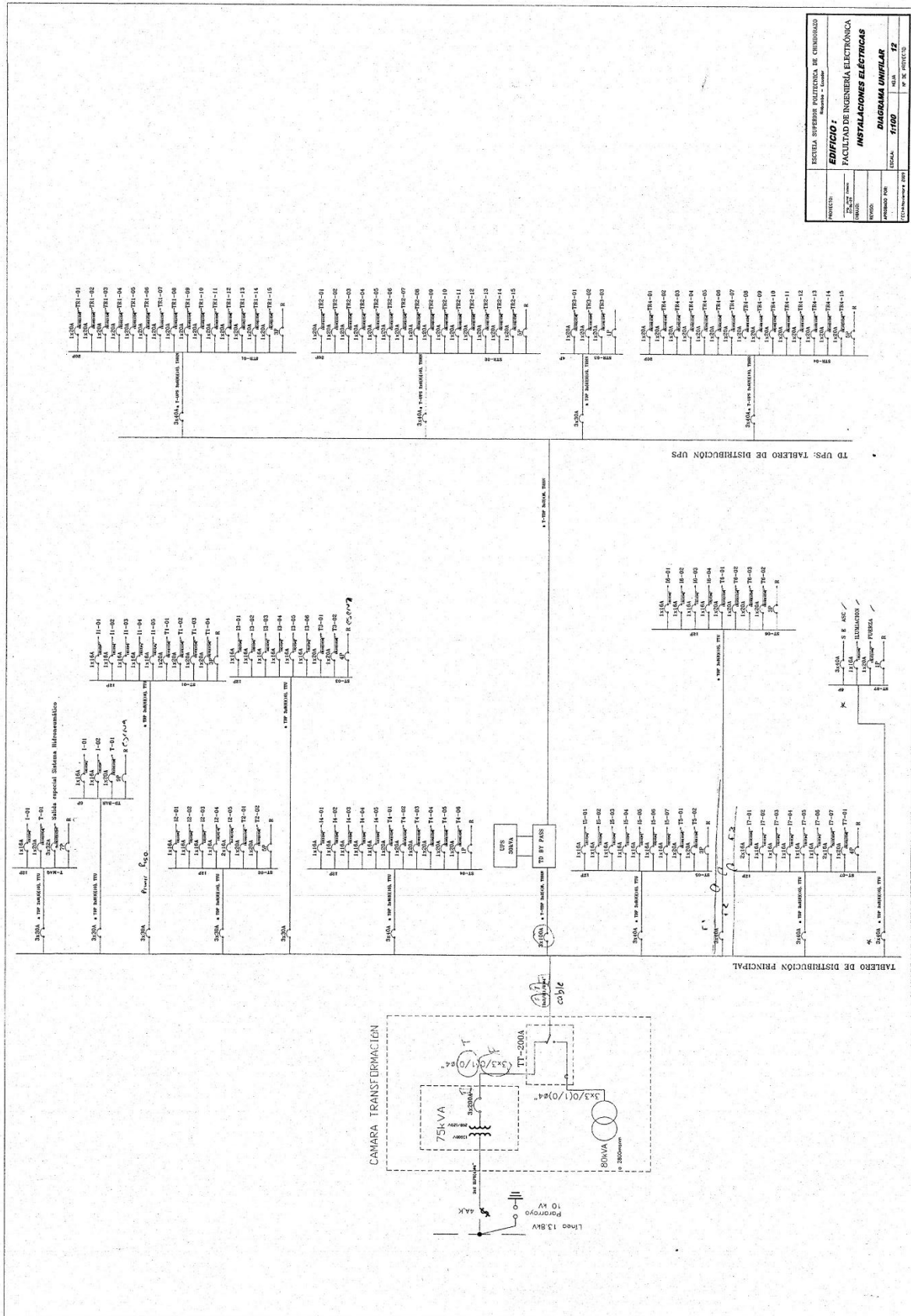


ANEXO 2: Plano de la planta baja de la Facultad de Informática y Electrónica.





ANEXO 3: Diagrama unifilar de la Facultad de Informática y Electrónica.



PROYECTO:	ECUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FECHA:	2012
EDIFICIO:	FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INSTALACIONES:	INSTALACIONES ELÉCTRICAS
DIAGRAMA UNIFILAR:	DIAGRAMA UNIFILAR
ESCALA:	1:100
HOJA:	12
DE:	R. R. PÉREZ

ANEXO 4: Datos proporcionados por el fabricante del cable #4 AWG para el tablero principal del edificio.

Cable de Baja Tensión, Monoconductor RHW-2 SR CT, Cobre, 600 V, XLPE, 90°C

Información técnica.

Cable RHW-2 SR CT

Calibre	Unidad	Área nominal	Resistencia Eléctrica	Cableado tipo B	Espesor de aislamiento de XLPE	Diámetro exterior aprox. Nom	Peso total aprox.
		mm ²	Máx. @ 20°C (Ohm/Km) C.D.	# de hilos	mm	mm	kg/km
8	AWG	8.37	2.1420	7	1.52	6.7	100
6	AWG	13.3	1.3464	7	1.52	7.6	150
4	AWG	21.2	0.8486	7	1.52	8.8	228
2	AWG	33.6	0.5335	7	1.52	10.2	350
1	AWG	42.4	0.4233	19	2.03	12.0	448
1/0	AWG	53.5	0.3356	19	2.03	13.0	556
2/0	AWG	67.4	0.2662	19	2.03	14.1	690
3/0	AWG	85	0.2111	19	2.03	15.3	859
4/0	AWG	107	0.1670	19	2.29	17.2	1084
250	kcmil	127	0.1418	37	2.41	19.0	1279
300	kcmil	152	0.1183	37	2.41	20.3	1520
350	kcmil	177	0.1012	37	2.41	22.6	1794
400	kcmil	203	0.0885	37	2.41	22.7	2003
500	kcmil	253	0.0708	37	2.41	24.8	2483

Nota: Las dimensiones y pesos están sujetos a tolerancias de manufactura. Basada en la tabla 310-16 de la NOM-001-SEDE para una temperatura ambiente de 30°C. Para más información de certificación, favor de contactar al departamento de ventas.

ANEXO 5: Transformador LiteFuze LT-5000 de 5000 W de 120V a 220V.

LiteFuze LT-5000 | 5000 Watt Voltage Converter Transformer

https://www.bombayelectronics.com/products/litefuze-lt-5000-5000-watt...LiteFuze LT-5000 | 5000 Watt Voltage Converter Transformer

https://www.bombayelectronics.com/products/litefuze-lt-5000-5000-watt...

Home (7) > LiteFuze LT-5000 5000 Watt Heavy Duty Voltage Converter Transformer

★ REVIEWS

PRODUCT CODE: VT-5000-01

LiteFuze LT-5000 5000 Watt Heavy Duty Voltage Converter Transformer

\$202.74 ★★★★★ 7 reviews
3 answered question

In Stock: Usually Ships in 24 Hours

- Max Capacity: 5000 Watts, Efficiency Factor: 1.5
- Power Switch w/ LED Indicator, Multiple Sockets
- Step Up/Down Functionality, Circuit Breaker Protection
- Weight: 29.25lbs
- Size: 8.75" x 6.75" x 12.00"

Quantity:

ADD TO CART

REQUEST A QUOTE

FREE SHIPPING WITHIN *USA ON ORDERS \$50 & MORE (/pages /shipping)

Choose your options: >

Optional Plug Adapters:

Add to Wishlist: ♥

Share on: [f](#) [t](#) [p](#) [G+](#) [e](#)

Description	Specifications	Package Contents & Warranty	Reviews
-------------	----------------	-----------------------------	---------

★ REVIEWS

LiteFuze LT-5000 Voltage Transformer <http://www.litefuze.com/bombay-authorized.html>

The LiteFuze LT-5000 is a heavy duty voltage transformer designed for continuous use. With up to 5000 watt capacity, this unit functions as both step up (110/120-volt to 220/230/240-volt) and step down (converts EUROPEAN 220/230/240-volt to AMERICAN 110/120-volt) voltage transformer. Made from high resistance copper coil, the international voltage converter is durable and reliable. Multiple output sockets enable use of multiple items at one time and the dynamic casing design offers ventilation to the 5000 watt voltage converter. This LiteFuze LT 5000 converter is fully grounded and comes with circuit breaker protection for safer operation. The Shuko plug adapter makes this 5000 watt voltage converter compatible for use in Asia, Africa, and also in Middle East Countries.

This comparison article shows why the LiteFuze LT-5000 is the best 5000W voltage transformer (<http://blog.bombayelectronics.com/2011/02/why-litefuze-lt-5000-is-best-5000-w.html>) in the market.

Key Features:

- Up to 5000 Watt continuous use capacity
- Step Up/Down Functionality:
 - Step Down: Converts Single Phase 220/230/240-volt Electricity to 110/120-volt
 - Step Up: Converts 110/120-volt Electricity to Single Phase 220/230/240-volt
- *Efficiency Factor: 1.5
- 6 Output Sockets
- 4 for 220-240V products
- 2 for 110-120V products
- US Patented Universal Output Socket
- Shuko Socket - Grounds German/French plugs
- Smart circuitry and high resistance copper coil ensures durability
- Dynamic casing design offers ventilation to the transformer
- Fully Grounded Transformer from Input to Output for safe operation

1 de 5

12/11/2019 22:32 de 5

LiteFuze LT-5000 | 5000 Watt Voltage Converter Transformer

https://www.bombayelectronics.com/products/litefuze-lt-5000-5000-watt...

12/11/2019 22:35

- CE Certified
 - Circuit Breaker Protection - No need to replace fuses on overload!
 - Heavy Duty Industrial 56" Long Power Cord
 - Free Euro Plug Adapter
 - Weight: 29.25lbs
 - Unit Dimensions: 8.75" x 6.75" x 12.00"
- *Efficiency Factor Use this factor to calculate the correct wattage transformer needed for your items. Multiply the WATT rating on your product with this factor and purchase transformer of at least that size. Example: If your blender requires 350W, then multiply 350 x 1.5 (efficiency factor of LiteFuze LT) = 525W. Thus, LiteFuze LT-750 is recommended for this particular blender. To use multiple products, simply add watt rating of each product and multiply the combined watt rating with the efficiency factor. Always purchase a larger size transformer than your appliances required wattage to handle any power surges during operation. Feel free to contact or call us if you have any questions. Read our voltage converter guide or tips and hints when using voltage converters. Warning: These transformers are not designed to be used with high heat producing items such as Coffee Makers, Heaters, Rice Cookers, etc.. Please call us if you have any questions before purchasing.

★ REVIEWS

Related Products

/collections/all-product-excluding-blu-ray-players/products/zaq-allay-litemist-air-aromatherapy-essential-oil-diffuser)

AROMA DIFFUSERS

ZAQ Allay LiteMist Air Aromatherapy Essential Oil Di... /Collections/all-
★★★★★ 16 reviews

/collections/all-product-excluding-blu-ray-players/products/elc-t-1500-1500-watt-voltage-converter-transformer-w-circuit-breaker-protection)

ELC VOLTAGE TRANSFORMER

ELC T-1500 1500-Watt Voltage Converter Transformer W...
★★★★★ 3 reviews

3 de 5

12/11/2019 22:35

ANEXO 6: Ficha técnica del filtro activo multifunción modelo AFQm-4WF-030M-400 de CIRCUTOR.

R *Filtros de Armónicos*

AFQm
30 / 60 /100

Filtro Activo con tecnología multinivel

Descripción

Los filtros activos con tecnología multinivel AFQm de instalación en pared, constituyen la solución más completa para resolver los problemas de calidad causados, tanto en instalaciones trifásicas industriales como comerciales o de servicios, no únicamente por los armónicos, sino también por el consumo de potencia reactiva. Las características y funciones implementadas son las siguientes:

- Capacidad unitaria de filtrado para corrientes de 30 A, 60 A y 100 A.
- Pequeño armario que se instala en pared. Facilidad en instalación por dimensiones.
- Barra para instalaciones de 3 hilos (modelo 3W) o 4 hilos (modelo 4W).
- Multirango de tensión y frecuencia (50/60 Hz).
- Reducción de las corrientes armónicas hasta el orden de 50º armónico.
- Frecuencias armónicas a filtrar seleccionables para lograr la máxima eficacia del filtro.
- Compensación de potencia reactiva (inductiva/capacitiva).
- Equilibrado de las corrientes de fase, mejores de consumo en el neutro (modelo 4W).



AFQm 30



AFQm 60



AFQm 100

Aplicaciones

Solución ideal para instalaciones, con gran cantidad de cargas monofásicas y trifásicas que sean generadoras de armónicos tales como ordenadores, SAL, luminarias, aparatos elevadores, aires acondicionados con variador, etc.

También para instalaciones que requieren una buena calidad de suministro con vistas a aumentar la eficiencia de la producción o a mejorar la continuidad de suministro del sistema.

Características técnicas

Características eléctricas	Tensión nominal	4 Hilo (3W) / 3W / 2W - 400V fase-fase +/- 10%		
		3 Hilo (3W) / 3W - 230V fase-fase +/- 10%	400V fase-fase +/- 10%	400V fase-fase +/- 10%
	Frecuencia	50/60Hz +/- 5%		
	THD V máximo	25%		
Potencia	Modelos	30 A	60 A	100 A
	Potencia 4W (400V)	20700 VA	41100 VA	68000 VA
	Potencia máxima 3W (400V)	22900 VA	45812 VA	76300 VA
	Eficiencia media	>97,2%	>97,2%	>97,2%
	Corriente máxima (fase)	30 A(rms)	60 A(rms)	100 A(rms)
Prestaciones	Corriente máxima (neutro) solo 4W	90 A(rms)	180 A(rms)	300 A(rms)
	Filtrado	Filtrado 2º al 50º armónico, seleccionables		
	Equilibrado de fases	Selecciónable		
	Compensación de la energía reactiva	Selecciónable, objetivo 0,7 inductivo, 0,7 capacitivo		
	Programación prioridades	Prioridad de filtrado, equilibrado / Compensación de energía reactiva seleccionable		

1

Circuitur

Filtros de Armónicos

R

AFQm
30 / 60 /100

Filtro Activo con tecnología multinivel

Prestaciones	Modelos	30 A	60 A	100 A
Instalación en paralelo		Hasta 100 dispositivos/modulos		
		Conexión de TIC en regala montada		
Nivel de ruido		<32 dBA	<34 dBA	<30 dBA
		Sensor web y debugger		
Interfaz usuario		Pantalla touch 3.5" color		
RS-485		Modbus RTU, Modbus TCP, I²C, 1-Wire		
Ethernet		TCP/IP, Modbus TCP		
Instalación	Categoría de la instalación	CVC II (300 V)		
	Grado de protección	2		
	Temperatura de trabajo	-10...+45°C		
	Temperatura almacenamiento	-30...+85°C		
	Humedad relativa	0...95% (sin condensación)		
	Altitud máxima	3000 m (5000 m sin reducción de capacidad)		
Grado protección		IP20 (u otros grados de protección previa solicitud)		
Red		30 A	60 A	100 A
	Borne Anillo M8	Borne anillo M8	Borne anillo M8	Borne anillo M8
	Anchura máxima anillo 12 mm	Anchura máxima anillo 12 mm	Anchura máxima anillo 23 mm	Anchura máxima anillo 23 mm
CTS				
	Par apriete	Par apriete 2,2-2,4 Nm	Par apriete 2,2-2,4 Nm	Par apriete 2,2-2,4 Nm
	Conductor 4 polos	Conductor máximo 2,5 mm²	Conductor máximo 2,5 mm²	Conductor máximo 2,5 mm²
RS-485				
	Conductor 3 polos	Conductor máximo 2,5 mm²	Conductor máximo 2,5 mm²	Conductor máximo 2,5 mm²
Ethernet		RJ45		
Normas		IEC 62477-1:2012, IEC 50011:2011, IEC 61000-6-2, IEC 61000-4-4:2007, IEC 61439-1:2011		

2

Circuitur

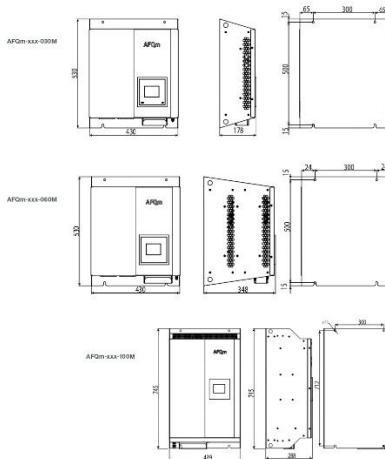
R *Filtros de Armónicos*

AFQm
30 / 60 /100

Filtro Activo con tecnología multinivel

Dimensiones

Tipo	Dimensiones (Ancho x Alto x Fondo)	Peso (kg)
AFQm-3WF-030M-400	430 x 530 x 170 mm	21
AFQm-3WF-060M-400	430 x 530 x 348 mm	39
AFQm-3WF-100M-400	430 x 745 x 288 mm	56
AFQm-4WF-030M-400	430 x 530 x 178 mm	21
AFQm-4WF-060M-400	430 x 530 x 348 mm	39
AFQm-4WF-100M-400	430 x 745 x 288 mm	56



3

Circuitur

Filtros de Armónicos

R

AFQm
30 / 60 /100

Filtro Activo con tecnología multinivel

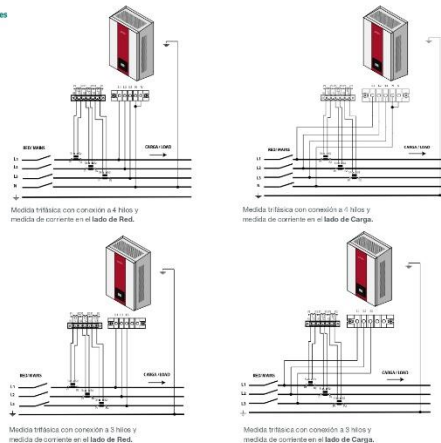
Referencias

Filtros activos montaje en pared (tipo mural) para 3 hilos (3W) y 4 hilos (4W)

Corriente de fase	Corriente de neutro	Sistema	Tipo	Código
30 A	-	-	AFQm-3WF-030M-400	RTRMMOF
60 A	-	3 hilos, 230V - 400 V	AFQm-3WF-060M-400	RTRMM1F
100 A	-	3 hilos, 230V - 400 V	AFQm-3WF-100M-400	RTRMM2F
30 A	60 A	-	AFQm-4WF-030M-400	RTRMMOF
60 A	180 A	4 hilos, 230V - 400 V	AFQm-4WF-060M-400	RTRMM1F
100 A	300 A	4 hilos, 230V - 400 V	AFQm-4WF-100M-400	RTRMM2F

Todos los filtros activos disponen de filtro EMI incorporado

Conexiones



4

Circuitur



ANEXO 8: Documentación de respaldo del proceso desarrollado en la investigación.



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRONICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES
CARRERA: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Extensión 2607 email: fie@esPOCH.edu.ec



CERTIFICADO

El suscrito Director de la Escuela de Control y Redes Industriales, de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH, se permite informar que:

El proceso de desarrollo del trabajo de titulación denominado **“Evaluación de la calidad de energía eléctrica del Laboratorio de Automatización de la Facultad de Informática y Electrónica - ESPOCH”**, ha concluido satisfactoriamente el estudiante Joseph David Guerra Chávez, el que se encuentra en las instalaciones de la facultad de informática y electrónica por un tiempo aproximado de 5 meses, haciendo un exhaustivo estudio de la calidad de energía eléctrica para el laboratorio de automatización donde funciona la industria 4.0 y el tablero principal de la facultad. Entregando un informe detallado con los problemas presentados y sus soluciones. Agradecemos la valiosa gestión desarrollada en la parte investigativa para la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Como evidencia del trabajo realizado desde el 27 de mayo del presente año hasta la fecha, entrego un informe en el que detalla la calidad de energía eléctrica presente en el laboratorio de automatización de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH, conjuntamente con las soluciones y recomendaciones que deberían ser consideradas para su mejora, estas recomendaciones nos permitirá precautelar la integridad de las personas que utilizan el laboratorio, garantizar el funcionamiento de los equipos y evitar sus pérdidas.

Cabe indicar que el estudio realizado y el análisis técnico de la información obtenida se basó en las regulaciones nacionales vigentes: No. ARCONEL 004/18 y 005/18, establecidas por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) y la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) referente a las instalaciones eléctricas. Se consideró también las normas y estándares internacionales como la IEEE 519, IEEE 1159, IEC 61000-4-15 y la EN50160 referentes a calidad de energía. Para garantizar la confiabilidad de los datos requeridos para el análisis, la selección del equipo de medición se basó en la normativa IEC 61000-4-30.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Ing. Freddy Chávez V.

DIRECTOR DE LA ESC.ING. CONTROL Y REDES INDUSTRIALES



CARTA COMPROMISO PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

En Cuenca, a los 26 días del mes de Junio de 2019, la Universidad de Cuenca a través de la Facultad de Ingeniería representada por el Señor Decano Ing. Ángel Pino Velázquez, y la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo representada por el Director de Escuela el Ing. Freddy Chávez Vásquez, acuerdan que el Estudiante de la Carrera de INGENIERIA ELÉCTRICA de la FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA, Sr. Joseph David Guerra Chávez con cedula de ciudadanía N° 060423915-2, realicen el desarrollo de su trabajo de titulación para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico bajo las siguientes condiciones:


PRIMERA: OBJETO: Las partes aunarán esfuerzos para permitir el desarrollo del Trabajo de Titulación, del Estudiante Joseph David Guerra Chávez, identificado con la cedula de ciudadanía numero N° 060423915-2 de la Carrera de INGENIERÍA ELÉCTRICA de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, el Área donde se realizará el trabajo de titulación corresponde al desarrollo práctico cuyo tema del Trabajo de Titulación es **“Evaluación de la calidad de energía eléctrica del laboratorio de automatización de la facultad de Informática y Electrónica - ESPOCH”**

SEGUNDA: ALCANCE: El presente trabajo busca realizar la evaluación de la calidad de energía eléctrica que recibe el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), de la ciudad de Riobamba. Considerando que, en sus instalaciones, desde su construcción, no se han realizado estudios afines al tema y que en la actualidad se ubicaron en sus instalaciones equipos de laboratorio relacionado a la industria 4.0, robots colaborativos, sistemas de simulación, automatización e internet entre otros. Se constituye en un laboratorio de muy alto costo, el primero en sur américa y es fundamental en el proceso de enseñanza aprendizaje para la facultad, por lo que se requiere ser protegidos ante eventualidades, entre estas las causadas por alteraciones en la calidad de energía eléctrica. Para Lo cual se plantea recopilar información de la calidad de energía eléctrica suministrada en el laboratorio por medio de un analizador de energía. La que luego será evaluada en base a las normativas vigentes con la finalidad de identificar posibles perturbaciones y los factores que las causan, información necesaria para presentar una propuesta que ayuda a mejorar la calidad del suministro eléctrico en el laboratorio.

Ambas partes consienten en acordar que, sin perjuicio de lo establecido en la presente cláusula para el cumplimiento de las obligaciones de las partes, Estudiantes- Universidad - Entidad, se registrarán por las clausulas establecidas en el presente documento.

TERCERA: La presente carta-compromiso se firma en 3 ejemplares, declarando las partes haber recibido, un ejemplar de este documento.

QUINTA: PERFECCIONAMIENTO: El presente instrumento se perfeccionará con la firma de las partes que en el intervienen.


Ing. Ángel Pino Velázquez
DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA


Ing. Freddy Chávez Vásquez.
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN
CONTROL Y REDES INDUSTRIALES


Sr. Joseph David Guerra Chávez
ESTUDIANTE


Ing. Luis González Morales PhD.
DOCENTE TUTOR



Universidad de Cuenca



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRONICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES
CARRERA: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Extensión 2607 email: fie@esPOCH.edu.ec



Riobamba, Agosto 2 del 2019
Ofc.N.564-CEYA-FIE

Ing:
Ciro Larco MSG.
**DIRECTOR DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD E INGENIERIA
ELECTRICA UNIVERSIDAD DE CUENCA**
Cuenca.-

De mi consideración:

Reciban un cordial saludo, a nombre de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, de la Facultad de Informática y Electrónica, de la Escuela de Control y Redes Industriales, y en atención a la Carta de Compromiso para la realización del trabajo de titulación denominado: **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELECTRICA DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN DE LA FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRONICA-ESPOCH”**, enviado por la Universidad de Cuenca, para el Sr. Estudiante Joseph David Guerra Chávez, identificado con la cédula de ciudadanía: 0604239152, me permito comunicar a usted que esta Escuela ha designado como Docente Coordinador por parte de la Institución para este trabajo de titulación al Ing. Fausto Cabrera Aguayo, Docente de la Facultad.

Por la gentil atención al presente, me suscribo de usted.

Cordialmente,



Ing. Freddy Chávez V.
**DIRECTOR DE LA ESCUELA DE
INGENIERIA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**

FCH/ct



Riobamba, 13 de noviembre de 2019

Recibido
[Signature]
13/11/2019

Ingeniero.
Freddy Chávez V.
**DIRECTOR ESC. INGENIERÍA ELECTRÓNICA
EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**
Presente.

De mi consideración:

Por medio de la presente, me permito informar que el proceso de desarrollo del trabajo de titulación denominado **“Evaluación de la calidad de energía eléctrica del Laboratorio de Automatización de la Facultad de Informática y Electrónica - ESPOCH”**, ha concluido satisfactoriamente. Como evidencia del trabajo realizado desde el 27 de mayo del presente año hasta la fecha, adjunto el informe que detalla la calidad de energía eléctrica presente en el laboratorio de automatización de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH, conjuntamente con las soluciones y recomendaciones que deberían ser consideradas para su mejora, con la finalidad de precautelar la integridad de las personas que utilizan el laboratorio, garantizar el funcionamiento de los equipos y evitar sus pérdidas.

Cabe indicar que el estudio realizado y el análisis técnico de la información obtenida se basó en las regulaciones nacionales vigentes: No. ARCONEL 004/18 y 005/18, establecidas por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) y la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) referente a las instalaciones eléctricas. Se consideró también las normas y estándares internacionales como la IEEE 519, IEEE 1159, IEC 61000-4-15 y la EN50160 referentes a calidad de energía. Para garantizar la confiabilidad de los datos requeridos para el análisis, la selección del equipo de medición se basó en la normativa IEC 61000-4-30.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

[Signature]

Joseph David Guerra Chávez
**TESISTA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE CUENCA**



Adjunto: Informe de la calidad de energía eléctrica presente en el laboratorio de automatización de la facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH.
C.C. Ing. Fausto Cabrera Docente tutor de la ESPOCH.



ANEXO 9: Detalle de los costos aproximados que implicarían el ejecutar todas las propuestas planificadas.

Circuitos de tomacorrientes.



Av. Lizarsaburu y Av. 11 de Noviembre
Telf. 032607064 / 0991891271 / 0994948985
gucuco@yahoo.com

Riobamba, 25 de noviembre de 2019

Proforma # 68-19

Señores

ESPOCH

Presente,

De mis consideraciones:

Atendiendo su gentil petición tengo a bien cotizar la división de circuitos de acuerdo al siguiente detalle:

PRESUPUESTO						
Item	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1	501158	Salida especial 1x10=12	m	50	6.54	327.00
2	503073	Interruptor termomagnético enchufable 1P, 32,40,50,63A	u	4	21.06	84.24
3	503008	Centro de carga de 12 puntos monofásico	u	1	93.24	93.24
4	502004	Alimentador BT 3x6(8)10	m	5	14.83	74.15
5	513018	Tubería BX 1/2"	m	50	4.42	221.00
5	513019	Transformador de control de 3000W	u	1	300	300.00
5	513018	División de circuitos	gib	1	100	100.00
5	513018	Evaluación de sistema a tierra	u	1	400	400.00
SUBTOTAL						1,599.63
					12.00%	191.96
TOTAL						1,791.59

Valor

El costo total es de \$ 1791.59 Un mil setecientos noventa y uno con 59/100 dólares, valor que se encuentra incluido el IVA vigente

Forma de Pago

70 % Anticipo, 30% una vez entregado el Trabajo.

Tiempo


8 días

Atentamente,

Ing. Giovanni Cuzco
03-CIEECH-28

Redes eléctricas, fibra óptica, domótica

Transformador 120 americano / 220 europeo.



PRODUCT CODE: VT.5000 - 01
LiteFuze LT-5000 5000 Watt Heavy Duty Voltage Converter Transformer

\$202.74 ★★★★★ 7 reviews 3 answered questions

In Stock: Usually Ships in 24 Hours

- Max Capacity: 5000 Watts. Efficiency Factor: 1.5
- Power Switch w/ LED Indicator, Multiple Sockets
- Step Up/Down Functionality, Circuit Breaker Protection
- Weight: 29.25lbs
- Size: 8.75" x 6.75" x 12.00"

Quantity:

Filtro Activo.

NEW AFQm, Filtro activo multinivel
 50/60 Hz - Filtrado de armónicos, equilibrado de fases y compensación de energía reactiva

Tipo	Código	Sistema	Corriente de fase (A)	Corriente de cresta (A)	Corriente máx. neutro (A)	Tamaño (mm) ancho x alto x fondo	Peso (kg)	PVP
Armario montaje en pared (mural)								
AFQm-3WF-030M-480	[C] R7MM0F.	3 hilos, 230...480 V	30	60	-	430x530x178	21,00	9.600,00
AFQm-3WF-060M-480	[C] R7MM1F.	3 hilos, 230...480 V	60	120	-	430x530x348	39,00	12.000,00
AFQm-3WF-100M-480	[C] R7MM2F.	3 hilos, 230...480 V	100	200	-	437x670x300	56,00	15.000,00
AFQm -4WF-030M-400	[C] R7RM0F.	4 hilos, 230...400 V	30	60	90	430x530x178	21,00	9.600,00
AFQm -4WF-060M-400	[C] R7RM1F.	4 hilos, 230...400 V	60	120	180	430x530x348	39,00	12.000,00
AFQm-4WF-100M-400	[C] R7RM2F.	4 hilos, 230...400 V	100	200	300	437x670x300	56,00	15.000,00

Se puede observar que el mayor porcentaje de inversión se encuentra en el filtro de armónicos con un valor de 1,20%, el menor es el transformador con un valor de 0.03%. Cabe indicar que el costo total estimado representa el 1,44%, de la inversión en relación al costo que tiene los equipos a proteger.