

Revista Científica y Tecnológica UPSE

Evaluación de la calidad de energía eléctrica para un laboratorio de automatización de Industria 4.0

Electrical power quality assessment for an Industry 4.0 automation laboratory



Joseph D. Guerra Chávez * (1) <https://orcid.org/0000-0003-4669-7715>, Luis González Morales (2) <https://orcid.org/0000-0001-9992-3494>,
Marco Vinicio Ramos Valencia (3) <https://orcid.org/0000-0003-3033-2404>, Sandra G. Barraqueta Rojas (3) <https://orcid.org/0000-0003-2837-8390>.

(1) Investigador independiente, Ecuador.

(2) Universidad de Cuenca, Ecuador.

(3) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

Resumen

Esta investigación define la calidad de energía y sus parámetros, basándose en las normativas ARCONEL 005/18 y 004/18, EN50160, IEC 61000-4-15 e IEEE 519-2014. Bajo esta concepción se evaluó un laboratorio de automatización de industria 4.0 en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. De la información obtenida se determinó que los valores de flicker de Plt en las fases B y C, excede a la norma con el 1.05% y 2,24%. El promedio de la distorsión armónica de corriente total presenta valores superiores a la norma entre el 29.61% al 216.94%. La mayor distorsión de corriente individual presenta la fase B con armónicos impares del 3 al 11, con valores entre el 46,22% al 9,14%. Se calculó un factor de potencia total de 0,83p.u. inferior a la norma. Se concluye que para garantizar la calidad de energía eléctrica se debe acatar sus normativas e incorporar filtros activos en paralelo.

Abstract

This research defines power quality and its parameters, based on ARCONEL 005/18 and 004/18, EN50160, IEC 61000-4-15 and IEEE 519-2014 standards. Under this conception, an industry 4.0 automation laboratory was evaluated at the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. From the information obtained it was determined that the flicker values of Plt in phases B and C, exceeds the standard with 1.05% and 2.24%. The average harmonic distortion of total current presents values higher than the standard between 29.61% and 216.94%. The highest individual current distortion presents phase B with odd harmonics from 3 to 11, with values between 46.22% to 9.14%. A total power factor of 0.83p.u. below the standard was calculated. It is concluded that in order to guarantee the quality of electric power, it is necessary to comply with their regulations and incorporate active filters in parallel.

Palabras clave:

Armónicos,
Calidad de
energía
eléctrica,
Normativas,
Parámetros
eléctricos,
Variables
eléctricas.

Keywords:

Harmonics;
Energy quality;
Standards;
Electrical
parameters;
Electrical
variables.

Recibido: febrero 1/ 2021

Aceptado: marzo 18/ 2021

Publicado: junio 25/ 2021

Forma de citar: Guerra Chávez, J.; González Morales, L.; Ramos Valencia, M., Barraqueta Rojas, S. (2021). Evaluación de la calidad de energía eléctrica para un laboratorio de automatización de Industria 4.0. Revista Científica y Tecnológica UPSE, 8 (1) pág. 56-67. DOI: 10.26423/rctu.v8i1.558.

* Autor para correspondencia: jphguerra95@gmail.com

1. Introducción

Hasta la década de los años 40, 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 nuevos equipos eléctricos para el uso en las actividades humanas, al estar estos conectados a la red obligan al sector eléctrico a incrementar la generación para satisfacer la demanda (Bernal, 2018). La proliferación de equipos con características eléctricas no lineales puede generar variaciones en la onda de voltaje, corriente y frecuencia en el sistema eléctrico que lo suministra, específicamente en el punto de conexión común (PCC), a estos se les conoce como perturbaciones eléctricas, estos dependen de su magnitud, tipo y duración, siendo los principales causantes de generar pérdidas de energía, daños y errores de funcionamiento en los equipos (Schwarz, s.f.) (EnergyTel, 2013) (Calidadenergetica2016, 2016). Alrededor del 80% de los problemas de la calidad de energía se originan en las propias instalaciones del usuario (FLUKE Corp., 2011).

Actualmente es importante realizar este tipo de estudios ya que proporcionan seguridad, ahorro y precisión en la facturación eléctrica, identificación y solución de problemas y la prolongación en la vida útil de los equipos que pueden ir hasta un 32% en maquinarias monofásicas, 18% en trifásicas y un 5% en transformadores (Midebien, 2017) (Servicio Integral y soporte de Datos S.A, 2016). La base de la calidad de energía eléctrica radica en los sistemas de puesta a tierra, estos permiten reducir las fallas ocasionadas por los disturbios eléctricos, dan seguridad a los equipos y al personal que lo opera y evita la generación de incendios por sobre calentamiento (Mercado Polo, Peña, & Pacheco, 2017).

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 y sostenibilidad ambiental. En el año 2015, Ecuador se ubica en el puesto 35 de 129 países a nivel mundial (WORLD ENERGY COUNCIL, 2014) y en el 5to puesto a nivel de América Latina y el Caribe (ARCONEL, 2017). En el año 2018 el Ecuador ocupa el puesto 62 de 125 países (WORLD ENERGY COUNCIL - Trilema, 2018)).

En el reporte realizado en el año 2017 – 2018 por el Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés), en 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 (UTE, 2018). Esto fomentó a la creación de empresas que proveen el servicio de evaluación a la calidad de energía a nivel mundial.

En el Ecuador, existen pocas empresas que brindan este servicio de evaluación entre ellas destacan: Nobreak (Nobreak, 2007), El Centro Eléctrico Industrial (CEIN) (CEIN, 1988), Ingeniería Eléctrica y Mecánica Suministros y servicios (IMETEL Cía. Ltda.) (IMETEL.ltda, 2007). De estos, son pocas las empresas grandes que solicitan un estudio de calidad de energía y se desconoce de estudios a empresas medianas y pequeñas. En lo que tiene que ver con trabajos de investigación por parte de las universidades de prestigio en el Ecuador, sobre el estudio de calidad de energía se puede mencionar que algunos presentan el análisis y no proponen soluciones concretas a los problemas identificados.

En algunas ciudades del Ecuador, específicamente en el sector de la construcción, no se realiza una planificación ni un estudio del tipo de cargas a las que serían sometidas las instalaciones eléctricas de una edificación, sin acatar las normativas tanto nacionales como internacionales vigentes, relacionadas con el tema. Este estudio tiene la finalidad de evitar problemas en el suministro eléctrico y la incorporación de soluciones temporales que generen pérdidas y que afecten al funcionamiento de los equipos. Por tal motivo, este estudio se centra en evaluar las instalaciones eléctricas que suministran la energía al laboratorio de automatización de industria 4.0 de la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) ubicado en la ciudad de Riobamba, Ecuador.

En el caso de estudio de esta investigación, se logró verificar que desde la creación de las instalaciones del edificio hasta la actualidad no se ha ejecutado nuevos estudios o actualizaciones del sistema eléctrico relacionado al tema, aun cuando se han observado casos de daños en equipos electrónicos en reiteradas ocasiones. Por tal razón, se requiere supervisar, diagnosticar y plantear propuestas que garanticen la buena calidad de la energía eléctrica, con el fin de evitar pérdidas o mal funcionamiento de los equipos presentes específicamente en el laboratorio bajo estudio.

En el estudio se aplican las normativas nacionales e internacionales vigentes relacionadas con la evaluación de la calidad de energía eléctrica. Luego se procede a realizar el análisis de los datos registrados y finalmente se plantea una solución de acuerdo con los problemas presentados.

2. Metodología

Para el desarrollo de un estudio de la calidad de energía inicialmente se procedió a la toma de muestras de las variables eléctricas y de forma simultánea la búsqueda de las normativas, para finalmente aplicarlas y establecer soluciones que permitan su mejora. A nivel mundial existen normas que definen la calidad de energía como la IEC 61000-4-30, IEEE 1159-1995,

EN50160 entre otras (IECOR, 2016). Partiendo de estas normas para el desarrollo de esta investigación se estableció a la calidad de energía como 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.

A nivel internacional la IEEE, IEC, CENELEC establecen normas relacionadas a la calidad de energía, para esta investigación se ha considerado la IEEE 1159 para transitorios, variaciones de corta y larga duración, la norma IEEE 519-2014 para armónicos de voltaje y corriente total e individual, la norma IEC 61000-4-15 para parpadeos, la EN50160 para interrupciones y frecuencia. Así como también la norma ecuatoriana ARCONEL que establece a la regulación ARCONEL 004/18 para el factor de potencia y la ARCONEL 005/18 para los niveles de voltaje y desequilibrio de voltaje. El resumen de las variables eléctricas y sus valores límites a considerar según las normas establecidas se observa en la Tabla 1.

Para el caso de la toma de muestras de las variables eléctricas, estos se registraron con un equipo analizador de calidad eléctrica de clase A según lo que establece la

norma IEC 61000-4-30 (E.S.P., 2018). En base a una comparativa de este tipo de equipos de marca FLUKE se seleccionó el analizador FLUKE 435 (FLUKE, Analizadores de Calidad Eléctrica de la Red y Analizadores de Potencia para aplicaciones de alto ancho de banda, 2019).

Las mediciones se efectuaron en el tablero principal, en este punto se unifican las cargas máximas generadas en actividades normales en el edificio y el laboratorio. Con una tasa de muestreo de 10 min durante 7 días, según la regulación de la ARCONEL 005/18 (ARCONEL, Regulación No. 005/18, 2018). Adicionalmente en el censo de las variables eléctricas, se verifica el estado de las instalaciones eléctricas que sirven de punto de conexión principal, con la finalidad de verificar la conexión y contabilizar los equipos disponibles en el laboratorio bajo estudio. El esquema bajo el cual se basa el estudio es el mostrado en la figura 1, donde se observa los circuitos de tomacorrientes y luminarias presentes en el laboratorio con la ubicación de los equipos existentes. Aquí se destacan 6 Sistemas Físicos Cibernéticos de 790W cada uno, 2 Robot KUKA® de 2000W cada uno, 2 sistemas de compresión de aire de 340W cada uno, y una planta de Industria 4.0 de 1784W.

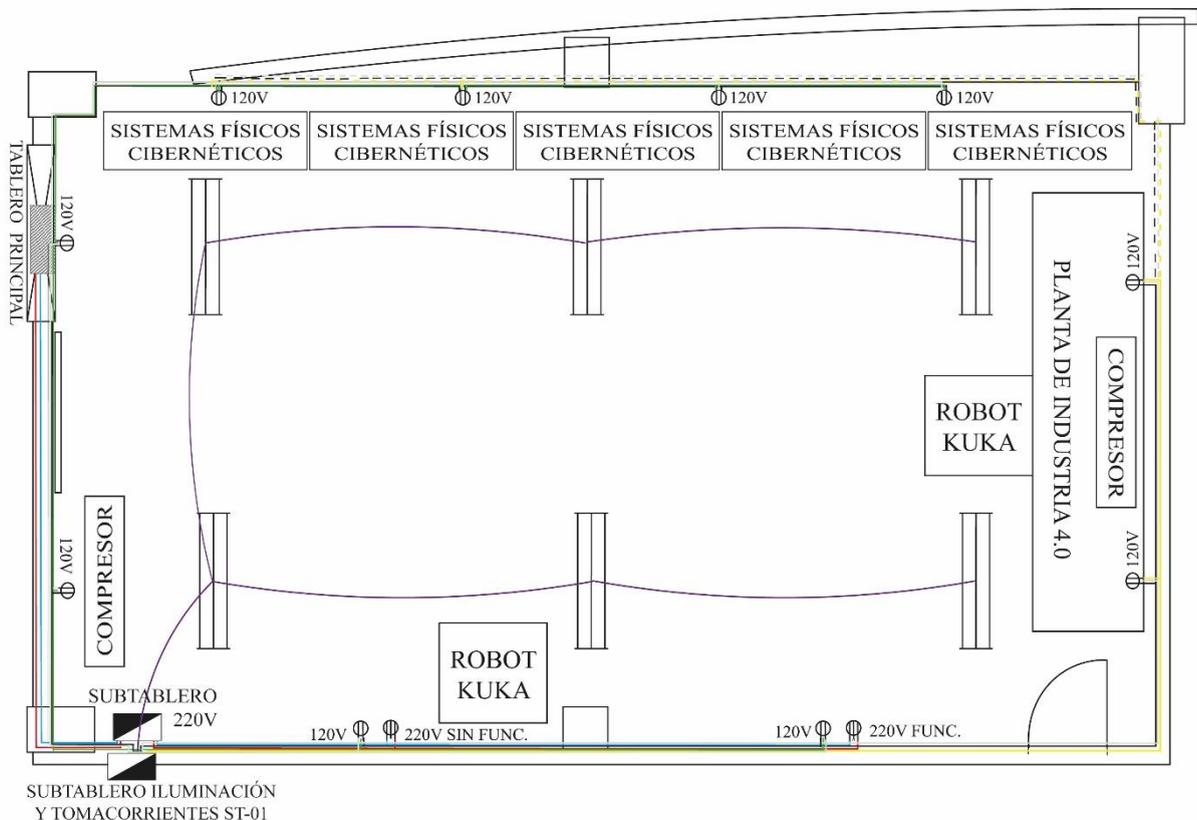


Figura 1. Circuitos de tomacorrientes y luminarias del laboratorio con la ubicación de los equipos. **Fuente:** Autoría propia.

Tabla 1. Resumen de las variables eléctricas y valores límites a considerar.

VARIABLES	CRITERIOS A CONSIDERAR	NORMATIVA
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
	$P_{st} \leq 1$ y $P_{It} \leq 0,65$	IEC 61000-3-3
Armónicos de Voltaje	THD del 8%	IEEE 519-2014
	Individual 5%	
Armónicos de Corriente	TDD no debe sobrepasar el % obtenido del resultado del cálculo - Relación SCR con la ecuación 1 y 2	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 - 5 μ s	
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: Autoría propia.

3. Resultados

Las pruebas se basan en el análisis de los parámetros específicos de calidad de energía eléctrica mediante las variables de niveles de voltaje, corriente, frecuencia, parpadeos, desequilibrio en los sistemas multifásicos, transitorios, distorsión armónica de voltaje y corriente total e individual, factor de potencia y la potencia por medio del analizador FLUKE 435. De los análisis realizados se obtuvo los siguientes resultados.

3.1. Evaluación de los Circuitos de Tomacorriente.

En cuanto a las inspecciones visuales de los circuitos, se identificó tomacorrientes de 120V que presentaron la fase y el neutro invertido, sin conexiones a tierra en algunos casos, tomacorrientes externos que parten de un tomacorriente de pared. También se observó que los cables conductores no corresponden al calibre, tipo y código por colores en las instalaciones eléctricas según lo establecido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) para Instalaciones Eléctricas (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018). Como resultado del análisis se plantea la necesidad de cumplir la normativa.

3.2. Evaluación de los equipos del laboratorio.

Del análisis a los equipos representativos del laboratorio que son el Sistema Físico Cibernético, la Planta de Industria 4.0, el sistema de compresión de aire y el robot KUKA® se observó la presencia de voltajes en la línea Neutro – Tierra (LNG) mayores al valor de 2V, considerado normal según (FLUKE, 2013), lo que indica un posible problema en la conexión en el circuito de alimentación del tomacorriente. Para cada equipo, presentó que la corriente en la línea neutro era mayor a la fase, indicando que existe presencia de armónicos. De estos equipos, el robot KUKA® presentó un mayor porcentaje de distorsión armónica de voltaje total con un valor promedio de 5,66%, y el compresor presentó un mayor porcentaje de distorsión armónica de corriente total con un valor promedio de 146,59%. Concluyendo que estos equipos son los principales generadores de armónicos de orden 3 y son los causantes de que la corriente en el neutro sea mayor a la de fase.

Durante el análisis al robot KUKA® se observa la inconsistencia en los voltajes de LNG de 39,20V y corrientes presentes en el neutro de 4A, por tal motivo se realizó una evaluación más detallada al equipo. Determinando errores en la conexión de alimentación del equipo debido a la incompatibilidad del sistema eléctrico americano con el europeo. En el sistema se observó la conexión de una de las fases de 127V con la fase de 220V del equipo, la fase de 127V restante con el neutro del equipo y la línea neutro del tomacorriente con la tierra del equipo. Por un análisis visual se determinó que la estructura metálica del robot KUKA® no dispone de conexión a una tierra externa, pese a que el sistema de tierra del equipo sí evidencia conectores para dicho fin.

De este análisis se concluye que es necesario que se realice las instalaciones eléctricas basadas en estudios técnicos de los circuitos de tomacorrientes de 220V, acorde a los requerimientos eléctricos de los equipos y sus conexiones a tierra considerando la normativa NEC para instalaciones eléctricas especiales.

3.3. Evaluación en el tablero principal.

En la investigación otro de los aspectos importantes en cualquier estudio de calidad de energía es la toma de variables eléctricas bajo condiciones de operación extremas, para esto se consideró el funcionamiento continuo de todas las cargas presentes en el edificio y el laboratorio bajo estudio.

En base a lo establecido en la regulación se obtuvo un total de 1.008 registros a un voltaje nominal de 127V, en esta prueba se registró por cada lectura los datos mínimos, medios y máximos de las siguientes variables eléctricas: voltajes de las líneas 1, 2, 3 con respecto 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, parpadeos, armónicos totales e individuales de voltaje y corriente, factor de potencia, potencia (Activa, Reactiva, Aparente). Del análisis se determinó que los parámetros de:

- Huecos, sobretensiones y transitorios no se registraron incidentes de estas variables durante las 168h de medición.
- Niveles de voltaje, frecuencia, desequilibrio de voltaje y armónicos de voltaje total e individual cumplieron con las normativas detalladas en la Tabla 1.
- Parpadeos, armónicos de corriente total e individual y factor de potencia incumplieron con las normativas respectivas, encontrando que existe sobrecarga en fases y la potencia, debido a la presencia excesiva de equipos conectados a un circuito eléctrico.

3.4. Evaluación de la corriente de línea.

En el estudio se determina la máxima corriente que se registra en el edificio de la facultad. Los resultados del análisis se observan en la Tabla 2 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 2. 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: Autoría propia.

Al analizar los valores encontrados en la Tabla 2 se observa que el mayor consumo de corriente es de 70A y se registra en la fase B (L2), determinando que existe

mayor carga conectada a la fase B, encontrándose un desbalance considerable del 21,40%.

3.5. Evaluación de la potencia

En el estudio se determina 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 3, 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 3. 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: Autoría propia.

Al analizar los datos de la Tabla 3, 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, lo que representa un 12,93% de la capacidad del sistema de alimentación presente.

3.4.1. Análisis de la potencia activa (kW)

El registro máximo de la potencia activa durante los 7 días de registro se presenta en la fase B (L2N) con un valor de 4,50kW. En la fase C (L3N) con un valor de 3,30kW y en la fase A (L1N) con un valor de 2,40kW.

En la figura 2, 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, de 1,65kW para la fase B (L2N) y de 1,26kW para la fase C (L3N). Se observa un valor máximo de potencia activa total de 3,77kW.

3.4.2. 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. El registro máximo de la potencia reactiva inductiva se presenta en la fase B (L2N) con valor de 0,7kVAR.

En la figura 3 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 -0,13kVAR y la potencia reactiva inductiva total es de 0,19kVAR.

3.4.1. Análisis de la potencia aparente (kVA)

El registro máximo de la potencia aparente se presenta en la fase B (L2N) con un valor de 4,50kVA, para la fase C de 3,30kVA y para la fase A (L1N) de 2,50kVA.

En la figura 4 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, de 1,66kVA para la fase B (L2N) y de 1,26kVA para la fase C (L3N). Se puede observar un valor máximo de potencia aparente total de 3,82kVA.

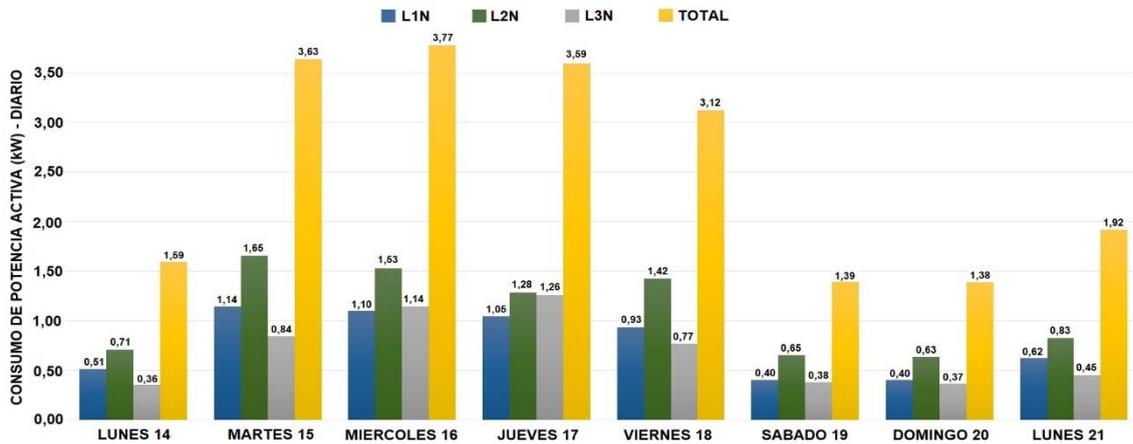


Figura 2. Valores máximos registrados de la potencia activa diaria por fase y total. Fuente: Autoría propia.

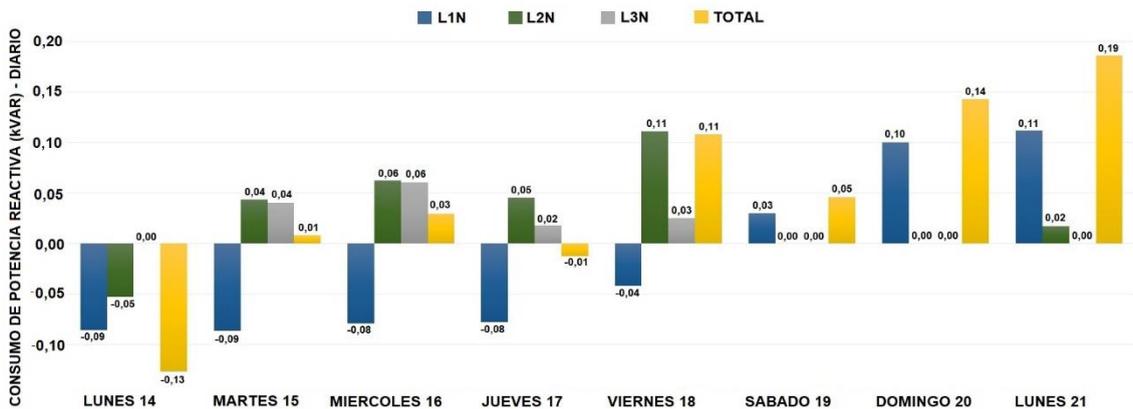


Figura 3. Valores máximos registrados de la potencia reactiva diaria por fase y total. Fuente: Autoría propia.

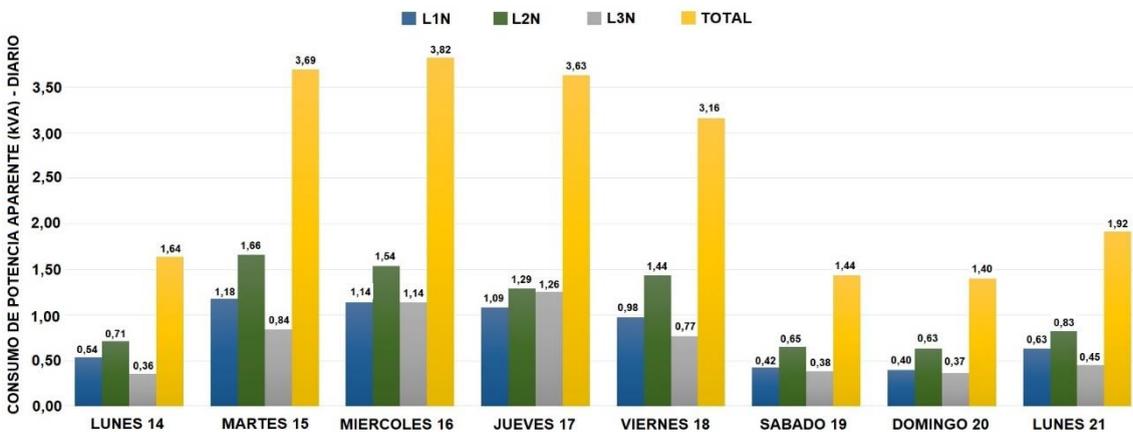


Figura 4. Valores máximos registrados de la potencia aparente diaria por fase y total. Fuente: Autoría propia.

3.5. Evaluación del parpadeo (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 (Pst) no superior al 1,0p.u. y de larga duración (Plt) 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, en la que se especifica los valores de Pst y Plt evaluados para cada línea.

Tabla 4. Total de flicker de corta y larga duración para cada línea.

FASE	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: Autoría propia.

Al analizar la Tabla 4, se determina que los niveles de flicker de Pst en todas las fases cumplen con la normativa. Para los flicker de Plt las fases que no cumplen presentan valores de: 7,24% en la fase C (L3N) y de 6,05% en la fase B (L2N) y se concluye que al ser mayores al 5% de lo establecido por la norma IEC 61000-4-15 existen problemas de flicker de Plt en las fases B y C.

3.6. Evaluación de armónicos de corriente

Para la evaluación de la Distorsión Armónica Total de Corriente (THDI, por sus siglas en inglés) total e individual se consideró los valores límites que establece el estándar IEEE 519-2014 (IEEE Xplore, 2014) Los resultados dependen de los cálculos obtenidos a partir de las ecuaciones (1) y (2); y de los valores límites para cada armónico de corriente impar para bajo voltaje (120V – 69kV) (IEEE Xplore, 2014) La norma no se cumple cuando más del 5% del total de los valores registrados por el equipo excedan del límite permitido.

$$SCR = \frac{I_{sc}}{I_L} \quad (1)$$

$$I_{sc} = \frac{V_{nominal}}{R_{conductor} * Distancia} \quad (2)$$

Donde:

SCR: Es la relación de cortocircuito.

I_{sc}: Es la corriente de corto circuito.

I_L: Es la corriente máxima de carga.

A continuación, se detalla la aplicación del procedimiento y los resultados obtenidos:

3.6.1. Análisis de la distorsión armónica de corriente total.

En relación con el estudio de la distorsión armónica total, es necesario conocer las características de la instalación, como por ejemplo la distancia entre el tablero trifásico principal del edificio y el punto de entrega del suministro. En la inspección se determina una distancia de 45m, los cuales se encuentran unidos por un conductor AWG calibre #4 de 7 hilos por cada fase, cuya resistencia estimada del conductor es de 0,0008486 Ω/m. Aplicando la ecuación (2) se obtuvo una corriente de corto circuito (I_{sc}) de 3.325,74 A, la corriente máxima de carga (I_L) cuyo valor es de 20,81 A presente en la fase B (L2) obtenida de la Tabla 2.

Con estos valores obtenidos se procede a calcular la relación de cortocircuito (SCR) aplicando la ecuación (1), se obtuvo un resultado de 159,81. De la comparación con los límites permitidos en la norma IEEE 519-2014 (IEEE Xplore, 2014), 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) considerado en el análisis la corriente máxima de carga, sería igual a la distorsión de la demanda total (TDD, por sus siglas en inglés) y no debe superar el 15%.

Los resultados del análisis se observan en la Tabla 5, 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.

En la figura 5 y 6 se observa el espectro armónico de los valores medios del THDI mínimo, promedio y máximo para cada línea y el neutro respectivamente.

Al analizar la Tabla 5 y las figuras 5 y 6 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.

Tabla 5. Valores mínimos, promedios y máximos del THD_I total por cada fase y el neutro.

Valores	THD _I Mínimo [%]				THD _I Medio [%]				THD _I 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: Autoría propia.

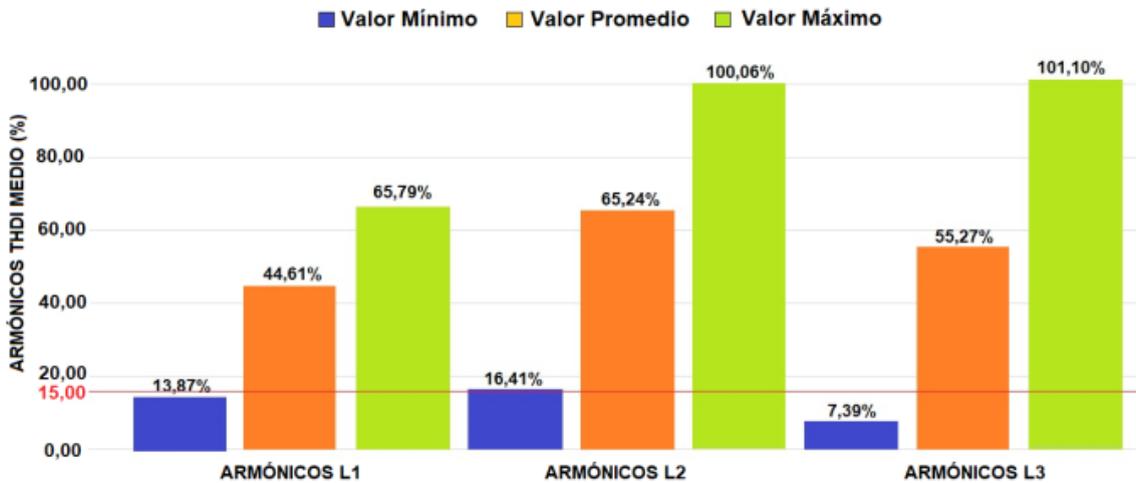


Figura 5. Espectro armónico de los valores medios del THD_I mínimo, promedio y máximo por fase.

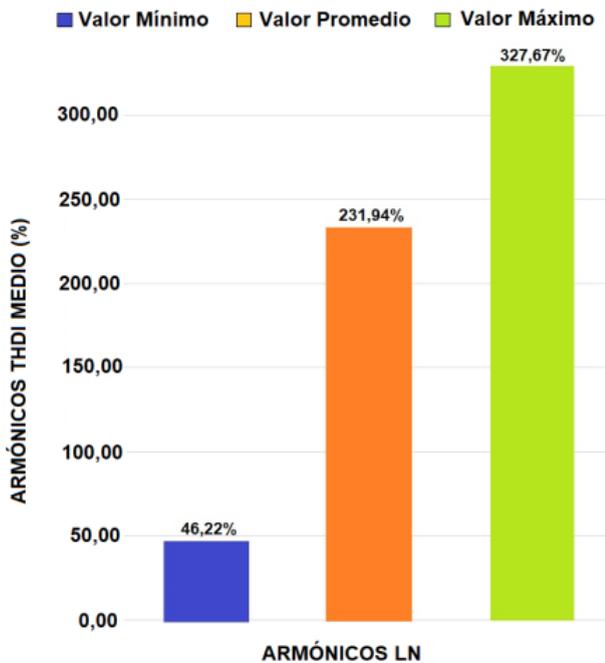


Figura 6. Espectro armónico de los valores medios del THD_I mínimo, promedio y máximo del neutro.

3.6.2. Análisis individual de la distorsión armónica de corrientes por fase.

De acuerdo con los resultados obtenidos y basándose en la tabla de los valores límites para cada armónico de corriente impar para bajo voltaje (120V – 69kV) (IEEE Xplore, 2014) se establece los valores límites que deben presentar los armónicos impares que a continuación se van a evaluar.

En la figura 7 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%.

En la figura 8 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%.

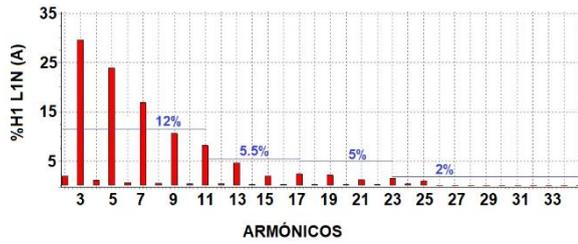


Figura 7. Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L1N.

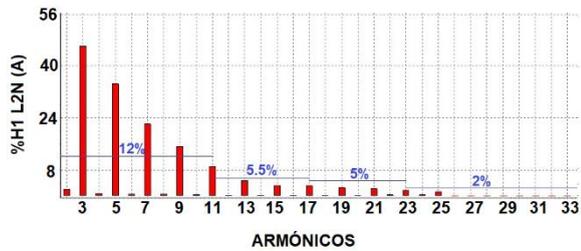


Figura 8. Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L2N.

En la figura 9 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%.

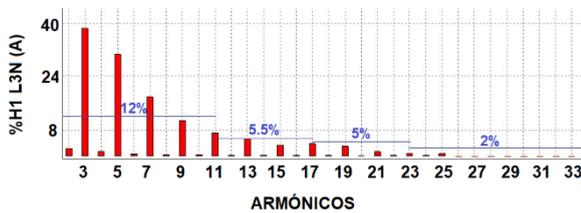


Figura 9. Espectro de la distorsión armónica de voltaje individual para la L3N.

Al analizar las figuras 7, 8 y 9 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.

3.7. 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.

En la Tabla 6 se muestra los resultados del análisis de los valores medios del factor de potencia para cada línea y a nivel total.

Tabla 6. Resultados del análisis de los valores medios del factor de potencia por línea.

Fase / 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: Autoría propia.

Al analizar la Tabla 6, se determina que el total de los valores medios del factor de potencia que sobrepasan el 0.92p.u. establecido por la noma, 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.

3.8. Problemas identificados

En la Tabla 7 se presenta un resumen de los problemas identificados en el análisis de la calidad de energía en el tablero principal.

Tabla 7. 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: Autoría propia.

Al analizar la Tabla 7 se puede observar los parámetros de calidad de energía eléctrica que no se cumple en esta evaluación y son:

- Flicker (nivel Plt) 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 parpadeos. Se recomienda instalar

un filtro para Armónicos que permita eliminar o reducir todas las corrientes armónicas generadas en las fases, específicamente los armónicos de orden 3,5,7,9,11,13 que son los que exceden los niveles permitidos en función a la corriente de cortocircuito.

En base a una comparativa realizada de varios modelos de filtros activos en paralelo de 4 hilos se determinó que los filtros AFQm de 30A, cuyo modelo específico es AFQm-4WF-030M-400, fabricado por la empresa CIRCUTOR (CIRCUTOR, s.f) y el SINAF M de 30A, cuyo modelo específico es SINAFM440030W, fabricado por la empresa LIFASA (LIFASA, 2019). Equipos que cumplen con los requisitos técnicos para el caso de estudio. En base a la información proporcionada por los fabricantes la instalación del filtro se debe realizar lo más cercano a las cargas, para el caso de estudio se sugiere después del interruptor trifásico general de 60A. En la figura 10, se observa la propuesta del diagrama de conexión del filtro para la Facultad de Informática y Electrónica.

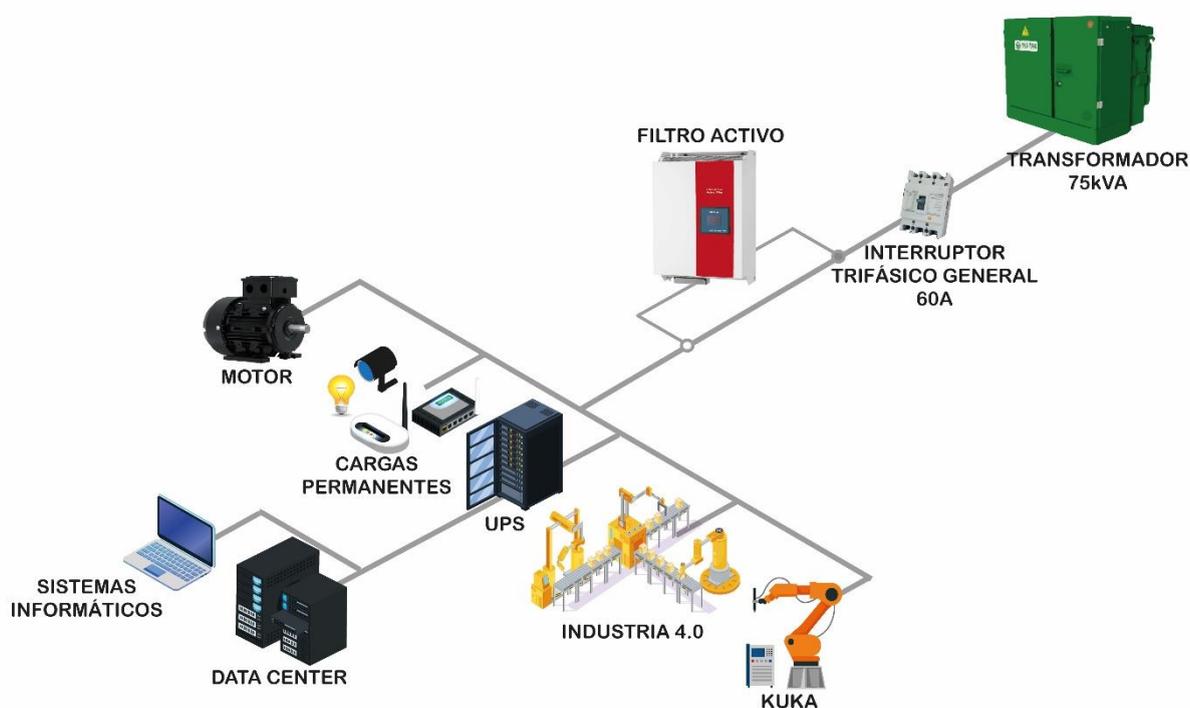


Figura 10. Propuesta del diagrama de conexión del filtro activo para el edificio de la facultad.

4. Conclusiones

En el presente estudio 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 - Ecuador, en el mismo se considera 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 errores de conexión en las instalaciones de los tomacorrientes. 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 sistema de compresión de aire y de 39,45V para el robot KUKA®. En el estudio se observa que los equipos instalados en el laboratorio producen 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 se identifican anomalías como flicker de Plt para 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.

Del análisis realizado se obtuvo que el promedio del THDI total o TDD 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.

5. Referencias bibliográficas

[1] G. Bernal. "Historia de la calidad de la Energía Eléctrica". 2018 Fecha de consulta: 22 de julio de 2019: URL: <https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-la-calidad-de-la-energia-electrica-88ebbf72-32a6-4344-9aa2-ce34cfa603b0>

[2] R. Schwarz. "Medición de la calidad de la energía en instalaciones eléctricas" s.f. Fecha de consulta: 25 de julio de 2019: URL: 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

[3] EnergyTel. "Cargas no lineales en los transformadores de distribución". 2013. Fecha de consulta: 25 de julio de 2013. URL: <https://energytel.typepad.com/energytel/2013/07/cargas-no-lineales-en-los-transformadores-de-distribuci%C3%B3n.html>

[4] Calidadenergetica2016. "Calidad de la energía". Disturbios Eléctricos. 2016. Fecha de consulta: 27 de julio de 2019. URL: <http://calidadenergetica2016.blogspot.com/2016/04/disturbios-electricos.html>

[5] FLUKE. "Equipos de calidad de la energía eléctrica". Equipos de calidad de la energía eléctrica para aplicaciones comerciales e industriales. pp. 2. 2011. Fecha de consulta: 28 de julio de 2019. URL: www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke_434II-435II_notal.pdf

[6] Midebien.com. "5 Razones para realizar un análisis de calidad de energía". 2017. Fecha de consulta: 28 de julio de 2019. URL: <https://midebien.com/5-razones-para-realizar-un-analisis-de-calidad-de-energia/>

[7] Servicio Integral y soporte de Datos S.A, "Estudios de Calidad de Energía Eléctrica". 2016. Fecha de consulta: 29 de julio de 2019. URL: <http://sisdasa.com/estudios-de-calidad-electrica.html>

[8] V. Mercado Polo, J. B. Peña y L. Pacheco. "Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra". 2017. Fecha de consulta: 1 de agosto de 2019. URL: <http://www.redalyc.org/jatsRepo/5075/507555007009/html/index.html>

[9] World Energy Council. "Ecuador se integra al Consejo Mundial de la Energía". 2014. Fecha de consulta: 2 de agosto de 2019. URL: <https://news.cision.com/global/e5664281-45a4-4e52-ade0-a5908b34d009/r/ecuador-se-integra-formalmente-al-consejo-mundial-de-la-energia,c9634515>

[10] ARCONEL. "El Consejo Mundial de Energía ubica al Ecuador entre los 5 mejores países en Seguridad Energética a nivel mundial". 2017. Fecha de consulta: 2 de agosto de 2019. URL: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/el-consejo-mundial-de-energia-ubica-al-ecuador-entre-los-5-mejores-paises-en-seguridad-energetica-a-nivel-mundial/>

[11] World Energy Council. "World Energy Trilemma Index". 2018. Fecha de consulta: 3 de agosto de 2019. URL: <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Trilemma-Index-2018.pdf>

- [12] UTE. "El servicio eléctrico uruguayo es de los más confiables de la región". 2018. Fecha de consulta: 3 de agosto de 2019. URL: <https://portal.ute.com.uy/noticias/el-servicio-electrico-uruguayo-es-de-los-mas-confiables-de-la-region>
- [13] Nobreak. "Energía sin interrupciones". Ecuador. 2007. Fecha de consulta: 6 de agosto de 2019. URL: <http://nobreak.com.ec/>
- [14] CEIN. Centro Eléctrico Industrial. Ecuador. 1988. Fecha de consulta: 6 de agosto de 2019. URL: <http://cein.com.ec/>
- [15] IMETEL.ltda, "Ingeniería Eléctrica y Mecánica Suministros y Servicios CIA. LTDA.". Ecuador. 2007. Fecha de consulta: 6 de agosto de 2019. URL: http://www.imetel.com.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=2
- [16] IECOR. "Calidad de Energía Eléctrica". España. 2016. Fecha de consulta: 12 de agosto de 2019. URL: <https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>
- [17] Enertolima S.A. E.S.P. "Compañía Energética del Tolima". 2018. Fecha de consulta: 16 de agosto de 2019. URL: <https://docplayer.es/110043609-Compania-energetica-del-tolima-s-a-e-s-p-criterios-de-diseno-y-normas-para-construccion-de-instalaciones-de-distribucion-y-uso-final-de-la-energia.html>
- [18] FLUKE. "Analizadores de Calidad Eléctrica de la Red y Analizadores de Potencia para aplicaciones de alto ancho de banda". 2018. Fecha de consulta: 25 de agosto de 2019. URL: <https://docplayer.es/11677484-Analizadores-de-calidad-electrica-de-la-red-y-analizadores-de-potencia-para-aplicaciones-de-alto-ancho-de-banda.html>
- [19] ARCONEL. Agencia de regulación y control de electricidad. "Regulación No. ARCONEL 053/18, Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica". Quito, Ecuador. 2018, pp. 12. Fecha de consulta: 28 de agosto de 2019. URL: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/053-18-Proyect-Regulac-Sustitutiva-a-Reg-N-CONELEC-004-01-Calidad-del-servicio-de-dist-y-comercializaci%C2%A6n-de-EE.pdf>
- [20] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. "Norma Ecuatoriana de la construcción – instalaciones Eléctricas NEC". 2018. pp. 15-28. Fecha de consulta: 15 de octubre de 2019. URL: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/NEC-SB-IE-Final.pdf>
- [21] FLUKE. "Diagnóstico de problemas de energía eléctrica en el receptáculo". 2013. Fecha de consulta: 21 de noviembre de 2019 URL: <https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/electrica/diagnostico-de-problemas-de-energia-electrica-en-el-receptaculo>
- [22] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992). pp.1-29, 11 June 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459."
- [23] CIRCUTOR S.A. "Filtro Activo con tecnología multinivel". pp.1-4. Fecha de consulta: 5 de enero de 2020. URL: http://circutor.es/docs/FT_AFM30_60_100_ES.pdf
- [24] LIFASA International Capacitors S.A. "Filtro Activo paralelo multifunción - active harmonic filter". 2019. Fecha de consulta: 5 de enero de 2020. URL: https://lifasa.com/pdf/SINAFM_ACTIVEFILTE R.pdf