



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

**Estudio de calidad de energía eléctrica utilizando analizador de redes trifásicas: caso de estudio
UOH campus Rancagua.**

Nicolás Ignacio Cordero Pinto
Profesor guía: Miguel A. Torres López

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile
Enero 2021

Agradecimientos

Agradezco de corazón a mis padres por ser un pilar fundamental en este proceso estando siempre conmigo enseñándome valores para formarme como persona y profesional, apoyándome con sus palabras de aliento y su amor incondicional en los momentos que todo se vuelve cuesta arriba.

También le agradezco a todos mis amigos, compañeros de carrera y a las personas que ya no están, quienes de alguna forma u otra me ayudaron a seguir adelante entregándome momentos inolvidables.

Por último, quiero agradecer a los profesores y a todas las personas ligadas a la Universidad de O'Higgins, los cuales me brindaron su ayuda durante el trabajo, las motivaciones y las herramientas para formarme como profesional.

Tabla de contenido

Resumen	10
1. Introducción.....	12
2. Objetivos.....	14
2.1. Objetivo general.....	14
2.2. Objetivos específicos.....	14
3. Alcances y limitaciones	15
4. Revisión de la literatura y Marco teórico.....	16
4.1. Publicaciones sobre estudios de calidad de energía	16
4.2. Definición de la calidad de energía eléctrica.....	17
4.3. Perturbaciones presentes en la red eléctrica	18
4.4. Definición y formas de cálculo de índices de calidad estipulados en la norma técnica	20
4.4.1. Regulación de tensión.....	21
4.4.2. Desequilibrio de tensión y corriente.....	22
4.4.3. Monitoreo de variaciones rápidas de tensión	26
4.4.4. Monitoreo de frecuencia.....	29
4.4.5. Distorsión armónica	29
4.4.6. Severidad de parpadeo (Flicker).....	38
4.4.7. Factor de potencia.....	40
4.5. Normativa	42
4.5.1. EN 50160	42
4.5.2. IEC 61000-4-30	42
4.5.3. IEEE 519	42
4.6. Filtros armónicos	44
4.6.1. <i>Filtros activos</i>	44
5. Marco Metodológico.....	48
5.1. Equipo de medición.....	48
5.1.1. Descripción de los analizadores de redes.....	48

5.1.2.	Características del analizador de red MYeBOX 1500.....	48
5.1.3.	Diagramas de conexiones principales	49
5.1.4.	Señal de muestreo, parámetros y mediciones	50
5.2.	Metodología de medición calidad de energía eléctrica	51
5.2.1.	Aspectos generales	51
5.2.2.	Evaluación y selección de los puntos de medición.....	53
5.2.3.	Área de estudio	54
5.2.4.	Instalación del analizador de redes	55
5.2.5.	Variables registradas.....	57
5.2.6.	Desconexión de analizador de redes.....	58
5.2.7.	Extracción de los datos registrados.....	58
6.	Resultados y discusión	59
6.1.	Análisis de registros durante fin de semana para caso de referencia.	59
6.1.1.	Voltajes y corrientes RMS	59
6.1.2.	Índices de distorsión armónica THD de corriente y voltaje.	65
6.1.3.	Armónicas individuales de corriente y voltaje caso referencia.	67
6.1.4.	Mediciones en el neutro caso de referencia.....	70
6.2.	Análisis de registros realizadas durante 7 días consecutivos	71
6.2.1.	Voltaje y corriente por fase	72
6.2.2.	Índices de distorsión armónica THD de corriente y voltaje.	77
6.2.3.	Armónicos individuales de corriente y voltaje	83
6.2.4.	Distorsión de demanda total	86
6.2.5.	Mediciones en el neutro	88
6.3.	Evento ocurrido durante mediciones	90
6.4.	Discusión de los resultados.....	92
6.4.1.	<i>Análisis de Voltaje</i>	93
6.4.2.	<i>Análisis de Corriente</i>	94
6.4.3.	<i>Análisis de THD de voltaje</i>	94

6.4.4. <i>Análisis de THD de corriente</i>	95
6.4.5. <i>Análisis de corriente y voltaje de neutro</i>	96
7. Recomendaciones	98
7.1. Redistribución de cargas en la instalación.....	99
7.2. Filtros de armónicos.....	100
8. Conclusiones.....	101
9. Trabajo futuro	103
Bibliografía.....	104
Anexo.....	111

Listado de tablas

Tabla 1: reclamos notificados por los clientes en EU-8 según encuesta de LPQI [7].	19
Tabla 2: límites para regulación de tensión [9]......	21
Tabla 3: efectos generados debido aparición de desbalances de voltaje y corriente [12]......	24
Tabla 4: límites para desequilibrio de tensión [9]......	25
Tabla 5: intervalos para registrar las variaciones de frecuencia [9]......	29
Tabla 6: secuencia armónica.	32
Tabla 7: fuentes de armónicos y su ubicación.	33
Tabla 8: efectos y problemas generados por armónicos en componentes de una instalación [24].	33
Tabla 9: armónicos de voltaje según NTCSSD [9]......	34
Tabla 10: límites de distorsión armónica en voltaje [25].	35
Tabla 11: límites para índices de severidad de parpadeo o Flicker [29].	39
Tabla 12: límites de distorsión armónica en corriente [25]......	43
Tabla 13: aplicaciones de los filtros según su conexionado [37].	45
Tabla 14: principales características.....	49
Tabla 15: mediciones aproximadas de conductores.	56
Tabla 16: desequilibrios y variaciones de voltaje.....	74

Tabla 17: desequilibrios de corriente en bajo y alto consumo.....	77
Tabla 18: mínimos y máximos registrados en THD de corriente.....	79
Tabla 19: mínimos y máximos de THD de voltaje.....	82
Tabla 20: datos del transformador.	86
Tabla 21: TDD medido en cada tablero.	87
Tabla 22: registro de eventos ocurridos.	91
Tabla 23: resumen de los parámetros eléctricos en el tablero del zócalo.	97
Tabla 24: resumen de parámetros eléctricos en tablero del 7° piso.....	98

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1: índices de calidad según la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución.....	20
Ilustración 2: sistema trifásico presentando desequilibrios de tensión.....	22
Ilustración 3: componentes simétricas de un sistema trifásico desequilibrado [11].....	23
Ilustración 4: presencia de interrupción en señal de voltaje [15].	27
Ilustración 5: presencia de huecos de tensión [16].	28
Ilustración 6: presencia de sobretensión en señal de tensión [16].	28
Ilustración 7: forma de onda senoidal con contenido armónico.....	30
Ilustración 8: señal de tensión fundamental con señales armónicas.....	31
Ilustración 9: triángulo de potencias.	40
Ilustración 10: esquema básico de un filtro activo conectado en paralelo [38].	46
Ilustración 11: esquema básico de un filtro activo conectado en serie [38].	46
Ilustración 12: esquema básico que combina filtros activos en serie y paralelo [38].	47
Ilustración 13: medición en red trifásica con conexión a 4 hilos [29].	50
Ilustración 14: medición en red monofásica de fase a neutro de 2 hilos [29].	50
Ilustración 15: metodología de trabajo.....	52
Ilustración 16: área de estudio.	54
Ilustración 17: imágenes de los tableros medidos.....	56

Ilustración 18: equipos de protección individual.	57
Ilustración 19: interfaz de usuario de PowerVision Plus.....	58
Ilustración 20: voltaje RMS en tablero del zócalo, fin de semana.....	59
Ilustración 21: voltaje RMS en tablero 7° piso, fin de semana.	61
Ilustración 22: corriente RMS en tablero zócalo, fin de semana.....	62
Ilustración 23: corriente RMS en tablero 7° piso, fin de semana.	63
Ilustración 24: THD de corriente en tablero zócalo, fin de semana.....	65
Ilustración 25: THD de corriente en tablero 7° piso, fin de semana.	65
Ilustración 26: THD de voltaje en tablero zócalo, fin de semana.	66
Ilustración 27: THD de voltaje en tablero 7° piso, fin de semana.	67
Ilustración 28: armónicas de corriente individuales tablero zócalo, fin de semana.....	68
Ilustración 29: armónicas individuales de corriente en tablero 7° piso, fin de semana.....	68
Ilustración 30: armónicas individuales de tensión en tablero zócalo, fin de semana.	69
Ilustración 31: armónicos individuales de voltaje en tablero 7° piso, fin de semana.	69
Ilustración 32: corriente de neutro en tablero zócalo, fin de semana.	70
Ilustración 33: corriente de neutro, en tablero 7° piso, fin de semana.....	71
Ilustración 34: voltaje RMS en tablero zócalo.	72
Ilustración 35: voltaje RMS en tablero del 7° piso.	73
Ilustración 36: corriente RMS en tablero del zócalo.	75
Ilustración 37: corriente RMS en tablero 7mo piso.	76
Ilustración 38: corriente trifásica en tablero zócalo.....	77
Ilustración 39: THD de corriente en tablero zócalo.....	78
Ilustración 40: corriente trifásica en tablero 7mo piso.	78
Ilustración 41: THD de corriente en tablero 7° piso.	79
Ilustración 42: voltaje trifásico en tablero zócalo.	80
Ilustración 43: THD de voltaje en tablero zócalo.	81
Ilustración 44: voltaje trifásico en tablero 7° piso.....	81
Ilustración 45: THD de voltaje en tablero 7mo piso.....	82

Ilustración 46: armónicas individuales de corriente en tablero zócalo.	83
Ilustración 47: armónicos individuales de corriente en tablero 7° piso.	84
Ilustración 48: armónicos individuales de tensión en tablero zócalo.	85
Ilustración 49: armónicos individuales de tensión en tablero 7° piso.	85
Ilustración 50: corriente de neutro en tablero zócalo.	89
Ilustración 51: corriente de neutro en tablero 7mo piso.	89
Ilustración 52: Interrupción ocurrida en Fase 3.	91
Ilustración 53: huecos de tensión ocurridos en las fases 1 y 2.	92
Ilustración 54: filtro activo propuesto.	100

Abreviatura y símbolos

A	: Amperes.
BT	: Baja tensión.
CCUF	: Complex Current Unbalance Factor.
CUF	: Current unbalance factor.
CVUF	: Complex Voltage Unbalance Factor.
EPI	: Equipos de protección individual.
Hz	: Hertz.
IEC	: Comisión electrotécnica internacional.
IEEE	: Instituto de ingenieros electricos y electrónicos.
IL	: Corriente máxima demandada.
Isc	: Corriente mínima de corto circuito.
kV	: Kilovoltio.
kVA	: Kilo volt-ampere.

kW	: Kilowatt.
kVAR	: Kilo volt ampere reactivo.
MT	: Media tensión.
NTCSSD	: Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución.
PCC	: Punto común de conexión.
Plt	: Severidad por Flicker de larga Duración.
Pst	: Severidad por Flicker de Corta Duración.
SCR	: Relación de corto circuito.
S_T	: Potencia aparente del transformador.
TDD	: Distorsión de demanda total.
THD	: Distorsión armónica total.
UPS	: Sistema de Alimentación Ininterrumpida.
V	: Volts.
VUF	: Voltaje unbalance factor.
Z_{SC}	: Impedancia de corto circuito.

Resumen

En la presente memoria se realizó un estudio de calidad de energía de la Universidad de O'Higgins, campus Rancagua. Este estudio consiste en determinar si el sistema eléctrico se encuentra afectado por perturbaciones eléctricas que impida a los equipos conectados en la instalación operar de forma continua y normal sin riesgo a daños prematuros. El estudio se realizó con la ayuda del analizador de redes portátil Circutor MYeBOX 1500, el cual es capaz de medir y registrar de manera local y remota diferentes variables eléctricas. Estas, mediante una aplicación online y de escritorio, se podrán procesar y visualizar, brindando la posibilidad de analizar los datos para determinar en qué condiciones se encuentra la calidad de la energía y a su vez determinar si la normativa eléctrica chilena se está cumpliendo. Esto permitió evidenciar y explicar diferentes problemas que pueden llegar a presentarse en la instalación eléctrica, debido a perturbaciones y/o fenómenos electromagnéticos, tales como fluctuaciones de voltaje y frecuencia, distorsiones armónicas y desequilibrios en tensión y corriente.

La herramienta de medición se ubicó en diferentes puntos de interés en la instalación eléctrica de la universidad para llevar a cabo el proceso de registro de las mediciones. Los puntos de conexión se determinaron previamente con el estudio de los planos eléctricos del edificio principal, para su elección se hizo uso de criterios de accesibilidad y seguridad de forma que sea fácil y seguro conectarse a los puntos de interés. En el estudio se determinaron cuáles eran los puntos de interés en donde la calidad de energía eléctrica podría estar siendo afectada, para posteriormente identificar los causantes de los problemas que se podrían presentar.

Tras realizar las mediciones, se encuentra que las principales perturbaciones eléctricas identificadas consisten en distorsiones armónicas de corriente y desequilibrios de corriente. Se presentaron niveles de distorsiones armónicas totales promedios del 24.49% y 42.8% predominando armónicos impares y de secuencia cero, también se alcanzaron desbalances promedios del 29.48% y 20.17% en los tableros del zócalo y del 7mo piso respectivamente. La presencia de estas perturbaciones se debe a la distribución desbalanceada de las cargas y el uso de aparatos monofásicos no lineales tales como: computadores, impresoras, aires acondicionados, etc. Además, debido a estas perturbaciones la corriente en el neutro se vio

directamente afectada, provocando un aumento de corriente en el conductor de alrededor 20 A, alcanzando corrientes iguales o superiores a las fases en momentos de alto consumo.

Se finaliza por recomendar la implementación de filtros activos y una redistribución de cargas para reducir las distorsiones armónicas y los desbalances de corrientes que se encuentran afectando al sistema eléctrico y en consecuencia reducir la corriente en el conductor neutro respetando los límites fijados por la normativa eléctrica. Con esto se espera lograr prevenir futuras fallas de dispositivos eléctricos de la universidad, fallas en aislamientos de conductores y preservar la vida útil del transformador existente.

Palabras claves: calidad de energía eléctrica, desequilibrios de tensión y corriente, distorsión armónica, filtros activos.

1. Introducción

Hoy en día muchas actividades laborales o económicas requieren de un uso continuo de energía eléctrica, por lo que es indispensable un suministro confiable y seguro para el correcto desarrollo de estas actividades. Sin embargo, la calidad de energía se ve afectada debido a diversas causas como por ejemplo el uso de aparatos que son propensos a provocar perturbaciones o fenómenos electromagnéticos en la red eléctrica, tales como:

- Arrancadores de motores.
- Motores de velocidad variable.
- Bancos de condensadores.
- Sistemas de iluminación.
- Sistemas de aire acondicionado.
- Convertidores estáticos de potencia: cargadores, Inversores, rectificadores, acondicionadores de línea, reguladores electrónicos y UPS´s.

Por esta razón es necesario la realización de estudios de calidad de energía, ya que permitirá detectar problemas de forma temprana y las condiciones en las que se encuentran operando los equipos conectados en la instalación eléctrica. Cabe destacar que, si no se detectan estos problemas a tiempo, se podrían producir fallas como sobrecalentamientos, reducciones en la vida útil e incluso la destrucción total de los aparatos conectados en la instalación eléctrica, lo cual puede generar pérdidas económicas a las empresas que se vean afectadas por problemas de calidad de energía.

La Universidad de O'Higgins cuando abrió sus puertas por primera vez poseía un número de estudiantes, trabajadores y una infraestructura bastante más reducida con respecto a lo existente hoy en día, notando que con el paso del tiempo ha tenido un gran crecimiento en su infraestructura y en su comunidad. Es por esto que las cargas eléctricas conectadas ya no son las mismas que cuando esta universidad inició, aumentando en número y en consecuencia el consumo eléctrico, trayendo consigo perturbaciones eléctricas, debido a cargas no lineales como iluminación, sistemas informáticos, sistemas de acondicionamiento de aire, entre otros.

El presente trabajo tiene por finalidad identificar el estado de la calidad de energía del campus Rancagua de la Universidad de O'Higgins, realizando mediciones en algunos puntos del sistema eléctrico. De estas mediciones se verificará que cumplan con lo estipulado en la norma técnica vigente. Para esto se hará uso de un analizador de redes portátil MYeBOX 1500 para realizar mediciones y registrar variables eléctricas en los puntos de conexión establecidos.

La realización del estudio de calidad de energía eléctrica en las instalaciones de la Universidad de O'Higgins, campus Rancagua, pretende brindar un adecuado conocimiento de las diferentes perturbaciones eléctricas que se pueden presentar en la red eléctrica conociendo sus efectos y sus formas de generación. Enfocándose principalmente en índices de calidad como "Voltage Unbalance Factor (VUF)", "Current Unbalance Factor (CUF)" y "Total Harmonic Distortion (THD)", los cuales miden los desbalances de tensión y corriente y las distorsiones armónicas.

Los resultados obtenidos tras las mediciones son estudiados en base a la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución y a las normas internacionales como la IEEE 519, IEC 61000-4-30 y la EN 50160, determinando si existen casos que excedan los límites estipulados en la norma que pudieran afectar la calidad de energía.

Finalmente, en base a los análisis de las mediciones, se presentan posibles propuestas para su solución o su mejora con el fin de prevenir futuras interrupciones de suministro, proteger la vida útil de transformadores o la falla de equipos electrónicos en la universidad.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Identificar el estado de la calidad de energía eléctrica, caso Universidad O'Higgins, campus Rancagua, en base a lo estipulado en la norma técnica chilena para así determinar que problemas podría conllevar a la instalación eléctrica de la universidad y que equipos serían los afectados.

2.2. Objetivos específicos

1. Estudiar índices de calidad estipulados en norma técnica chilena.
2. Estudiar las capacidades y limitaciones que posee el instrumento de medición.
3. Estudiar planos eléctricos de la instalación eléctrica para ubicar el equipo de medición.
4. Estudiar y analizar parámetros de la calidad de energía eléctrica, utilizando el analizador de redes MYeBOX 1500, para verificar si el suministro eléctrico cumple con la norma técnica.
5. Proponer soluciones, si hacen falta, que podría implementar la universidad, para mejorar, mitigar o solucionar problemas de calidad de energía.

3. Alcances y limitaciones

La presente memoria desarrollará un estudio de calidad de energía en el campus Rancagua de la Universidad de O'Higgins, aprovechando el analizador de redes MYeBOX 1500 que permite analizar los parámetros de calidad de la energía eléctrica. Este estudio se centra en los desequilibrios y armónicos en tensión y corriente; el estudio de calidad de energía se limitó a estas perturbaciones, ya que este tipo de estudios pueden llegar a ser muy extensos dada la gran variedad de índices de calidad que se usa para analizar el resto de las perturbaciones eléctricas existentes. Además, al realizar el estudio en la universidad se tomó en cuenta que se presentarían perturbaciones eléctricas como: distorsiones armónicas y desbalances de corriente y voltaje, debido al tipo de consumo existente, el cual corresponde principalmente a un gran número de cargas no lineales monofásicas.

Para comprobar que las mediciones realizadas de los parámetros eléctricos se encuentran en rangos aceptables se hará uso de regulaciones nacionales como la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución y estándares internacionales, tales como: IEEE 519, IEC 61000-4-30 y EN 50160.

Cabe destacar que, en un principio, el estudio se deseaba realizar en los terminales de conexión al transformador ubicado en la sala eléctrica del zócalo, pero esto no se logró, ya que se requerían permisos adicionales que no se lograron conseguir. Además, tal como se ve en el diagrama unifilar proporcionado por la universidad, mostrado en el Anexo 2, este no se encuentra actualizado, por lo que no se tiene mayor detalle sobre las cargas específicas que se encuentran en los puntos de conexión. Sin embargo, según lo hallado con el eléctrico de la universidad el tablero del zócalo se encuentra alimentando luminarias y ventilación y el tablero del 7mo piso se encuentra alimentando enchufes del piso y luminarias, esperando así cargas como computadoras, impresoras, aires acondicionados, iluminación led, etc.

4. Revisión de la literatura y Marco teórico

4.1. Publicaciones sobre estudios de calidad de energía

Se señalan algunos estudios con temáticas relacionadas a la presente memoria de título. Estos estudios aportaron información importante para ser considerada al momento de abordar y desarrollar este proyecto.

En el proyecto de tesis titulado: “ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGIA Y REDISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN LA PLANTA INDUSTRIAL CORPORACIÓN DE PROYECTOS MÚLTIPLES MULTIPROYECTOS S.A”, para obtener el título de Ingeniero Eléctrico [1]. En el cual, se desarrolla un estudio y análisis de los distintos índices de calidad de una industria pesquera que se dedica a la producción de harina de pescado. Para lo cual hicieron uso de un analizador de redes registrando e identificando las perturbaciones eléctricas que dieran información como se encontraba la calidad de energía de la planta industrial. Este estudio también comprende un análisis de soluciones adoptadas para corregir las perturbaciones que se detectaron, entre ellos un banco de capacitores para corregir el factor de potencia.

El proyecto de tesis titulado: “METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN BASE A NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES PARA LA UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC”, para obtener el título de Ingeniero Eléctrico [2]. En este trabajo se describen de forma detallada las perturbaciones que generan distorsión a las señales de potencia eléctrica y afectan la calidad de energía. Además, se desarrolló un ejemplo de informe para las personas que necesiten realizar estudios de calidad de energía, incluyendo todo lo descrito para medir y registrar las perturbaciones eléctricas en base a la información entregada por analizadores de redes basándose en las normativas y regulaciones de Colombia.

En el proyecto de tesis titulado: “ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN – SALIDA I S.E. BELLAVISTA”, para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista [3]. En el cual, se desarrolla un estudio de la calidad de energía en baja tensión mediante el uso de un analizador de redes. Para esto se monitorea y analiza parámetros como el factor de potencia, distorsión armónica, voltajes y corrientes de una

industria. Presentando perturbaciones eléctricas que exceden los límites estipulados por las normas, entre ellas se encuentran las variaciones de tensión, consumo de potencia reactiva elevada y distorsiones armónicas en corrientes. En este trabajo para reducir costos debido a averías o pérdidas de equipos eléctricos se planteó solucionar estos problemas con filtros.

Puesto que hasta antes de la presente memoria no se tenía ningún acercamiento al estudio y al monitoreo de calidad de energía con analizadores de redes, los trabajos anteriormente mencionados sirvieron de referencia para llevar a cabo un plan para monitorear la calidad de energía de la Universidad de O'Higgins. De estos se tomaron algunas consideraciones para realizar la toma de datos y como analizar la situación de la calidad de la energía de la universidad en base a las normativas internacionales y nacionales. Además, como cada sistema eléctrico se comporta de forma diferente, las soluciones implementadas en cada trabajo variaban dependiendo del tipo de perturbación presente, lo cual aportó nuevos conocimientos y formas de ver cada problema para corregir y plantear soluciones a las perturbaciones existentes.

4.2. Definición de la calidad de energía eléctrica

La calidad de la energía es algo complejo de definir, pero esta se puede considerar como “buena” cuando existen una baja cantidad de perturbaciones eléctricas, entre ellas variaciones de voltaje y frecuencia, interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicos en la red, entre otros, manteniendo así la continuidad del servicio eléctrico [3]. En relación con lo anterior, se puede considerar que debido a una buena calidad de energía eléctrica los equipos conectados en los sistemas eléctricos podrán operar de forma continua y normal sin riesgo a daños prematuros o reducción de vida útil evitando el reemplazo de componentes dañados.

En la actualidad, el alto consumo energético y el deseo de utilizar la energía eléctrica de manera eficiente ha dado paso a desarrollar nuevas tecnologías basadas en electrónica de potencia, utilizando dispositivos electrónicos no lineales, tales como: transistores, diodos o circuitos integrados, los cuales provocan anomalías en las ondas de tensión y corriente del sistema eléctrico, dando así orígenes a las perturbaciones eléctricas [4].

Las perturbaciones eléctricas como la distorsión armónica, el Flicker, las variaciones de frecuencia, las normas nacionales e internacionales como la EN 50160 proporcionan límites para mantener una calidad de energía adecuada [5]. Es por esto que cuando estas perturbaciones eléctricas sobrepasan los límites fijados por las normas eléctricas, la calidad de energía se ve degradada, pudiendo ser altamente perjudicial para procesos industriales y del sector comercial, ya que podrían producirse fallos prematuros en equipos eléctricos, luces que parpadean, disparo de protecciones diferenciales y/o disyuntores y paradas de equipos eléctricos no programadas. Esto impedirá la correcta realización de actividades diarias que afectaran la productividad de la empresa. Al realizar estudios de calidad de energía es de gran importancia que se realice un estudio en detalle del problema, abarcando aspectos claves como: investigación básica de problemas y soluciones, mantenimiento de equipos, mediciones y evaluaciones del desempeño de equipos eléctricos y normalización.

4.3. Perturbaciones presentes en la red eléctrica

En la red eléctrica se presentan perturbaciones propias de la red, las cuales corresponden a imperfecciones en el suministro eléctrico presentándose durante la transmisión o distribución de la electricidad. Los orígenes de estas perturbaciones pueden variar, pero por lo general se presentan debido a cortes de cableado, descargas atmosféricas, choques de animales u objetos externos a las líneas de transmisión o distribución [6]. Usualmente cuando se presentan fallas en las líneas de transmisión o distribución afecta a la continuidad de servicio eléctrico generando costos adicionales no solo a las empresas encargadas de transportar o distribuir la electricidad, sino que también al cliente final.

Por otro lado, se presentan perturbaciones externas a la red, las cuales son originadas por el cliente final, debido a la operación de cargas no lineales y/o arranques y paradas de grandes cargas, teniendo cableado deficiente [6]. Los clientes finales pueden ser industriales, comerciales o residenciales, los cuales tendrán diferentes tipos de cargas en operación, por lo que se espera que se presenten mayormente perturbaciones en sectores industriales.

A continuación, se muestra en la Tabla 1 los reclamos que se notificaron por los clientes según una encuesta realizada por la iniciativa de calidad de energía Leonardo (LQPI), de esta encuesta se observó que en los sectores industriales las perturbaciones más comunes eran las caídas de voltaje. Por otro lado, las distorsiones armónicas se presentaban mayormente en sectores comerciales [7]. Considerando lo anterior, tiene sentido pensar que en sectores industriales al existir cargas eléctricas de mayor consumo su conexión o desconexión de la red eléctrica afectara al voltaje provocando caídas o subidas de tensión. Por otro lado, en el sector comercial usualmente predominan cargas no lineales, por ejemplo, grandes sistemas de iluminación y computadores que provocan distorsiones armónicas.

Tabla 1: reclamos notificados por los clientes en EU-8 según encuesta de LPQI [7].

Problemas detectados	Dispositivos afectados	Problema de calidad de energía informado
Bloqueos informáticos y pérdidas de datos.	Computadores y elementos electrónicos sensibles al cambio de voltaje.	Presencia de corriente de fuga a tierra que provoca pequeñas caídas de tensión en los conductores de tierra.
Perdida de sincronización en equipos de procesamiento.	Medidas sensibles de equipos de control de procesos.	Distorsión armónica severa que crea cruces por cero adicionales dentro de un ciclo de la onda sinusoidal.
Computadoras y electrónicos dañados.	Dispositivos electrónicos como computadoras, reproductor de DVD, etc.	Rayo o una sobretensión de conmutación.
Luces parpadeantes.	Parpadeo o atenuación de los dispositivos de iluminación.	Cambios rápidos de voltaje que provocan un parpadeo de la luz visible.
Mal funcionamiento de motores. Calentamiento adicional, disminución de la eficiencia operativa y envejecimiento prematuro de los equipos.	Motores y dispositivos de proceso.	Presencia de armónicos de tensión y corriente en la fuente de alimentación.
Disparo de dispositivos de protección.	Relés, disyuntores y contactores.	Forma de onda de voltaje distorsionada debido a caída de voltaje.
Interferencia de ruido a líneas de telecomunicaciones.	Sistemas de telecomunicaciones.	Ruido eléctrico que provoca señales de interferencia.

4.4. Definición y formas de cálculo de índices de calidad estipulados en la norma técnica

Tras definir los orígenes de las perturbaciones eléctricas y el tipo de fenómenos eléctricos que se presentan en los sistemas eléctricos, se procede a realizar un estudio de la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución, en adelante e indistintamente “NTCSSD”.

En esta NTCSSD se establecen índices y alteraciones de calidad de producto mostrados en la Ilustración 1 que regulan, entre otros, las fluctuaciones de tensión, distorsiones armónicas y factor de potencia, estableciendo límites que se deben cumplir en cada sistema eléctrico para que la calidad de energía no se vea afectada y comprometa los equipos eléctricos conectados, reduciendo su vida útil o dañándolos completamente.

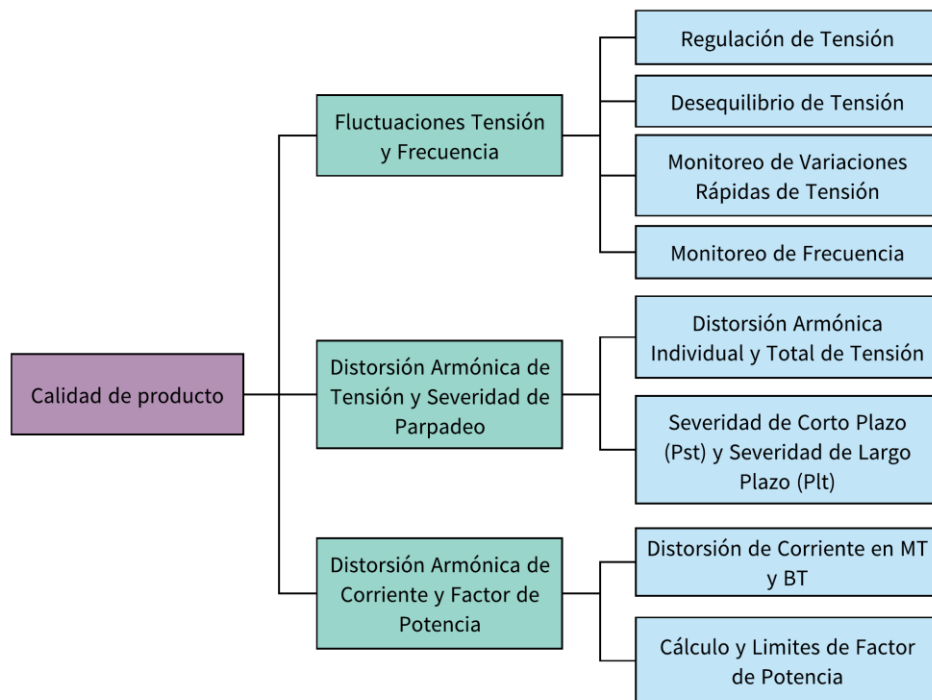


Ilustración 1: Índices de calidad según la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución.

A continuación, se verán algunas de las perturbaciones eléctricas mostradas en la Ilustración 1, las cuales se estudian para conocer el estado de la calidad de energía de la Universidad de O'Higgins. Se define en que consiste cada perturbación eléctrica, indicando los límites y formas de medir cada variable, además para el análisis de algunas perturbaciones se desprenden índices de calidad, para los cuales se muestra su forma de cálculo. Además, para

cada perturbación se presentan sus causas de aparición y los efectos que pueden llegar a provocar en el sistema eléctrico si estas sobrepasan los límites establecidos.

4.4.1. Regulación de tensión

Este indicador describe la capacidad que posee un sistema para proporcionar voltaje sin variaciones entre una fuente y una carga, es decir, se medirá la variación de voltaje ante una amplia gama de condiciones de carga. En la práctica, los voltajes de la línea de transmisión disminuyen cuando se cargan mucho y aumentan cuando se cargan ligeramente [8]. La comisión nacional de energía [9] para evaluar la regulación de tensión en un punto de la Red de Distribución utiliza la ecuación (1).

$$\Delta V_k = \frac{|V_k - V_n|}{V_n} \cdot 100 \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

- ΔV_k : Regulación de Tensión en el punto k, en [%].
- V_k : Tensión de suministro en el punto k, determinada como el promedio de las medidas en un intervalo de 15 minutos, en [kV].
- V_n : Tensión Nominal en el punto k, en [kV].

Durante estado normal y el 95% del tiempo de cualquier semana del año o de siete días consecutivos de medición y registro, los valores de tensión medidos excluyendo períodos con interrupciones de suministro deberán estar dentro del rango de $\pm 7.5\%$, ya que se define una densidad de red para Rancagua de alta. La NTCSSD plantea los límites mostrados en la Tabla 2 para evaluar la regulación de tensión.

Tabla 2: límites para regulación de tensión [9].

Tensión de la red/Densidad de la red	Alta y Media	Baja y Muy Baja
Baja tensión	$\pm 7,5 \%$	$\pm 10 \%$
Media tensión	$\pm 6 \%$	$\pm 8 \%$

4.4.2. Desequilibrio de tensión y corriente

Si se considera un sistema eléctrico trifásico ideal, este será balanceado cuando las tres tensiones de fase o de línea tengan igual magnitud y sus fases se encuentren a 120° entre sí, en cualquier otro caso se considerará que existe desequilibrio de tensión [10]. En la práctica existe un gran dinamismo entre las cargas que se conectan y desconectan a la red, por lo que, se tendrá constantes variaciones en el balance de las tensiones provocando así los desequilibrios de tensiones. De igual forma este tipo de problema se puede extender a la corriente, ya que si se presentan consumos diferentes en las fases se producirán desequilibrios de corriente. Cabe destacar que estos problemas de calidad se presentan únicamente en sistemas polifásicos, tal como lo son los sistemas trifásicos y bifásicos.

La Ilustración 2 muestra como las formas de onda de voltaje poseen diferente amplitud y ángulo de fase indicando claramente que es un sistema desbalanceado. Algunos de los motivos por los que se provocan desequilibrios en las magnitudes de las fases son por el uso de cargas desequilibradas y cargas monofásicas que se distribuyen de forma desigual en circuitos trifásicos.

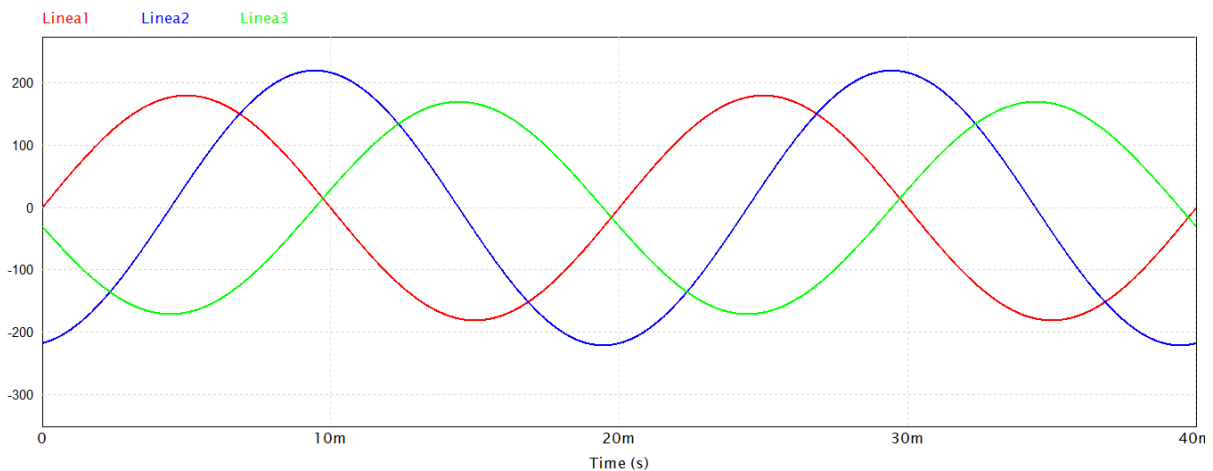


Ilustración 2: sistema trifásico presentando desequilibrios de tensión.

Para llevar a cabo el análisis de los sistemas desbalanceados, es necesario hacer uso del método de las componentes simétricas, el cual se basa en el Teorema de Fortescue. En este Teorema Charles LeGeyt Fortescue establece que cualquier sistemas desbalanceado de n fases relacionados puede expresarse como una combinación lineal de n sistemas simétricos de n

fasores [10]. Considerando los sistemas trifásicos, el Teorema de Fortescue dice que cualquier sistema desequilibrado puede ser descrito como la suma de tres sistemas fasoriales simétricos, es decir, un sistema de secuencia cero (homopolar), un sistema de secuencia 1 (secuencia positiva) y un sistema de secuencia 2 (secuencia negativa), en donde estos corresponden a los mostrados en la Ilustración 3.

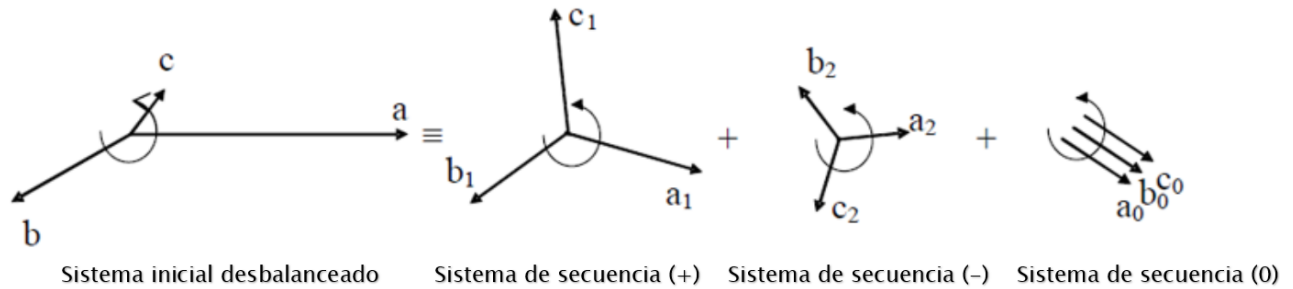


Ilustración 3: componentes simétricas de un sistema trifásico desequilibrado [11].

Para aplicar este método primero se debe referenciar cada una de las fases a una de ellas, tomándola como fase de referencia. Posteriormente usar el operador llamado “a” que es un vector unitario para rotar 120° , tal como se muestra en la expresión (2).

$$\begin{aligned}
 a &= 1 \angle 120^\circ \\
 a^2 &= 1 \angle 240^\circ
 \end{aligned}
 \tag{ecs. 2}$$

Si cada fase se descompone como la suma de una componente positiva, negativa y cero, se obtiene lo mostrado en (3).

$$\begin{aligned}
 V_1 &= V_1^0 + V_1^+ + V_1^- \\
 V_2 &= V_2^0 + V_2^+ + V_2^- \\
 V_3 &= V_3^0 + V_3^+ + V_3^-
 \end{aligned}
 \tag{ecs. 3}$$

Tomando como fase de referencia V_1 y luego reemplazando el operador “a” se obtiene las expresiones de (4)

$$\begin{aligned}
 V_2^+ &= V_1^+ \cdot 1 \angle 240^\circ = V_1^+ a^2 & V_2^- &= V_1^- \cdot 1 \angle 120^\circ = V_1^- a & V_2^0 &= V_1^0 \\
 V_3^+ &= V_1^+ \cdot 1 \angle 120^\circ = V_1^+ a & V_3^- &= V_1^- \cdot 1 \angle 240^\circ = V_1^- a^2 & V_3^0 &= V_1^0
 \end{aligned}
 \tag{ecs. 4}$$

Al reemplazar las expresiones de (4) en (3) se obtienen las siguientes ecuaciones referenciadas a la primera fase:

$$V_1 = V_1^0 + V_1^+ + V_1^-$$

$$V_2 = V_1^0 + V_1^+ a^2 + V_1^- a$$

$$V_3 = V_1^0 + V_1^+ a + V_1^- a^2$$

Al reescribir el sistema de ecuaciones obtenido anteriormente en forma matricial, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^0 \\ V_1^+ \\ V_1^- \end{bmatrix}$$

Luego despejando las componentes simétricas se obtiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_1^0 \\ V_1^+ \\ V_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

Finalmente se tienen las siguientes ecuaciones para determinar las componentes de secuencia.

$$V_1^0 = \frac{V_1}{3} + \frac{V_2}{3} + \frac{V_3}{3}$$

$$V_1^+ = \frac{V_1}{3} + \frac{aV_2}{3} + \frac{a^2V_3}{3} \quad (\text{ecs. 5})$$

$$V_1^- = \frac{V_1}{3} + \frac{a^2V_2}{3} + \frac{aV_3}{3}$$

La Tabla 3 muestra los problemas y efectos presentados debido a la existencia de desbalances de voltaje y corrientes.

Tabla 3: efectos generados debido aparición de desbalances de voltaje y corriente [12].

Componente	Problema	Efecto
Maquina eléctrica	Componentes de secuencia negativa generan campos rotacionales en dirección opuesta a la rotación del motor, por ende, se tendrá un par opuesto del motor.	Aumento de temperatura en devanados de máquinas asíncronas como de inducción, pérdida de eficiencia.
Rectificador	Aparición de armónicos triples.	Calentamiento excesivo de diodos y reducción de vida útil de condensadores.
Cableado	Aumento de corriente en la línea neutra.	Aumento de pérdidas y disminución de la eficiencia del sistema.

La Comisión nacional de energía [9] para evaluar el desequilibrio de tensión existente en el sistema eléctrico, utiliza el indicador de la norma EN50160–2015 mostrado en la expresión (6).

$$\%VUF = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| \cdot 100 \quad (\text{ec. 6})$$

Donde:

- V^- : Componente de secuencia negativa de la tensión en [V].
- V^+ : Componente de secuencia positiva de la tensión en [V].

Según la NTCSSD en un sistema trifásico para considerarlo en estado normal, el 95% de los valores medidos en intervalos promediados de 15 minutos no deben superar el 2%, tal como se muestra en la Tabla 4, puesto que cuando se trabaja con variaciones mayores a este porcentaje, se pueden producir daños a los equipos eléctricos y electrónicos especialmente transformadores trifásicos y a motores, los principales problemas que se pueden generar son: sobrecalentamiento ruido anormal, vibraciones excesivas y reducción de la vida útil.

Tabla 4: límites para desequilibrio de tensión [9].

Densidad de la red	Alta y media	Baja y Muy baja
Límite desequilibrio de tensión	2%	3%

Para evaluar los desequilibrios de corriente, en [13] se define el indicador Current Unbalance Factor (CUF), el cual posee una definición similar al VUF mostrado en la ecuación (6).

$$\%CUF = \left| \frac{I^-}{I^+} \right| \cdot 100 \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

- I^- : Componente de secuencia negativa de la corriente en [A].
- I^+ : Componente de secuencia positiva de la corriente en [A].

El índice CUF a diferencia del VUF no se encuentra estandarizado, por lo que para considerar un sistema trifásico en estado normal, en la práctica se sugiere que este índice el 95% de los valores medidos cada 10 minutos no deben superar el 10% [13].

Por otro lado, se debe tener en cuenta que los indicadores mostrados en las ecuaciones (6) y (7) solo cuantifican el desbalance en magnitud y no en sus fases, por lo que para cuantificar sus fases, en [14] se definen los indicadores Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF) y Complex Current Unbalance Factor (CCUF). La forma de cálculo del CVUF y CCUF se muestra en la ecuación (8) y la ecuación (9) respectivamente.

$$CVUF = \frac{V^- \angle \theta^-}{V^+ \angle \theta^+} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| \angle \theta_V \quad (\text{ec. 8})$$

Donde

- $\left| \frac{V^-}{V^+} \right|$: corresponde a la magnitud de CVUF.
- $\theta_V = (\theta^- - \theta^+)$: corresponde al ángulo de fase de CVUF.

$$CCUF = \frac{I^- \angle \theta^-}{I^+ \angle \theta^+} = \left| \frac{I^-}{I^+} \right| \angle \theta_I \quad (\text{ec. 9})$$

Donde

- $\left| \frac{I^-}{I^+} \right|$: corresponde a la magnitud de CCUF.
- $\theta_I = (\theta^- - \theta^+)$: corresponde al ángulo de fase de CCUF.

4.4.3. Monitoreo de variaciones rápidas de tensión

Interrupciones. Las interrupciones de corta duración corresponden a las que el nivel de suministro de tensión es inferior al 10% del valor nominal, llegando a tener una duración de hasta 1 minuto. Además, estas se subdividen en: instantáneas (1/2 a 30 ciclos), momentáneas (30 ciclos a 3 segundos) y temporales (3 segundos a 1 minuto) [15]. Por lo general, cuando se presentan las interrupciones, el sector donde se produjo el evento será afectado con apagones, disparo de protecciones, pérdidas de datos, retraso de producción, etc.

Las causas de estas pueden variar, pero generalmente son el resultado de algún tipo de daño en la red de suministro eléctrico, debido a caídas de rayos, árboles, accidentes vehiculares, condiciones atmosféricas destructivas o falla de los equipos de protección de la red eléctrica

como el disparo del disyuntor básico [16]. En la Ilustración 4 se muestra el comportamiento típico de una forma de onda al existir una interrupción.

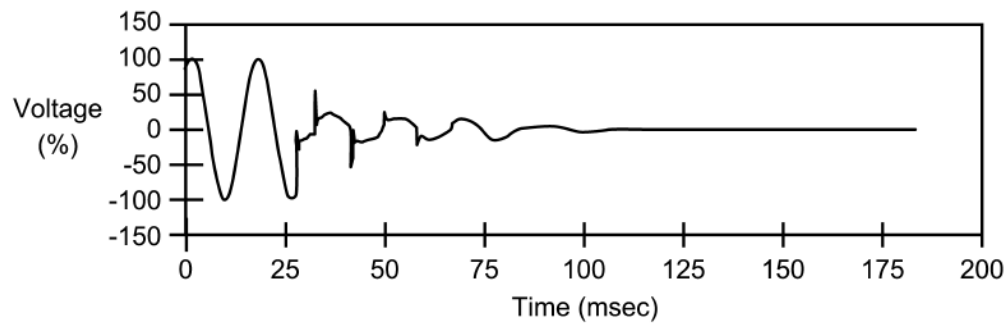


Ilustración 4: presencia de interrupción en señal de voltaje [15].

Hueco de tensión. Estos corresponden a una reducción en la magnitud de la tensión entre el 10 y 90 por ciento del valor nominal, teniendo duraciones de 1/2 ciclo a 1 minuto. En donde la duración del hueco de tensión se subdivide en instantánea (1/2 ciclo a 30 ciclos), momentánea (30 ciclos a 3 segundos) y temporal (3 segundos a 1 minuto) [15]. A las cargas eléctricas sensibles a caídas de tensión se les reducirá considerablemente su vida útil dañando componentes internos y en el peor de los casos destruyéndolos completamente, como variadores de velocidad y equipos de procesamiento de datos y control. Además, pueden sufrir pérdidas de datos y permanecer un tiempo de inactividad prolongado.

Las causas principales que ocasionan estos eventos son la conexión y arranque de grandes cargas eléctricas, bancos de baterías desconectándose y/o fallas en otros sectores de la red eléctrica. La Ilustración 5 muestra como se ve un hueco de tensión típico.

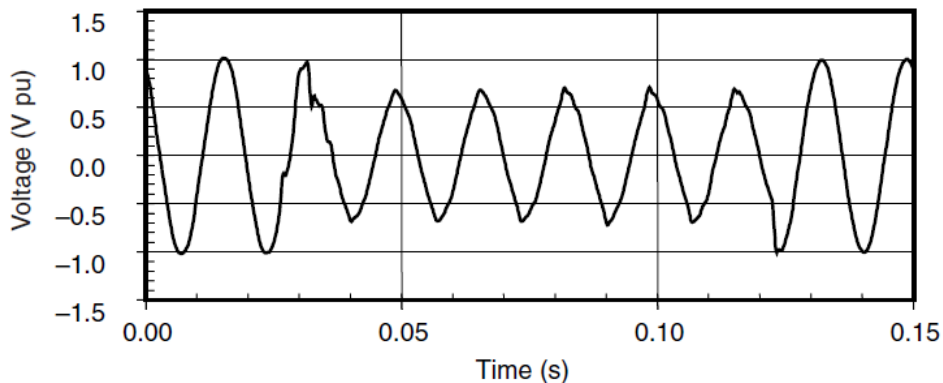


Ilustración 5: presencia de huecos de tensión [16].

Sobretensión. Se establece que las sobretensiones corresponden a un aumento momentáneo en la tensión eficaz, con valores superiores al 110% del valor nominal. Este tipo de eventos posee duraciones correspondientes a 1/2 ciclo hasta 1 minuto [15]. Cuando se producen las sobretensiones hay que tener especial cuidado, ya que, en caso de ser de gran magnitud los circuitos eléctricos puede destruirse completamente y en el peor de los casos las partes aislantes de los conductores se pueden degradar y producir incendios.

La Ilustración 6 muestra la forma de onda típica de cuando se produce una sobretensión, la cual puede ser ocasionada debido a conexiones neutras de alta impedancia, las desconexiones repentinas de grandes cargas y la conexión de banco de capacitores.

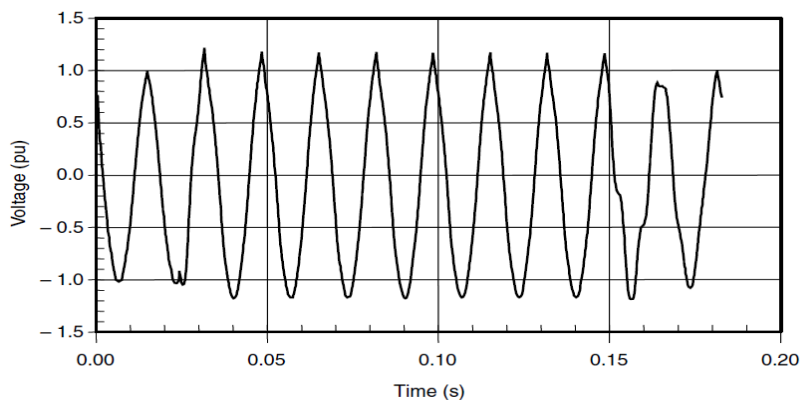


Ilustración 6: presencia de sobretensión en señal de tensión [16].

4.4.4. Monitoreo de frecuencia

Se establece que el valor nominal de la frecuencia en Chile es de 50 Hz teniendo en cuenta que la frecuencia en un sistema de suministro depende de la interacción entre los generadores y la carga [17]. En relación con lo anterior, para considerar en estado normal la frecuencia, la generación debe estar siempre al mismo nivel de la carga que suministra. Esta podría variar cuando exista un desequilibrio entre la generación y la carga, es decir, si la generación es superior a la carga, la frecuencia aumenta, de lo contrario la frecuencia disminuye.

Cuando se presentan variaciones de frecuencia en el sistema eléctrico provocara que el funcionamiento de algunos equipos como los motores eléctricos se vean afectados debido a cambios en su frecuencia de rotación. Por otra parte, al verse reducida la frecuencia de operación, la vida útil de equipos como los transformadores se verá reducida debido a un aumento en la corriente de magnetización y al aumento de temperatura [18].

Las Empresas Distribuidoras deberán monitorear la frecuencia de la tensión de suministro, para lo cual, deberán medir y registrar la frecuencia en la Cabecera de los alimentadores, promediada en intervalos de 15 minutos, identificando si la frecuencia se encuentra dentro de los intervalos mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: intervalos para registrar las variaciones de frecuencia [9].

Estado de la frecuencia	Intervalo de frecuencia [Hz]
Sub-frecuencia Extrema	$f < 47,0$
Sub-frecuencia	$47,0 \leq f < 49,5$ Hz
Normal	$49,5 \leq f < 50,5$ Hz
Sobre frecuencia	$50,5 \leq f < 52,0$
Sobre frecuencia Extrema	$52,0 \leq f$

4.4.5. Distorsión armónica

Un problema muy común en las redes eléctricas que afectan la calidad de energía es la deformación de onda, debido al fenómeno llamado distorsión armónica. Este se presenta cuando las formas de onda de tensión o corriente se desvían de una forma de onda sinusoidal pura, debido a la característica V-I no lineal de equipos como luces led, computadores, impresoras,

variadores de frecuencia y entre otros equipos que se encuentran conectados a la red [19]. Esto quiere decir que cuando se presenta esta relación no lineal al aplicar una tensión senoidal la carga no lineal absorberá corriente no senoidal induciendo corrientes armónicas.

En un sistema eléctrico, un armónico es una tensión o corriente sinusoidal que posee frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema, para el caso de Chile, la frecuencia fundamental corresponde a 50 Hz [20]. Esto significa que, para este sistema, las frecuencias armónicas son 100 Hz (segundo armónico), 150 Hz (tercer armónico), etc.

Gracias al teorema de Fourier, el cual establece que cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en una suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental o de referencia [21]. Por ejemplo, al utilizar este teorema se puede descomponer la onda distorsionada de la Ilustración 7 en sumas de senos y cosenos.

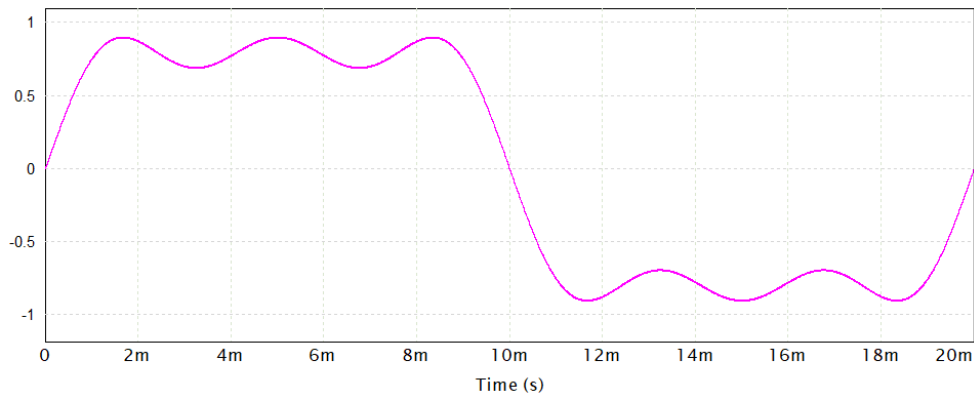


Ilustración 7: forma de onda senoidal con contenido armónico.

Series de Fourier. El modelo matemático según Fourier para el análisis de una señal periódica no senoidal implica la forma trigonométrica de la serie de Fourier mostrada en la ecuación (10), la cual contiene un término constante y un número infinito de términos seno y cosenos.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad (\text{ec. 10})$$

Donde

- n: corresponde al orden de la armónica.
- T: corresponde al periodo de la forma de onda.

La ecuación (10) contiene los términos a_0 , a_n y b_n y estos coeficientes se calculan como se muestra en las expresiones (11).

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt$$

(ecs. 11)

El término a_0 corresponde al valor promedio. Luego los términos a_n y b_n corresponden a los coeficientes de la serie para la n -ésima armónica. Además, si la función $f(t)$ es impar contendrá solo términos seno, es decir, la componente a_n será cero, de lo contrario si la función es par tendrá componente coseno, haciendo cero a la componente b_n .

Orden de los armónicos. El orden del armónico se determina a partir del número de veces que la frecuencia del armónico analizado es mayor que la frecuencia fundamental. Tomando como ejemplo la Ilustración 8, se puede ver que el tercer armónico tiene tres veces la frecuencia que la componente fundamental; el quinto armónico tiene cinco veces la frecuencia que la componente fundamental, lo que sucede de igual forma para los demás armónicos.

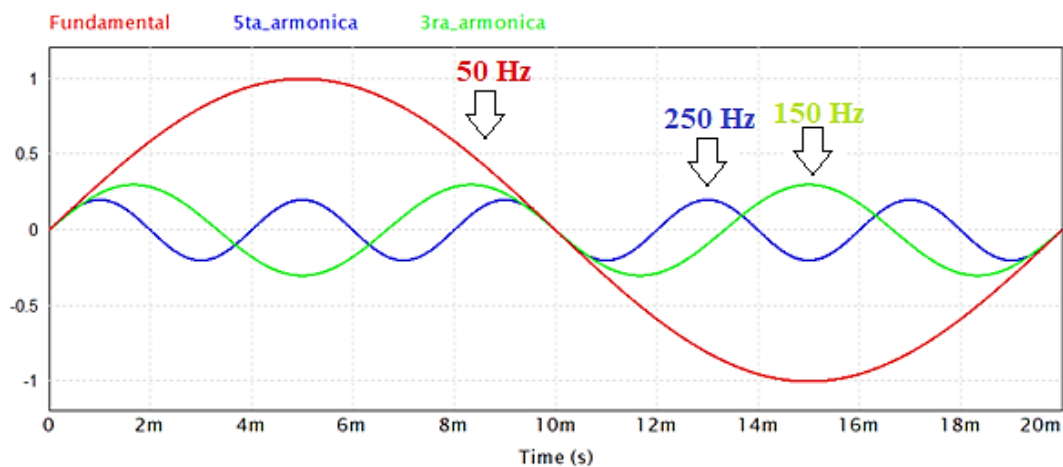


Ilustración 8: señal de tensión fundamental con señales armónicas.

Secuencia de armónicos. Los armónicos eléctricos se pueden diferenciar en tres tipos de secuencia, es decir, los armónicos secuencia positiva de orden $(3n+1)$, secuencia negativa de orden $(3n-1)$ y los de secuencia homopolar de orden $(3n)$, esta secuencia armónica se refiere a la rotación fasorial de los voltajes y corrientes armónicas con respecto a la forma de onda fundamental [22]. Por ejemplo, en los sistemas trifásicos balanceados en condiciones normales, su secuencia de fases es positiva (A, B, C). La Tabla 6 muestra la secuencia armónica correspondiente hasta el 10° armónico.

Tabla 6: secuencia armónica.

Orden armónico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frecuencia [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Los armónicos de secuencia negativa producen un efecto mecánico con sentido contrario al de la fundamental creando un par negativo en los motores que funcionan con suministro trifásico, esto provoca calentamientos y reducción de vida útil de las componentes internas del motor [23]. Por el contrario, los armónicos con secuencia positiva producen un efecto mecánico con mismo sentido al de la fundamental creando un par positivo en los motores que funcionan con suministro trifásico, esto provoca sobrecalentamientos en transformadores y cables [22]. A diferencia de lo anterior, cuando se tiene instalaciones eléctricas con neutro, los armónicos de secuencia cero provocaran que fluya corriente en el cable neutro, esto significa que dicho cable debe estar sobredimensionado, ya que, es posible que circule una corriente igual o superior a la encontrada en las fases.

Origen de los armónicos. Hoy en día la electrónica de potencia se encuentra presente en la mayor parte de dispositivos que se utilizan diariamente, los cuales hacen uso de elementos semiconductores que debido a sus características no lineales generan armónicos, ejemplos típicos son: sistemas de iluminación, computadores, electrodomésticos (aparatos de TV, microondas, hornos eléctricos, entre otros) [19].

Con la masificación de dispositivos con características no lineales la distorsión armónica se ha vuelto un problema común en casi todos los sectores de consumo eléctrico. En los sectores educacionales, por lo general, se encuentran distorsiones armónicas provocadas por grupos de cargas de baja potencia, pero en grandes cantidades. A continuación, se presenta la Tabla 7, en donde se muestra algunas de las fuentes más comunes de armónicos y en qué tipo de instalación eléctrica se pueden encontrar.

Tabla 7: fuentes de armónicos y su ubicación.

Elemento	Ubicación
Máquinas de climatización	Cualquier tipo de instalación
Cámaras frigoríficas	Industrias alimenticias, farmacéuticas
Sistemas de bombeo	Estaciones de bomba, industrias
Sistemas de automatización y control	Industria
Gran porción de equipos de oficinas	Oficinas, centros comerciales
Iluminación LED	Cualquier tipo de instalación
Variadores de velocidad	Industria
Cargas trifásicas: motores de velocidad variable, sistemas UPS	Industria

Efectos de los armónicos. Una vez definida algunas de las fuentes generadoras de armónicos, se procede a mostrar los efectos que pueden llegar a provocar en los sistemas eléctricos tener un alto nivel de armónicos en el sistema. En la Tabla 8 se resumen algunos de los principales problemas causados por los armónicos en las instalaciones eléctricas.

Tabla 8: efectos y problemas generados por armónicos en componentes de una instalación [24].

Componente	Problema	Efecto
Conductor	-Corrientes superiores a la admisible por el calibre.	-Calentamiento excesivo del conductor. -Disparo de protecciones.
Conductor de neutro	-Retorno de corrientes armónicas múltiplos de 3 por el conductor de neutro.	-Calentamiento excesivo del conductor. -Degradación prematura del neutro. -Disparo de protecciones.
Motor	-Circulación de corrientes armónicas por los devanados.	-Disminución de rendimiento. -Vibraciones en el eje provocando desgaste mecánico.

Transformador	-Circulación de corrientes armónicas por los devanados.	-Aumento de temperatura reduciendo su vida útil. -Aumento de pérdidas por histéresis y corrientes Foucault.
Condensador	-Resonancia en paralelo con impedancia del transformador y cableado de la instalación. - Aumento de consumo de corriente de condensadores.	- Aumento de THD _V para toda la instalación. - Envejecimiento prematuro de condensadores. -Destrucción de condensadores.

Cálculo de índices de calidad para armónicos. Para analizar y evaluar los niveles de armónicos que se encuentran presentes en la red eléctrica del campus Rancagua de la Universidad de O'Higgins se presentan los índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónica en las ondas de tensión y corriente.

El índice de calidad de distorsión armónica individual en tensión (DV_j), definido de acuerdo con la norma pertinente de calidad de servicio para sistemas de distribución [9], se calcula como se muestra en la ecuación (12).

$$DV_j = \frac{V_j}{V_1} \cdot 100 \quad (\text{ec. 12})$$

Donde:

- V_j : Tensión de la j -ésima armónica de la tensión de suministro, en [kV].
- V_1 : Tensión de la componente fundamental de la tensión de suministro, en [kV].

En estado normal y durante el 95% del tiempo de una semana de medición, los valores eficaces de cada tensión armónica individual promediados durante intervalos de 15 minutos, han de ser iguales o estar por debajo de los valores indicados en la Tabla 9.

Tabla 9: armónicos de voltaje según NTCSSD [9].

Armónicas impares no múltiplos de 3		Armónicas impares múltiplos de 3		Armónicas Pares	
orden	armónica tensión (%)	orden	armónica tensión (%)	orden	armónica tensión (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5

13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
>25	1.5				

La distorsión Armónica total de tensión (THD_V) corresponde a la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Para el cálculo de este índice de calidad, en [9] se determina mediante la expresión de la ecuación (13).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} V_j^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (\text{ec. 13})$$

Donde:

- V_j : Tensión de la j-ésima armónica de la tensión de suministro, en [kV].
- V₁ : Tensión de la componente fundamental de la tensión de suministro, en [kV].

En estado normal y durante el 95% del tiempo de una semana de medición, los valores eficaces de la tensión promediados durante intervalos de 15 minutos deberán ser tales que el THD_V máximo no supere el 5%, tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: límites de distorsión armónica en voltaje [25].

Niveles de tensión en la acometida (V _n)	Distorsión armónica individual [%]	Distorsión armónica total THD _V [%]
V _n ≤ 1 kV	5.0	8.0
1 kV < V _n ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V _n ≤ 161 kV	1.5	2.5
V _n > 161 kV	1.0	1.5

El índice de calidad de distorsión armónica individual en corriente (DI_j), definido de acuerdo con la norma pertinente de calidad de servicio para sistemas de distribución [9], se determina mediante la expresión de la ecuación (14).

$$DI_j = \frac{I_j}{I_1} \cdot 100 \quad (\text{ec. 14})$$

Donde:

- I_j : corriente de la j -ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].
- I_1 : corriente de la componente fundamental de la corriente de suministro, en [A].

En estado normal y durante el 95% del tiempo de una semana de medición, los valores eficaces de cada corriente armónica individual promediados durante intervalos de 15 minutos, han de ser iguales o estar por debajo de los valores indicados en la Tabla 12.

Para evaluar la distorsión armónica en corriente, en [9] se utiliza el índice de distorsión armónica total de corriente (THD_I), el cual viene dado por la ecuación (15).

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} I_j^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (\text{ec. 15})$$

Donde:

I_j : j -ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].

I_1 : Componente fundamental de la corriente de suministro, en [A].

En estado normal y durante el 95% del tiempo de una semana de medición, los valores eficaces de la corriente inyectada o consumida por un usuario promediados durante intervalos de 15 minutos deben ser tales de cumplir con los límites de la Tabla 12, pero tal como se ve en esta tabla los valores están en porcentaje de la carga total. Esto sucede dado que, para evaluar la distorsión armónica con este índice resulta un poco complicado, ya que un THD bajo durante una carga alta puede tener un mayor impacto en el sistema que un THD alto durante una carga baja definiendo límites del 20% para el THD de corriente [26].

Para evaluar la distorsión armónica la IEEE 519 [27] define un índice de calidad llamado distorsión de demanda total (TDD) mostrado en la ecuación (16), el cual se usa para tipificar corrientes armónicas de manera consistente. Este índice se asemeja a la distorsión armónica total (THD) exceptuando que la distorsión de demanda total se expresa en porcentaje de la corriente de carga máxima, en lugar de como un porcentaje de la magnitud de la corriente fundamental.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} I_j^2}}{I_L} \cdot 100 \quad (\text{ec. 16})$$

Donde:

- I_j : magnitud de la j -ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].
- I_L : corresponde al promedio de los máximos valores efectivos de la componente fundamental de la corriente/inyección de un usuario en [A], medidos en el punto común de conexión correspondiente.

En Estado Normal y durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la corriente consumida o inyectada por un Usuario conectado en MT, medidos en el PCC y promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la distorsión armónica cumpla con los límites fijados en la Tabla 12.

Cabe destacar que existen aparatos de medida que no calculan el parámetro TDD para analizar cómo se comporta, por lo que en la NTCSSD [9] se explica cómo se pueden utilizar las expresiones (17) para calcular este índice de forma manual.

$$TDD_j = THD_j \cdot \frac{I_1}{I_L} \quad (\text{ecs. 17})$$

$$TDD_j = THD_j \cdot \frac{I_{RMS}^j}{I_L \cdot \sqrt{1 + THD_j^2}}$$

Donde:

- THD_j : valor de la j -ésima de armónica de corriente, en [%].
- I_{RMS}^j : j -ésima armónica de la corriente RMS, en [A].
- I_L : Corresponde al promedio de los máximos valores efectivos de la componente fundamental de la corriente de carga/inyección de un Usuario en [A], medidos en el PCC correspondiente.

4.4.6. Severidad de parpadeo (Flicker)

El fenómeno llamado Flicker se identifica cuando en una fuente de luz se tiene la impresión o sensación de que hay cambios rápidos y repetidos en el brillo de la luz en el tiempo [28]. Este parpadeo en la fuente de iluminación se debe a fluctuaciones en la tensión, provocando malestares en las personas que lo presencian.

Las fluctuaciones de tensión que provocan los Flicker corresponden a una variación brusca de este parámetro con amplitudes que no exceden el 10% del voltaje nominal. Estas variaciones de voltaje no presentan grandes riesgos en las mayorías de los equipos eléctricos conectados, sin embargo, el principal efecto que provoca esta variación corresponde al parpadeo de algunas fuentes de iluminación.

Los efectos negativos en la salud provocados por el Flicker van desde molestias significativas como cansancio, migrañas o incluso hasta ataques epilépticos. Cuando se tiene niveles visibles de Flicker de alrededor 3 y 70 Hz es cuando aparecen estos malestares [28]. La visión humana es capaz de captar frecuencias de Flicker alrededor de los 0.5 a los 30 Hz, para una frecuencia de red de 50 Hz y tensión nominal de 230 V, pero al ser un fenómeno fisiológico esto dependerá de la persona.

En particular las fluctuaciones de voltaje se encuentran estrechamente relacionadas con la potencia de la carga, pues cargas fluctuantes como hornos de arco, soldadores, molinos trituradores, etc., la demanda de potencia experimenta variaciones amplias y rápidas, que afectan a la tensión en la red produciendo estos parpadeos.

Para efectos de la evaluación de la calidad, en cuanto al Flicker, se considera el índice de Severidad por Flicker de Corta Duración, en intervalos de medición de 15 minutos, definido de acuerdo con la norma pertinente de calidad de servicio para sistemas de distribución [9], la cual a su vez hace uso de la norma IEC 61000-4-15:2010. Este índice de calidad se calcula mediante la ecuación (18),

$$P_{St} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_{15} + 0,0657 \cdot P_{35} + 0,28 \cdot P_{105} + 0,08 \cdot P_{505}} \quad (\text{ec. 18})$$

Donde los percentiles $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} corresponden a los niveles de Flicker excedidos a lo largo del 0,1;1;3;10 y 50% del tiempo observación. El sufijo s en la formula indica que debería usarse el valor aislado, los cuales se obtienen usando las expresiones (19).

$$\begin{aligned}
 P_{50s} &= \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3} \\
 P_{10s} &= \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5} \\
 P_{3s} &= \frac{P_{2,2} + P_3 + P_4}{3} \\
 P_{1s} &= \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3}
 \end{aligned}
 \tag{ecs. 19}$$

Se considera el índice de Severidad por Flicker de larga Duración, en intervalos de medición de 2 horas. Este índice de calidad se determina mediante la ecuación (20).

$$P_{lt} = \frac{1}{12} \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} P_{st_i}^3}
 \tag{ec. 20}$$

Para la Regulación del índice de severidad del Flicker P_{st} y P_{lt} en el punto de medición respectivo, estos deben ser tales de no superar los límites indicados en la Tabla 11, ya que se consideran como el nivel máximo en el que una persona es capaz de soportar un parpadeo sin molestias significativas para la visión. Cabe destacar que P_{st} y P_{lt} son unidades de medida del Flicker y no tienen dimensiones.

Tabla 11: límites para índices de severidad de parpadeo o Flicker [29].

Densidad de la red	Pst (15 minutos)	Plt (2 horas)
Alta y Media	1.0	0.8
Baja y Muy Baja	1.25	1.0

4.4.7. Factor de potencia

Antes de referirse al factor de potencia es necesario conocer que es la potencia activa, la potencia aparente y la potencia reactiva. La primera se expresa en (kW) y corresponde a la potencia que sirve para producir trabajo. La potencia reactiva se expresa en (kVAR) y corresponde a la potencia que no produce trabajo y se debe a inductores y capacitores. En cuanto a la potencia aparente, esta se expresa en (kVA) y es el resultado del producto de la tensión por la corriente, además es la suma vectorial de las dos potencias antes mencionadas [30].

El factor de potencia es un indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica y se asocia al cociente de la relación de la potencia activa entre la potencia aparente, este parámetro puede tomar valores entre 0 y 1. El Angulo formado entre la potencia activa y la potencia aparente mostrado en la Ilustración 9 corresponde al desfase entre la señal de corriente y tensión. Cuando se tienen condiciones ideales de suministro, es decir, sin distorsiones armónicas el $\cos(\theta)$ es igual al factor de potencia.

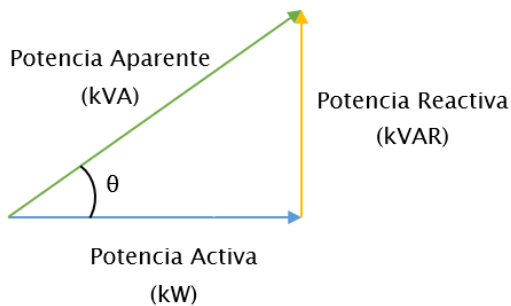


Ilustración 9: triángulo de potencias.

Cuando se tiene cargas mayormente resistivas el factor de potencia se encontrará cerca de la unidad, caso contrario sucede cuando existen cargas reactivas, pues el factor de potencia será menor que la unidad. Mientras más bajo es el factor de potencia, mayor es el valor de la potencia reactiva encareciendo así el suministro de potencia. Cuando se tiene un buen factor de potencia implicará evitar realizar sobredimensionamientos en conductores, reducción de caídas de tensión y existirá un aumento de potencia disponible [30].

Para evaluar este índice de calidad, según la NTCSSD [9] primero se debe calcular un factor de potencia instantáneo tal como sigue:

$$FP_{inst} = \cos \left(\arctg \left(\frac{EQ_{inst}}{EP_{inst}} \right) \right) \quad (\text{ec. 21})$$

Donde:

- FP_{inst} : Factor de Potencia en intervalo de 15 minutos.
- EQ_{inst} : Energía reactiva en intervalo de 15 minutos, en [kVARh].
- EP_{inst} : Energía activa en intervalo de 15 minutos, en [kWh].

Posteriormente se debe calcular el factor de potencia medio mensual, de acuerdo con la expresión (22).

$$FP = \left(\frac{\sum_{k=1}^n (FP_{inst} \cdot EP_{inst})_k}{\sum_{k=1}^n (EP_{inst})_k} \right) \quad (\text{ec. 22})$$

Donde:

- FP: factor de potencia medio mensual.
- n: número de intervalos de 15 minutos durante el periodo de medición de un mes.

Finalmente, el valor obtenido de la ecuación (22) deberá ser tal que se encuentre en el rango mostrado a continuación:

$$0,95_{cap} \leq FP \leq 0,93_{ind} \quad (\text{ec. 23})$$

Cabe destacar que los clientes residenciales, no deben hacerse cargo de este parámetro, siendo responsabilidad de la Empresa Distribuidora mantener la Calidad del Producto dentro de los límites establecidos.

Hay que tener en cuenta que en sistemas eléctricos que cuentan con distorsiones armónicas, el factor de potencia no es aplicable como tal, ya que, se debe realizar otro análisis utilizando los factores de distorsión y desplazamiento que se muestran en las expresiones (24).

$$FP_{total} = FP_{desplazamiento} \cdot FP_{distorsión}$$

$$FP_{desplazamiento} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (\text{ecs. 24})$$

$$FP_{\text{distorsion}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}}$$

4.5. Normativa

El estudio de calidad de energía de la Universidad de O'Higgins, campus Rancagua se realizará de acuerdo con la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución, la cual para evaluar los diferentes índices de calidad hace uso de las siguientes normas:

4.5.1. EN 50160

Define y describe los valores que caracterizan la tensión de alimentación suministrada, en media y baja tensión en condiciones normales de operación y en el punto de entrega al cliente o usuario final. Los parámetros definidos son: frecuencia de alimentación, amplitud, variaciones de la tensión, variaciones rápidas de la tensión, huecos de tensión, interrupciones, sobretensiones, desequilibrios de tensión, tensiones armónicas e interatómicas.

4.5.2. IEC 61000-4-30

Define los métodos a utilizar y la precisión mínima requerida para medir cada uno de los parámetros eléctricos y así determinar la calidad de suministro eléctrico, con el fin de obtener resultados fiables, repetibles y comparables. Algunos de los parámetros que incluye esta norma son: frecuencia de alimentación, fluctuaciones de tensión, cambios rápidos de tensión, desequilibrio de tensión [31]. Así entonces un equipo se tiene Clase A cuando cumple con la totalidad de la norma. Si hubiera algún punto que no lo cumple, o lo cumple bajo otros criterios, entonces se clasifica como Clase B.

4.5.3. IEEE 519

La norma IEEE 519 recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia, hace referencia principalmente a los armónicos

introducidos por cargas no lineales. En donde existan problemas debido a la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión de tensión, es obligatorio para el suministrador y el consumidor, resolver estos problemas. Por tal motivo el propósito de esta norma es el recomendar límites en la distorsión armónica.

En la Tabla 12 se recomiendan niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de la relación de corto circuito (SCR), además identifica los niveles máximos de distorsión de demanda total (TDD) [25].

Tabla 12: límites de distorsión armónica en corriente [25].

Orden de la armónica j (armónicas impares)						
ISC/IL	3<=j<11	11<=j<17	17<=j<23	23<=j<35	35<=j<50	TDD
j <=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
Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares						

La relación de corto circuito (SCR) mencionada anteriormente, corresponde a una medida de cuantificación que se utiliza para determinar los límites de distorsión de corriente, en la cual se establece la influencia potencial en la distorsión de voltaje del sistema y el tamaño de los clientes [32]. El concepto SCR se define como la relación entre la corriente de corto circuito disponible y la corriente de carga. Esta relación se puede calcular como se muestra en la ecuación (25).

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (\text{ec. 25})$$

Donde

- I_{SC} : corresponde a la corriente armónica en el PCC, en [A].
- I_L : corresponde a la corriente máxima demandada en el PCC, en [A].

Tal como se muestra en la Tabla 12 a medida que aumenta la relación de cortocircuito, aumenta la TDD permitida, esto implica que los límites de distorsión de corriente pueden

aumentar proporcionalmente a la fuerza del sistema, es decir, los límites de distorsión de corriente cambiaran a diferentes niveles de tensión [33].

4.6. Filtros armónicos

Cuando se sobrepasan los límites admisibles en armónicos de corriente o voltaje establecidos en la norma IEEE 519 comienzan a existir problemas de calidad de energía, es por ello que se opta por utilizar filtros armónicos para minimizar la magnitud de los armónicos que se encuentran propagándose en el sistema eléctrico.

Los filtros se pueden definir como circuitos que modifican las señales que pasan a través de él, permitiendo el paso de una determinada banda de frecuencias mientras atenúan todas las señales que no estén comprendidas dentro de esta banda [34]. Existen filtros activos y pasivos. Los filtros pasivos por lo general en su composición utilizan resistencias, inductores y capacitores. Por el contrario, los filtros activos, utilizan transistores o amplificadores operacionales, entre otros componentes. Existen topologías en las que se combinan los filtros activos y pasivos, presentando diferentes tipos combinaciones al cambiar su conexionado, llegando a tener varios tipos de topologías para mitigar perturbaciones como la distorsión armónica y la compensación de potencia reactiva. Es por esto que durante esta sección se tratara solamente el estudio de filtros activos y sus diferentes conexiones.

Los filtros por lo general tienen el objetivo de proporcionar una trayectoria a tierra de baja impedancia para armónicos de voltajes o corrientes, introducir una alta impedancia en serie para bloquear el paso de las corrientes armónicas o inyectar armónicos en oposición de fase a los presentes en la red para cancelarlos [35].

4.6.1. Filtros activos

Los filtros activos son dispositivos de electrónica de potencia capaces de eliminar o reducir armónicos de diferentes frecuencias a la vez, realizar compensaciones de energía reactiva, correcciones de algunos desequilibrios de voltaje o corriente, lo que reducirá pérdidas eléctricas

y mejorara el factor de potencia [35]. La compensación armónica de estos filtros se debe a que están formados por inversores fuente de tensión o corrientes con un adecuado circuito de control, siendo capaz de sensar la información de corrientes y voltaje armónico presente en los alimentadores para inyectarle las tensiones o corrientes armónicas en el mismo instante en que son demandados por la carga [35], [36]. Una de las características fundamentales de estos dispositivos es que tienen una gran capacidad de adaptarse a condiciones de operación cambiantes, por ejemplo adaptarse automáticamente a cualquier tipo de carga, monofásica o trifásica pudiendo ser conectados a cualquier red trifásica con o sin neutro [35].

Los filtros activos pueden ser conectados en serie, paralelo y serie-paralelo. Dependiendo de la conexión que se utilice, su aplicación cambiara en la instalación eléctrica. En la Tabla 13 se muestran las aplicaciones de los filtros activos dependiendo del conexionado que se utilice.

Tabla 13: aplicaciones de los filtros según su conexionado [37].

Filtro en serie	Filtro en paralelo
Reducción de armónicos de tensión en la carga	Reducción de los armónicos de corriente
Regulación de la tensión	Compensación del factor de potencia
Reducción de Flicker	Reducción de corriente por el neutro
Reducción de micro cortes de tensión	

La topología paralela mostrada en la Ilustración 10 se suele utilizar para eliminar armónicos de corriente, compensar potencia reactiva y para eliminar la corriente desequilibrada. En su mayoría, los filtros se encuentran conectados al final de la carga para inyectar corriente de compensación, actuando como una fuente de corriente controlada que contrarresta los armónicos de corriente generados por la carga inyectando corrientes armónicas con un cambio de fase de 180° [4].

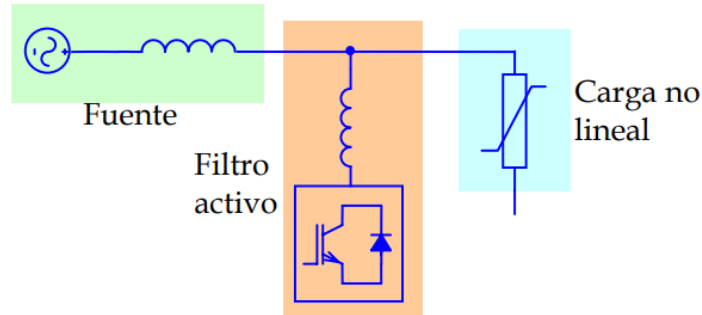


Ilustración 10: esquema básico de un filtro activo conectado en paralelo [38].

La topología serie mostrada en la Ilustración 11 se utiliza para compensar principalmente caídas de tensión, eliminar componentes armónicas de tensión y para eliminar los desequilibrios de tensión. Según el tipo de control que se establezca para el filtro activo es posible, por un lado, eliminar la distorsión que en la forma de onda de tensión de red pueda producir la carga y por otro lado, regular la tensión en los terminales de la carga [38]. Los filtros serie se comportan como una fuente de tensión que se conecta en serie con la propia carga, lo cual responde al inconveniente principal de que debe manejar corrientes de carga más altas [39].

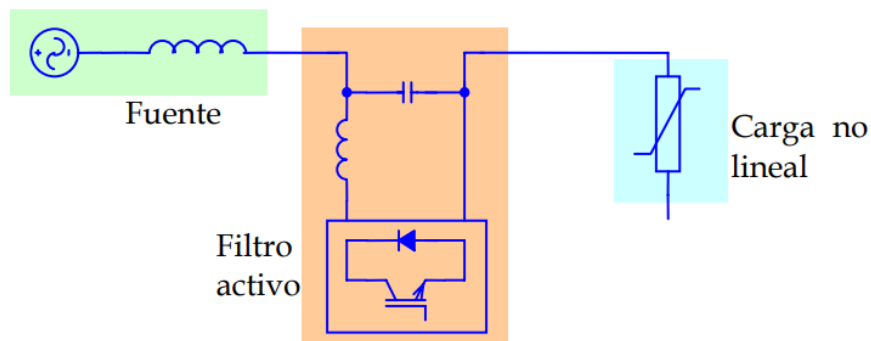


Ilustración 11: esquema básico de un filtro activo conectado en serie [38].

La Ilustración 12 muestra la combinación entre un filtro activo serie y otro paralelo, el motivo de realizar esta combinación consiste en que el filtro en serie permite eliminar perturbaciones correspondientes a tensión y el filtro en paralelo actúa de forma que permita eliminar las perturbaciones de la intensidad. El principal inconveniente se encuentra en el elevado coste de este tipo de equipos [38].

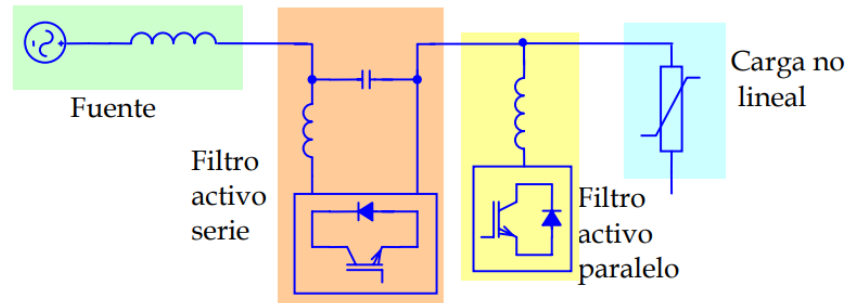


Ilustración 12: esquema básico que combina filtros activos en serie y paralelo [38].

Durante el marco teórico de este proyecto para comprender y clarificar algunas bases teóricas usadas en la metodología y en el análisis de resultados se ha proporcionado una descripción general de las diferentes perturbaciones que se presentan en los sistemas eléctricos. Estas han sido identificadas y discutidas mostrando las metodologías de cálculos relevantes y los límites establecidos por los estándares actualmente disponibles para la gestión de armónicos, desequilibrios, fluctuaciones de tensión, entre otras. Además, se ha revisado de forma general los filtros armónicos, los cuales se suelen utilizar para corregir condiciones no deseadas o problemas de calidad de energía permitiendo la correcta operación del sistema eléctrico.

5. Marco Metodológico

5.1. Equipo de medición

5.1.1. Descripción de los analizadores de redes

Los analizadores de redes eléctricas son muy utilizados en las industrias, ya que, estos dispositivos permiten conocer las propiedades y llevar un control exacto del consumo de energía eléctrica que poseen los usuarios en sus instalaciones eléctricas. Los parámetros con los que trabajan estos dispositivos pueden abarcar desde corrientes, tensiones, consumos de energía y potencia. Dependiendo de la calidad del analizador de red, la precisión y cantidad de parámetros podrá diferir entre las marcas existentes en el mercado. Además, estos dispositivos permiten ajustar umbrales de valores que se rigen a las normas eléctricas, permitiendo crear notificaciones o alarmas en caso de superar dichos umbrales. Todos los datos medidos o registrados pueden consultarse fácilmente a través del display del aparato o accediendo a ellos desde un navegador web.

La utilización de estos dispositivos ayudara a detectar y realizar las acciones pertinentes para la prevención o solución temprana a problemas existentes en la red eléctrica, tales como la disminución de consumos innecesarios o la mantención temprana a los equipos que se creen dañados por sobretensiones, interrupciones, etc.

Estos dispositivos se pueden presentar de diferentes formas, existiendo en el mercado aparatos que son fijos y portátiles, pues los primeros se instalan en los tableros eléctricos, de forma que se lleve un control de forma local a través de una pantalla display. En el mercado también se presentan analizadores de redes portátiles, los cuales permitirán llevar un control de parámetros de forma remota a través de un navegador web o aplicación móvil.

5.1.2. Características del analizador de red MYeBOX 1500

En el estudio de calidad de energía, campus Rancagua, se hará uso del analizador de red portátil de la marca Circutor llamado MYeBOX 1500, mostrado en la Tabla 14. Este aparato es capaz de medir, calcular y visualizar los principales parámetros de cualquier instalación eléctrica, ya sea, monofásica, bifásica con y sin neutro, trifásica equilibrada o desequilibrada. Una de las

ventajas que posee este dispositivo es que puede ser configurado totalmente de forma remota, por lo que la visualización de parámetros eléctricos se pueden presentar en el sitio web MYeBOX Cloud, en un smartphone o tablet gracias una aplicación móvil que se conecta a la red Wi-Fi.

Tabla 14: principales características

MYeBOX 1500	
	5 entradas para la medida de tensión, L1, L2, L3, N y tensión de referencia, URef. También dispone de 5 entradas para la corriente, L1, L2, L3, N y corriente de fuga con reconocimiento automático de pinzas. Tiene la opción de seleccionar la escala que se estime conveniente en el instrumento.
	Conformidad con la normativa de calidad de la energía IEC 61000-4-30 Clase S.
	Mediciones de potencia conforme a la norma IEC 61557-12.
	Registro de eventos de calidad en tensión con la facilidad de visualizar formas de onda asociada a dichos eventos con la opción de programar alarmas definidas por el usuario.
	Registrador portátil con memoria SD de 16 GB con posibilidad de almacenar datos en la nube, específicamente en MYeBOX Cloud.
	Comunicación entre usuario e instrumento mediante conexión 3G o Wi-Fi con 2 horas de autonomía.

5.1.3. Diagramas de conexiones principales

Para una correcta conexión se muestran los diagramas de conexión de los sistemas trifásicos y monofásicos en la Ilustración 13 y la Ilustración 14 respectivamente. En estos se muestra la conexión que se debe seguir para conectar de manera correcta las pinzas de voltaje y las sondas amperimétricas al punto de interés que se quiere estudiar. Cabe destacar que, para el manejo y la conexión del analizador a la red, es necesario que siempre se empleen los EPI (equipos de protección individual), para evitar cualquier riesgo laboral.

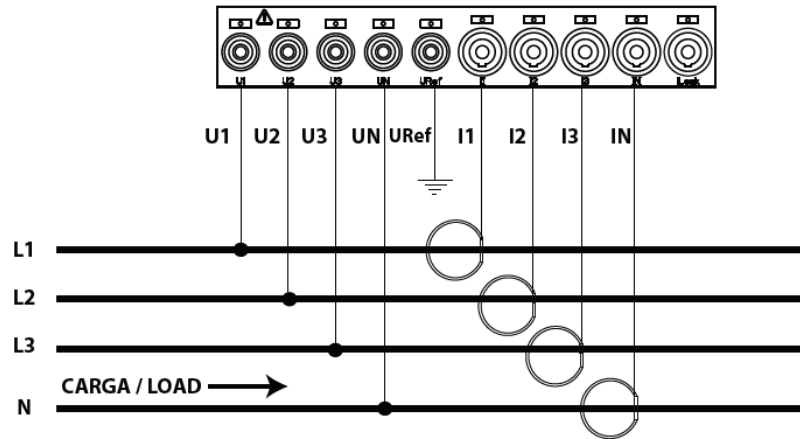


Ilustración 13: medición en red trifásica con conexión a 4 hilos [29].

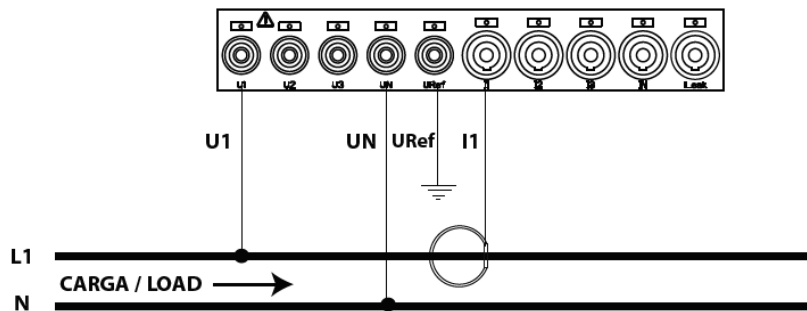


Ilustración 14: medición en red monofásica de fase a neutro de 2 hilos [29].

5.1.4. Señal de muestreo, parámetros y mediciones

El equipo muestrea la señal de entrada de tensión y corriente a razón de 128 muestras por ciclo de la fundamental, lo que equivale a una frecuencia de muestreo de 6400 Hz por señal para 50 Hz.

El MYeBOX 1500, es capaz de trabajar con todas las variables presentadas en la tabla mostrada en el Anexo 1.1, donde se muestra el periodo de registro que requiere cada variable. Además, gracias a la aplicación gratuita de PowerVision, se puede monitorear y almacenar toda esta información de forma remota, permitiendo obtener informes por periodos específicos.

La precisión con la que trabaja el instrumento se presenta en una tabla resumen del Anexo 1.2, la cual indica la presión con la que mide cada variable y la norma a la cual se rige cada medición.

5.2. Metodología de medición calidad de energía eléctrica

5.2.1. Aspectos generales

El equipo de medición es configurado dependiendo de las características que posee la instalación eléctrica, es decir, se debe tomar en cuenta que las mediciones son realizadas en BT (baja tensión) y en un sistema trifásico con neutro. Además, en los puntos de conexión existen voltajes de línea alrededor de los 400 V, voltajes de fase alrededor de los 230 V y frecuencia de red de 50 Hz aproximadamente.

Los registros de las variables se realizaron respetando el tiempo de medición que recomienda la NTCSSD, correspondiente a cualquier semana del año o 7 días consecutivos con valores eficaces promediados cada 15 minutos. La primera medición efectuada en este estudio se realizó desde el 17 de septiembre las 7:00 AM hasta el 24 de octubre del 2021 a las 23:59 PM. La segunda medición considerada se realizó desde el 11 de noviembre a las 7:00 AM hasta el 18 noviembre a las 23:59.

Para realizar el estudio de calidad de energía en la universidad, se siguió el diagrama de trabajo mostrado en la Ilustración 15. En este diagrama, de forma resumida, se presentan la metodología utilizada para realizar el registro, las mediciones y el análisis de las variables de interés. Para comprender de mejor forma lo realizado, en este capítulo se explica en detalle cómo se puso en marcha el proyecto.

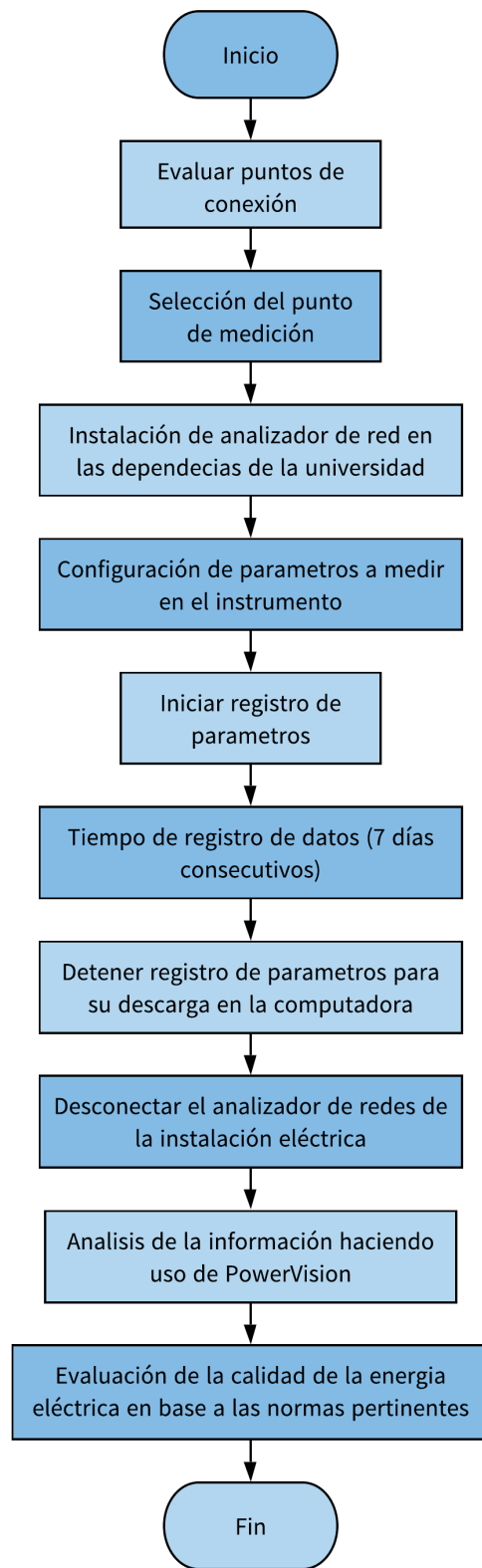


Ilustración 15: metodología de trabajo.

5.2.2. Evaluación y selección de los puntos de medición

Para comenzar con el estudio de calidad de energía, primero se solicitaron los planos de la instalación eléctrica de la universidad con la finalidad de conocer como está conformado el sistema eléctrico. Posteriormente se hizo revisión de estos planos, en los cuales se observaron y se tomaron en cuenta algunos posibles puntos de conexionado del equipo de medición. Los puntos de conexión se determinaron previamente tomando en cuenta criterios de accesibilidad y seguridad de forma que sea seguro y simple conectarse a los puntos de interés.

Se realizaron visitas a las salas eléctricas para realizar diagnósticos de los puntos escogidos y definir cuáles de estos son los adecuados para la conexión del equipo de medición. Esto se realizó en conjunto con el eléctrico de la universidad y para efectuar la instalación del analizador de redes debían existir los siguientes requisitos:

Requisitos en el punto de conexión:

- El equipo debe estar en un recinto seguro para prevenir accidentes y mantenerlo en constante vigilancia.
- Espacio suficiente para colocar las pinzas de voltaje y las sondas amperimétricas.
- El equipo será usado de forma remota, por lo cual en el lugar de instalación debe existir una red Wi-Fi, para registrar los datos en la nube.

Requisitos en cargas presentes en el punto de conexión:

- Los tableros deben alimentar cargas monofásicas de alto consumo o pequeñas cargas monofásicas, pero en gran cantidad para encontrar desequilibrios de tensión y corriente.
- Los tableros deben alimentar grandes cargas distorsionantes o pequeñas cargas no lineales, pero en gran cantidad para encontrar distorsiones armónicas.

Tomando en cuenta todo lo anterior, los puntos de conexión para realizar las mediciones se presentan en el diagrama unifilar mostrado en el Anexo 2, los cuales corresponden a tableros eléctricos de iluminación y de enchufes.

5.2.3. Área de estudio

Las áreas de estudio en donde se realizaron las distintas mediciones corresponden a la sala eléctrica ubicada en el zócalo y a la sala eléctrica del 7mo piso del edificio principal campus Rancagua de la universidad de O'Higgins. A continuación, la Ilustración 16 muestra los lugares en donde se trabajó durante el estudio.

	
a) Universidad de O'Higgins, Campus Rancagua	b) Sala eléctrica del zócalo
	
c) Tablero en zócalo como punto de conexión	d) Tablero en 7° piso como punto de conexión

Ilustración 16: área de estudio.

5.2.4. Instalación del analizador de redes

Al instalar el analizador de redes es necesario seguir los pasos presentados a continuación para efectuar una correcta instalación y así evitar riesgos eléctricos.

1. Conectar los cables de tensión y corriente en el equipo apagado.
2. Conectar la alimentación del equipo a un enchufe cercano para luego encenderlo.
3. Conectar las sondas amperimétricas y las pinzas de tensión a la instalación, en ese orden, dado que las pinzas de voltaje son más susceptibles a desconectarse por golpes accidentales.

La Ilustración 17 muestra el analizador de redes una vez instalado en los puntos de conexión elegidos. Si por algún motivo no existe una correcta conexión en la instalación, el dispositivo mediante el parpadeo de luces led indicara que pinza o sonda se encuentra mal conectada para efectuar su correcta conexión.

Para realizar los registros correctamente, es primordial asegurarse de configurar de manera correcta las características de la red en el dispositivo, tales como frecuencia, voltaje nominal, tipo de instalación de la red, en este caso trifásica de 4 hilos, etc. Posteriormente se debe establecer comunicación entre el dispositivo y la red Wi-Fi. Esto puede ser configurado a través de la aplicación móvil o de la página web MYeBOX Cloud. Tanto en la aplicación móvil como en la de escritorio se pueden realizar las configuraciones de parámetros de calidad, tales como: límites para identificar sobretensiones, huecos de tensión o interrupciones.

Una vez conectado y configurado el equipo se da inicio al registro de los parámetros de calidad. Mientras transcurre el periodo de registro (mínimo 7 días consecutivos), mediante el sitio web MYeBOX Cloud se pueden monitorear las mediciones y conocer de antemano algunos parámetros en tiempo real.

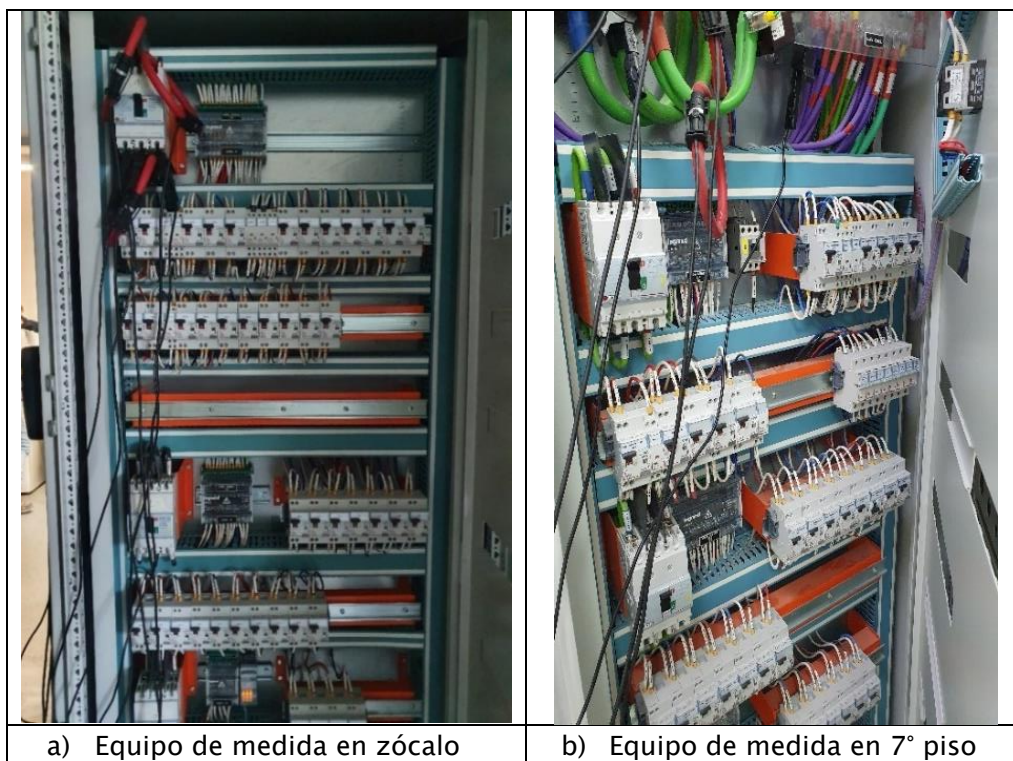


Ilustración 17: imágenes de los tableros medidos.

En cada tablero eléctrico estudiado se midieron los diámetros exteriores de los conductores de fases, tierra y neutro. La Tabla 15 presenta la capacidad de corriente admisible en base al diámetro exterior aproximado de los conductores medidos y su equivalente en AWG.

Tabla 15: mediciones aproximadas de conductores.

Conductor	Diámetro exterior aproximado mm		Calibre AWG/ kcmil		Corriente admisible A	
	7mo piso	zócalo	7mo piso	zócalo	7mo piso	zócalo
Fase	15.1	9.5	1/0	4	300	145
Neutro	19.8	11	250	2	445	190
Tierra	14	11	1/0	2	260	190

La Tabla 15 se construyó en base al Anexo 3 considerando que los conductores se encontrarían al aire libre. De la tabla se ve que los tableros eléctricos se dimensionaron para soportar grandes corrientes. Teniendo presente que en el 7mo piso existe un gran número de cargas que pueden aportar corrientes al neutro, en este tablero se dimensionó de mayor calibre dicho conductor, dado que no se tienen disyuntores que limiten la corriente que fluye por este.

Antes de realizar cualquier maniobra en la instalación eléctrica primero se debe tener en cuenta la seguridad personal del usuario, por lo tanto, es imprescindible disponer de implementos de seguridad personal para la instalación y desconexión del equipo de medida. Durante la instalación del equipo se utilizaron los EPI mostrados en la Ilustración 18, para evitar cualquier tipo de accidentes o inconvenientes que surgieran mientras se realizan las maniobras de conexión de pinzas de tensión, sondas amperimétricas y la medición de conductores.



Ilustración 18: equipos de protección individual.

5.2.5. Variables registradas

El analizador de redes registra valores de corriente y voltaje RMS por cada fase, también realiza un registro de muestras de corriente y tensión en el neutro. Estos registros servirán de variables de entrada para que el analizador de red pueda visualizar y registrar parámetros de calidad que sean de interés para el estudio, los cuales son mostrados en la tabla del Anexo 1. A continuación, se presentan los parámetros a evaluar en este estudio:

- Voltaje y corriente por cada fase.
- Voltaje y corriente en el neutro.
- Desequilibrio de voltaje y corriente.
- Índices de Distorsión Armónica individual y total (THDI y THDV) hasta armónica 50.

5.2.6. Desconexión de analizador de redes

Una vez finalizado el registro de mediciones, se procede a desconectar el analizador de redes del punto de conexión. Para llevar a cabo esto se consideran los siguientes pasos:

1. Apagar el analizador de redes.
2. Desconectar las sondas amperimétricas y las pinzas de tensión de la instalación.
3. Desconectar los cables del analizador de redes.

5.2.7. Extracción de los datos registrados

Tras finalizar el periodo de registro y medición de datos, se ingresa al sitio web MYeBOX Cloud, para que de forma remota se detenga el registro de datos y se generen los ficheros que se compartirán. Una vez en la computadora, estos podrán ser visualizados y analizados mediante el software PowerVision Plus, el cual es un software de lectura, descarga y análisis de datos.

La Ilustración 19 muestra la interfaz del software PowerVision Plus, la cual es una interfaz sencilla para visualizar y analizar de forma rápida e intuitiva la información registrada. En esta se pueden realizar gráficos y tablas, que servirán para determinar si las perturbaciones eléctricas y resultados obtenidos cumplen con los límites estipulados en la NTCSSD.

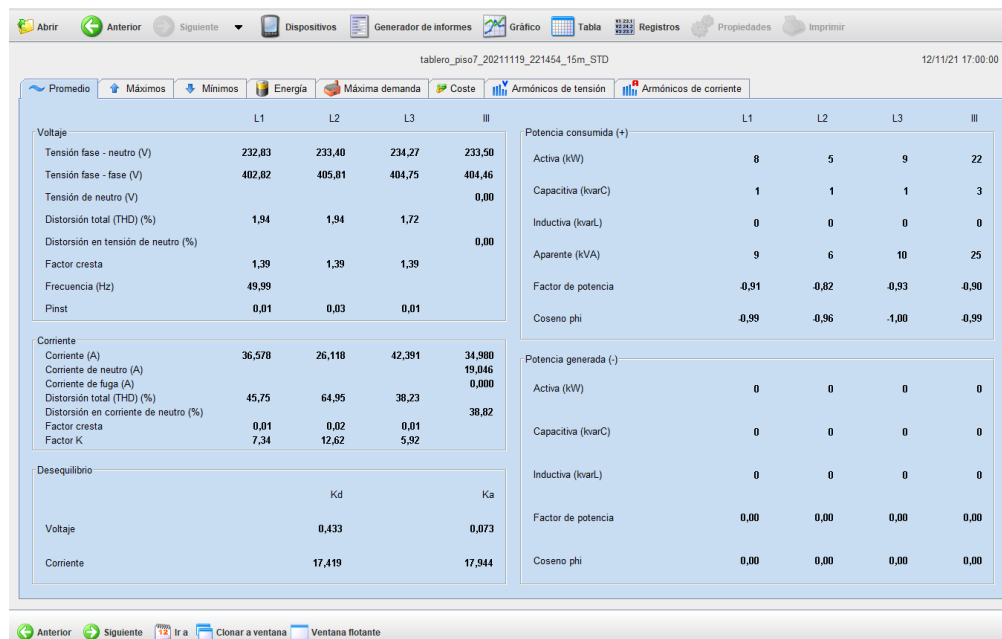


Ilustración 19: interfaz de usuario de PowerVision Plus.

6. Resultados y discusión

6.1. Análisis de registros durante fin de semana para caso de referencia.

Se realizaron mediciones en el tablero del zócalo y del séptimo piso durante el fin de semana con el fin de tener un caso base que muestre el comportamiento de las variables eléctricas a diferencia del resto de la semana. Con esto se espera que se presenten niveles de perturbaciones diferentes a los demás días de la semana, frente a una reducción del consumo eléctrico, debido a la inactividad de la mayoría de los aparatos eléctricos.

6.1.1. Voltajes y corrientes RMS

Voltaje RMS: Se presentan las mediciones de voltaje RMS obtenidas de los tableros ubicados en el zócalo y en el séptimo piso, correspondientes a la Ilustración 20 e Ilustración 21 respectivamente. En el tablero del zócalo se registró un voltaje RMS mínimo de 228.72 V y un máximo de 239.4 V. En cuanto al tablero del séptimo piso se registró un voltaje RMS mínimo de 228.72 V y un máximo de 238.9 V. Mediciones que sugieren la existencia de variaciones en la tensión con respecto al voltaje nominal correspondiente a 230 V. Además, se puede ver que en ambos casos hay desequilibrios de tensión.

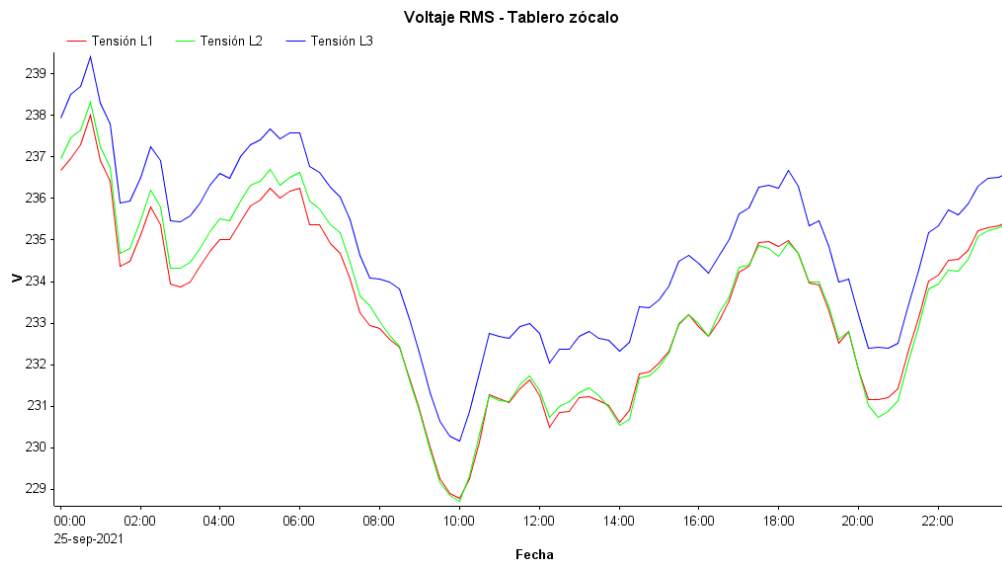


Ilustración 20: voltaje RMS en tablero del zócalo, fin de semana.

Utilizando la tensión máxima registrada en la fase 3 del tablero del zócalo, se calcula la variación del voltaje con respecto al voltaje nominal existente en la universidad.

$$\Delta V_{\text{zócalo}} = \frac{|239.4 - 230|}{230} \cdot 100 = 4.08\%$$

Para el análisis del desequilibrio de tensión se registraron los voltajes que se alejaron mayormente de su condición nominal durante el día 25 de septiembre del 2021 a las 00:45 hrs

$$V_{L1} = 238 \angle 0^\circ$$

$$V_{L2} = 238.32 \angle 240.4^\circ$$

$$V_{L3} = 239.4 \angle 120.1^\circ$$

Cabe mencionar que para realizar el estudio del desequilibrio de voltaje y de corriente el analizador de redes portátiles MYeBOX 1500 entrega información acerca de los ángulos de los fasores de voltaje y corriente, los cuales serán usados para calcular las componentes de secuencia positiva y negativa tal como sigue:

$$V_1^+ = \frac{238 \angle 0^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 238.32 \angle 240.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 239.4 \angle 120.1^\circ}{3}$$

$$V_1^+ = 238.57 \angle 0.17^\circ$$

$$V_1^- = \frac{238 \angle 0^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 238.32 \angle 240.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 239.4 \angle 120.1^\circ}{3}$$

$$V_1^- = 0.92 \angle -134.56^\circ$$

$$\%VUF = \frac{0.92}{238.57} \cdot 100 = 0.39\%$$

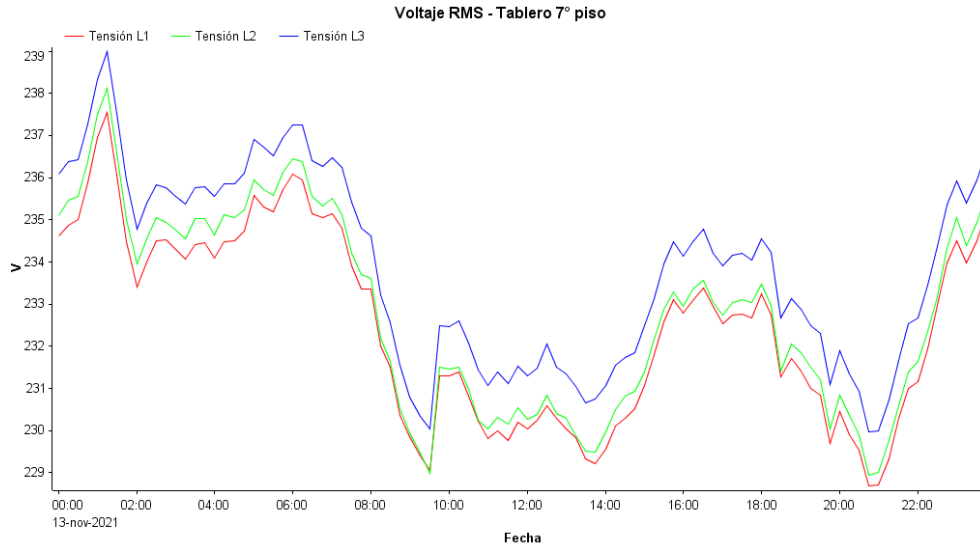


Ilustración 21: voltaje RMS en tablero 7° piso, fin de semana.

Utilizando la tensión máxima registrada en la fase 3 en el tablero del 7mo piso, se calcula la variación de voltaje con respecto al voltaje nominal.

$$\Delta V_{7^\circ \text{ piso}} = \frac{|238.9 - 230|}{230} \cdot 100 = 3.87\%$$

Para el análisis del desequilibrio de tensión se registraron los voltajes que se alejaron mayormente de su condición nominal durante el día 13 de noviembre del 2021 a las 1:00 hrs

$$V_{L1} = 237.46 \angle 0^\circ$$

$$V_{L2} = 238.06 \angle 240.4^\circ$$

$$V_{L3} = 238.9 \angle 120^\circ$$

Se procede a calcular las componentes de secuencia negativa y positiva, para luego obtener el VUF tal como se presenta a continuación:

$$V_1^+ = \frac{237.46 \angle 0^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 238.06 \angle 240.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 238.9 \angle 120^\circ}{3}$$

$$V_1^+ = 238.13 \angle 0.13^\circ$$

$$V_1^- = \frac{237.46 \angle 0^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 238.06 \angle 240.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 238.9 \angle 120^\circ}{3}$$

$$V_1^- = 0.97 \angle -147.62^\circ$$

$$\%VUF = \frac{0.97}{238.13} \cdot 100 = 0.41\%$$

En base a las mediciones obtenidas, se ve que el voltaje durante el fin de semana en ambos puntos de medida se encuentra en rangos normales de operación, ya que se encuentra dentro del rango $\pm 7.5\%$. Además, de los resultados obtenidos se ve que existe un desequilibrio de tensión muy parecido en ambos puntos de medición, por lo que en base a la NTCSSD ambos casos respetan los límites establecidos para el índice VUF, pues los valores obtenidos son inferiores al 2% estipulado por la norma mencionada.

Corriente RMS: Se presentan las mediciones de corriente RMS obtenidas de los tableros ubicados en el zócalo y en el séptimo piso, correspondientes a la Ilustración 22 e Ilustración 23 respectivamente. En el tablero del zócalo se registró una corriente RMS mínima de 1.063 A y un máximo de 6.387 A. En cuanto al tablero del séptimo piso se registró una corriente RMS mínima de 10.062 A y un máximo de 22.879 A. Con estos consumos diferentes en cada fase a priori se puede evidenciar la existencia de desequilibrios de corriente.

Los desequilibrios de corriente mostrados en los siguientes cálculos son analizados durante el fin de semana que es cuando se produjeron consumos bajos en la Universidad de O'Higgins, campus Rancagua. Estos serán comparados con el caso de días hábiles que es cuando se produjeron consumos altos. Con esto se determinará si el desequilibrio de corriente se ve influenciado por el tipo de consumo.

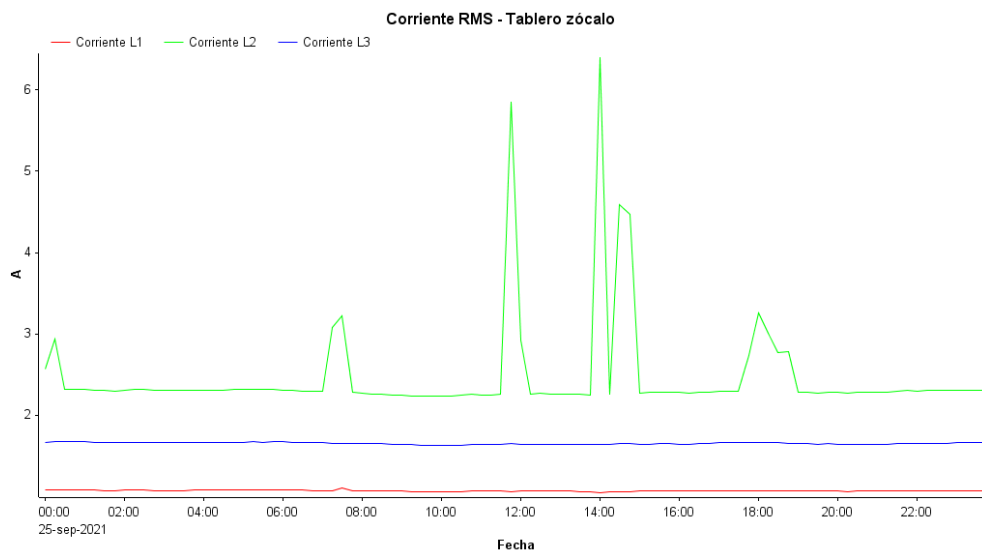


Ilustración 22: corriente RMS en tablero zócalo, fin de semana.

En el análisis del desequilibrio de corriente se utilizan las siguientes medidas de corriente registradas en el zócalo el día 25 de septiembre de 2021 a las 10:00 hrs, que fue cuando se presentó el menor consumo

$$I_{L1} = 1.061 \angle 74.7^\circ$$

$$I_{L2} = 2.243 \angle 304.9^\circ$$

$$I_{L3} = 1.631 \angle 193.9^\circ$$

Con estos registros se procede a calcular las componentes de secuencia negativa y positiva, para luego obtener el CUF, lo cual se muestra a continuación:

$$I_1^+ = \frac{1.061 \angle 74.7^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 2.243 \angle 304.9^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 1.631 \angle 193.9^\circ}{3}$$

$$I_1^+ = 1.64 \angle 69.99^\circ$$

$$I_1^- = \frac{1.061 \angle 74.7^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 2.243 \angle 304.9^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 1.631 \angle 193.9^\circ}{3}$$

$$I_1^- = 0.298 \angle -157.31^\circ$$

$$\%CUF = \frac{0.298}{1.64} \cdot 100 = 18.17\%$$

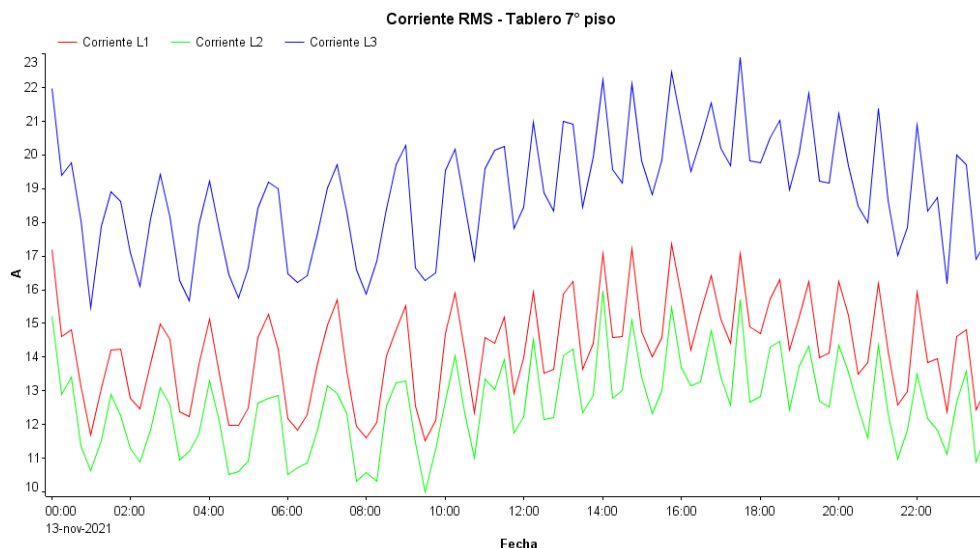


Ilustración 23: corriente RMS en tablero 7° piso, fin de semana.

Para analizar el desequilibrio de corriente se utilizan las siguientes medidas de corriente registradas en el 7mo piso el día 13 de noviembre del 2021 a las 08:30 hrs, que fue cuando existió un menor consumo

$$I_{L1}=11.947 \angle 39.2^\circ$$

$$I_{L2}=10.062 \angle 288.1^\circ$$

$$I_{L3}=16.295 \angle 142.5^\circ$$

Con estos registros se procede a calcular las componentes de secuencia negativa y positiva, lo cual se muestra a continuación:

$$I_1^+ = \frac{11.947 \angle 39.2^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 10.062 \angle 288.1^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 16.295 \angle 142.5^\circ}{3}$$

$$I_1^+ = 12.52 \angle 34.38^\circ$$

$$I_1^- = \frac{11.947 \angle 39.2^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 10.062 \angle 288.1^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 16.295 \angle 142.5^\circ}{3}$$

$$I_1^- = 2.37 \angle -112.56^\circ$$

$$\%CUF = \frac{2.37}{12.52} \cdot 100 = 18.92\%$$

De las ilustraciones se ve como la corriente registrada tiene un comportamiento diferente en cada punto de medición, lo cual se debe principalmente al consumo y al tipo de cargas que se presentan en cada lugar de medición. En el zócalo predominan cargas de bajo consumo como luces led y en el 7mo piso se alimenta cargas de consumo mayor como computadores, televisores y aires acondicionados.

A pesar de que existen diferencias de consumo en los puntos de medición durante el fin de semana, de los cálculos realizados se ve que el desequilibrio de corriente en ambos casos es muy similar, teniendo valores de desequilibrio de corriente de 18.17% y 18.92%. Puesto que no se tiene estándares o normas que regulen el desequilibrio de corriente, si se compara el resultado obtenido con los que se suelen emplear en la práctica, este sobrepasa al límite utilizado del 10% de desequilibrio de corriente.

6.1.2. Índices de distorsión armónica THD de corriente y voltaje.

THD_i fin de semana. Para analizar este índice se realizaron los gráficos mostrados en la Ilustración 24 y la Ilustración 25, el primero corresponde al tablero del zócalo, en el cual se alcanzó un THD_i mínimo en la línea 3 con un valor de 18.71% y un valor máximo en la línea 2 con un 48.88%. En cuanto a las mediciones del tablero del séptimo piso se obtuvo un THD_i mínimo de 17.36% en la línea 3 y un valor máximo en 60.86% en línea 1.

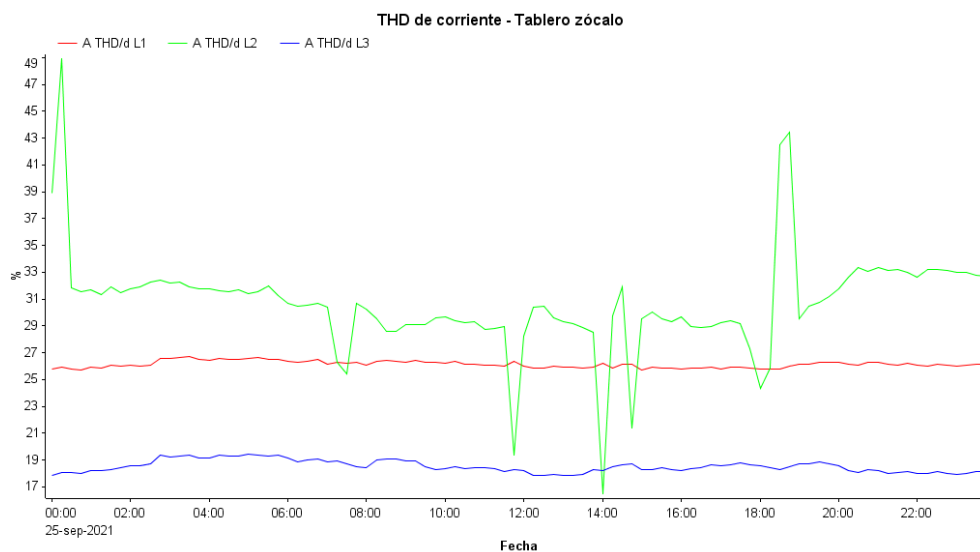


Ilustración 24: THD de corriente en tablero zócalo, fin de semana.

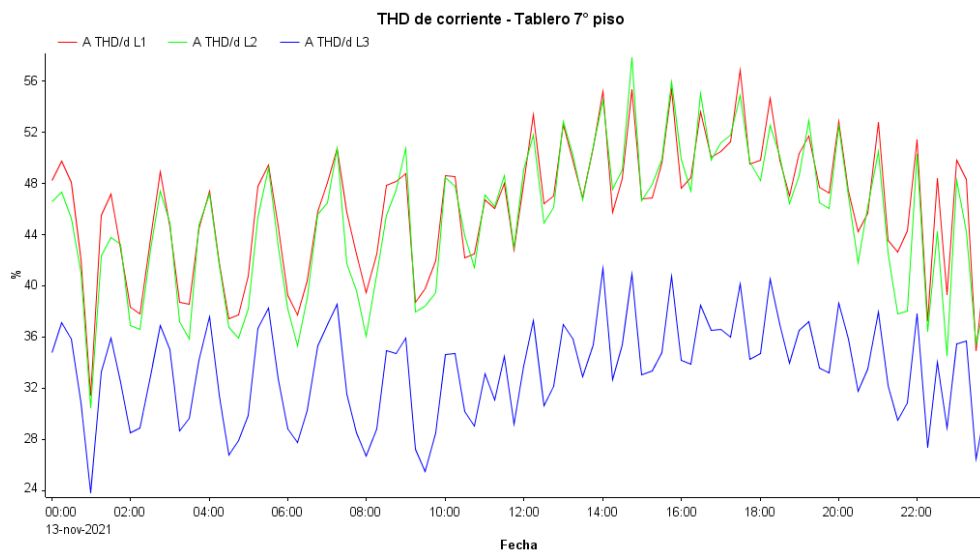


Ilustración 25: THD de corriente en tablero 7º piso, fin de semana.

En ambos casos se ve que el THD_I es alto, sin embargo, hay que tener en cuenta que la corriente de carga es baja, por lo que para definir y evaluar los límites de distorsión de corriente se utiliza la relación de corto circuito (SCR) que fija límites de distorsión en base a la relación entre la corriente máxima demandada y la corriente de cortocircuito, lo cual se ve posteriormente.

THD_V fin de semana. Se realizaron los gráficos mostrados en la Ilustración 26 y la Ilustración 27, teniendo que el primero corresponde al zócalo, el cual alcanzó un THD_V mínimo en la línea 3 con 1.86% y un valor máximo en la línea 1 con un 2.85%. Luego el tablero del séptimo piso obtuvo un THD_V mínimo de 1.92% en la línea 3 y un valor máximo en 3.31% en línea 1.

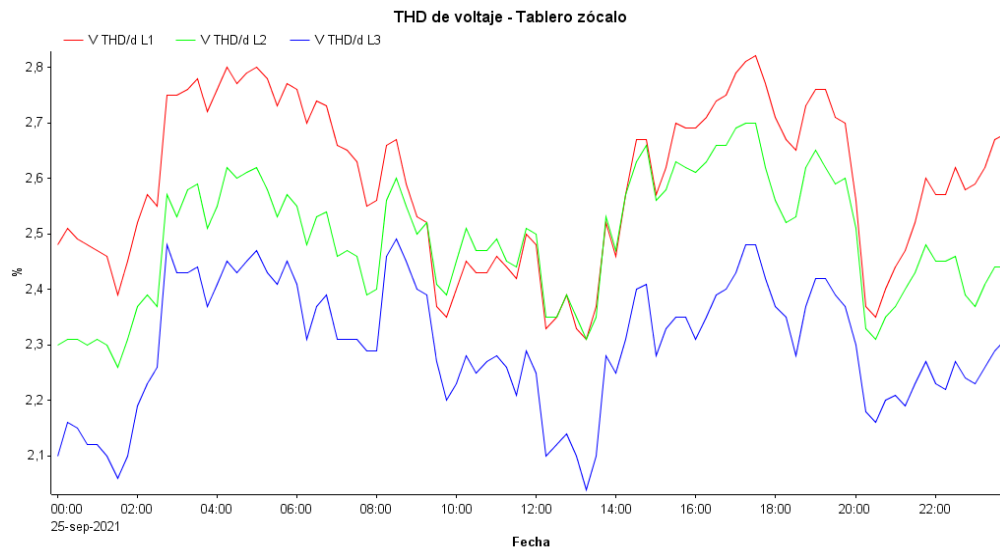


Ilustración 26: THD de voltaje en tablero zócalo, fin de semana.

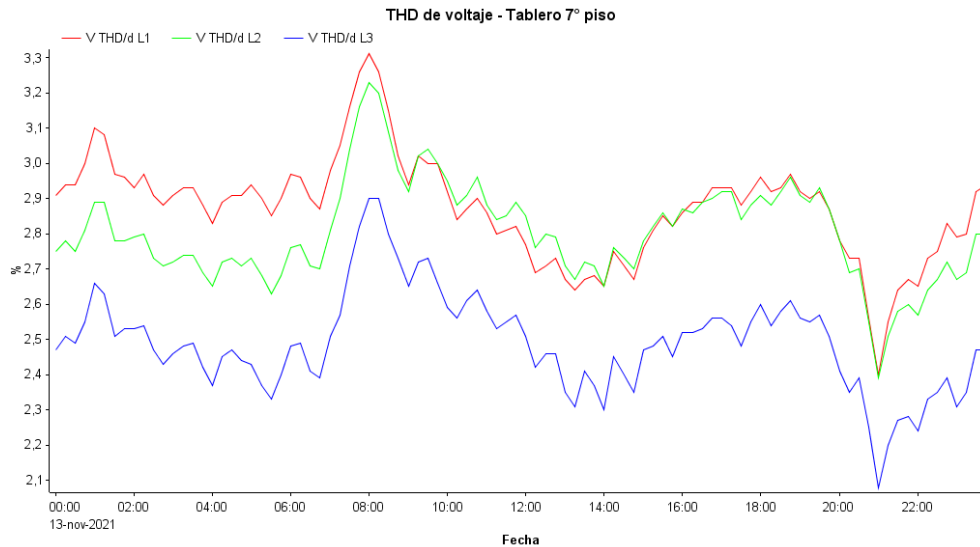


Ilustración 27: THD de voltaje en tablero 7° piso, fin de semana.

En ambos casos se puede ver que el nivel de THD_V es bajo, lo que indica no presentar un escenario que pueda afectar la calidad de energía de la instalación eléctrica, ya que durante el fin de semana se cumple lo establecido por la NTCSSD de que este índice no superar el 5%.

6.1.3. Armónicas individuales de corriente y voltaje caso referencia.

Armónicas individuales de corriente. Para realizar un análisis en detalle se procede a revisar como se encuentran distribuidos los armónicos individuales, con el fin de identificar la armónica que predomina del resto.

El espectro armónico correspondiente al tablero del zócalo se presenta en la Ilustración 28, en la cual se observa que el 3er armónico es el predominante, alcanzando en la línea 2 un valor de 18.7%, seguido a este viene el 9no armónico con 10.7% en la línea 2. El espectro armónico obtenido es ocasionado a cargas no lineales como luces led y tubos fluorescentes que son típicas de producir armónicos de orden 3ro, 5to, 7mo, 11mo, 13 y de orden superior.

El espectro armónico correspondiente al tablero del séptimo piso se muestra en la Ilustración 29, del cual se puede ver que el armónico predominante corresponde al 5to armónico con un 34.48% en la línea 1, seguido a este viene el 7mo armónico con 31.65% en la línea 2. Este espectro armónico se debe principalmente a cargas monofásicas no lineales como computadores,

impresoras, hervidores aires acondicionados entre otros equipos de oficinas que son los que generan armónicos impares del orden 3ro, 5to, 7mo, 9no, etc.

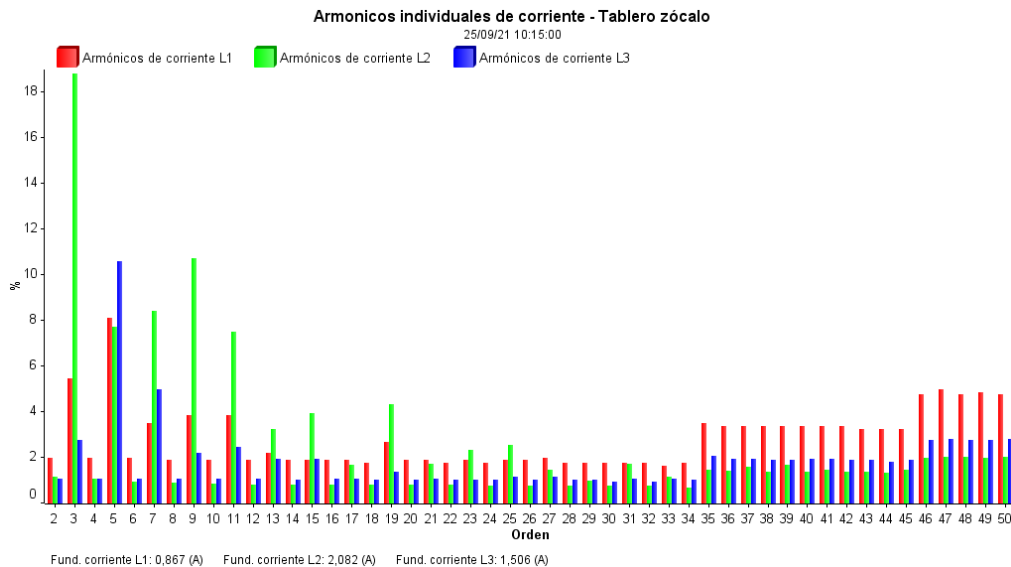


Ilustración 28: armónicas de corriente individuales tablero zócalo, fin de semana.

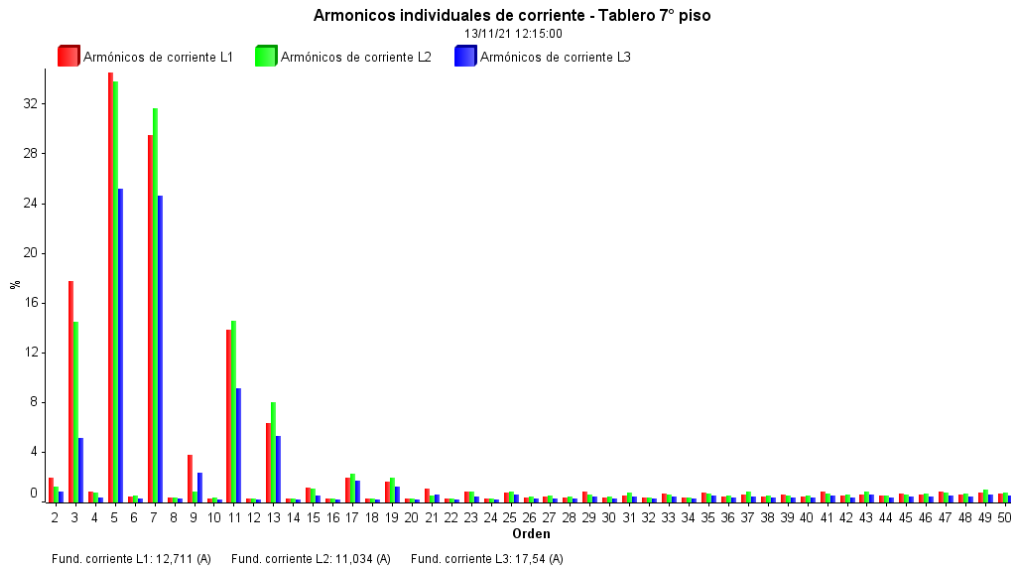


Ilustración 29: armónicas individuales de corriente en tablero 7° piso, fin de semana.

El contenido armónico que se presenta no cumpliría con lo estipulado por la NTCSSD, ya que en ambos casos los armónicos predominantes 3er y 5to armónico superan los límites fijados del 4%. Además, en el tablero del zócalo se ve como los armónicos de orden superior a los ya mencionados alcanzan valores elevados que sobrepasan los límites estipulado por la NTCSSD.

Armónicas individuales de voltaje. En la Ilustración 30 se observa que el 5to armónico predomina con un valor de 2.4% en la línea 2, seguido de este viene el 7mo armónico con un valor de 0.8%. De la Ilustración 31 se observa que el 5to armónico es el predominante con un valor de 2.65% en la línea 2 seguido de este viene el 7mo armónico con un valor de 0.73%.

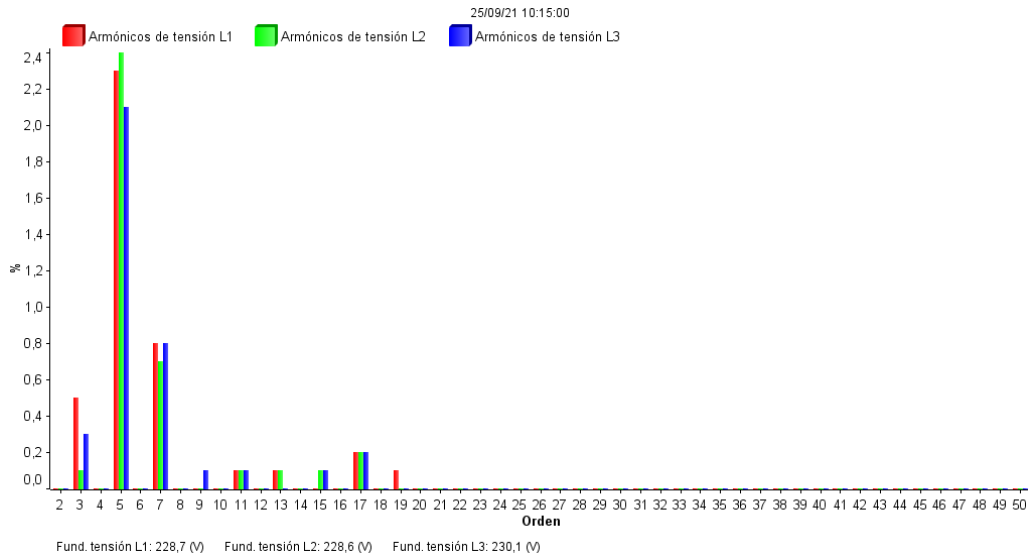


Ilustración 30: armónicas individuales de tensión en tablero zócalo, fin de semana.

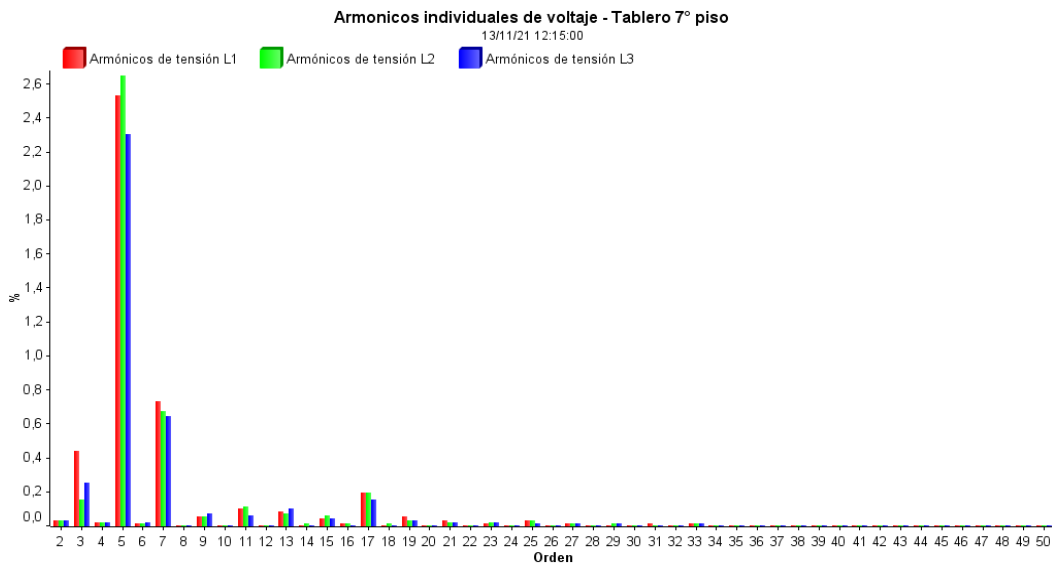


Ilustración 31: armónicas individuales de voltaje en tablero 7° piso, fin de semana.

Al realizar un análisis normativo se puede ver que en ambos puntos de medición no se presentan un escenario anormal, ya que las componentes armónicas predominantes

correspondientes al 5to y 7mo se encuentran por debajo a los límites estipulados por la NTCSSD, la cual les fija límites del 3%.

6.1.4. Mediciones en el neutro caso de referencia.

Se realizaron mediciones en el conductor neutro durante el fin de semana, las cuales se presentan en la Ilustración 32 y la Ilustración 33, mostrando que en el zócalo se tiene corrientes casi nulas, presentando peaks que se deben a alguna carga pequeña, tal como iluminarias que se encendieron durante el registro. En cuanto a las mediciones realizadas en el séptimo piso, se presentaron corrientes altas que durante algunos instantes alcanzaron valores similares a los registrados en las corrientes de fase durante el fin de semana.

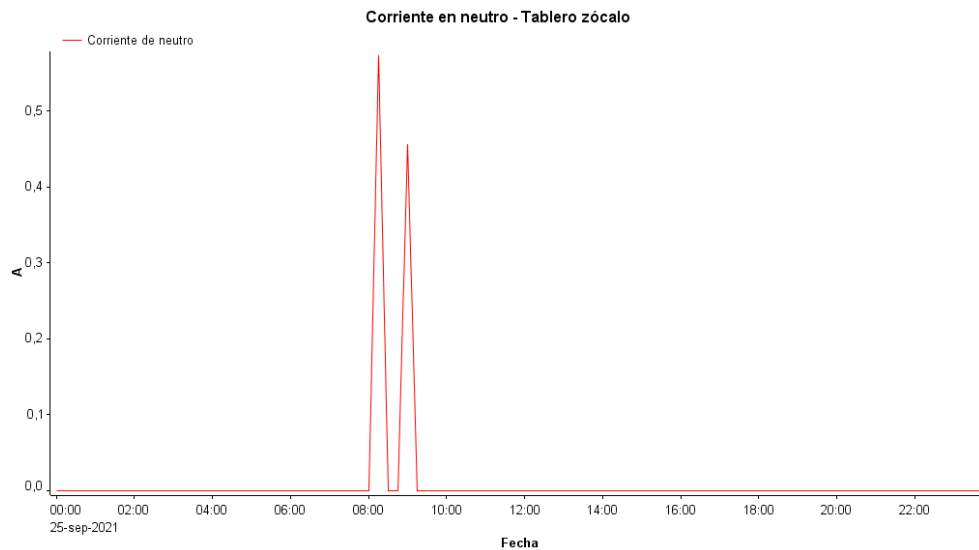


Ilustración 32: corriente de neutro en tablero zócalo, fin de semana.

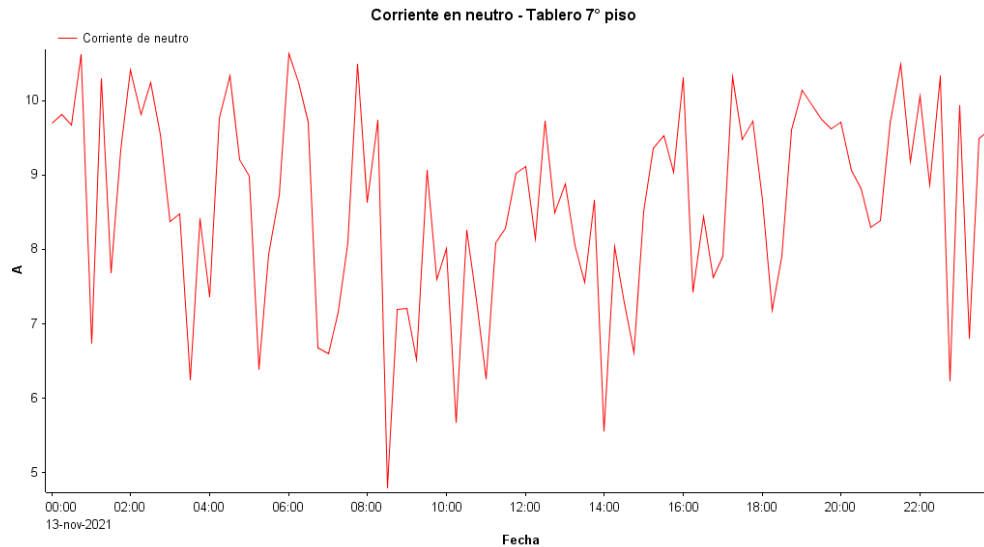


Ilustración 33: corriente de neutro, en tablero 7° piso, fin de semana.

Cabe destacar que las corrientes registradas en ambos puntos de medición son diferentes, debido principalmente a la diferencia de consumo y al tipo de cargas existentes en cada punto de medición, es decir, las cargas del zócalo aportan bajas corrientes armónicas de secuencia cero. Por el contrario, en el 7mo piso se presentan cargas de mayor consumo que aportan corrientes armónicas de secuencia cero al neutro.

6.2. Análisis de registros realizadas durante 7 días consecutivos

Las mediciones realizadas durante los días hábiles se compararán con el caso base correspondiente a los fines de semana, con el fin de visualizar y estudiar cómo afectan las cargas conectadas a los índices de calidad cuando existe bajo y alto consumo.

Cabe mencionar que durante el registro de las mediciones del tablero eléctrico del zócalo se presentó un caso aislado que provoco eventos de calidad (interrupciones y huecos de tensión), que afectaron las mediciones del aquel día, por tal motivo algunos datos difieren tanto de los que se registraron los demás días. Estos eventos de calidad se verán en análisis posteriores.

6.2.1. Voltaje y corriente por fase

Voltaje RMS: Se presentan las mediciones de voltaje RMS obtenidas de los tableros ubicados en el zócalo y en el séptimo piso, correspondientes a la Ilustración 34 y la Ilustración 35 respectivamente. Durante la semana en el tablero del zócalo se registró un voltaje RMS mínimo de 223.98 V y un máximo de 239.24 V. En cuanto al tablero del séptimo piso se registró un voltaje RMS mínimo de 227.97 V y un máximo de 238.41 V. Se puede ver que existen de variaciones en la tensión con respecto al voltaje nominal. Además, en ambos casos a priori se puede ver que se presentan desequilibrios de tensión.

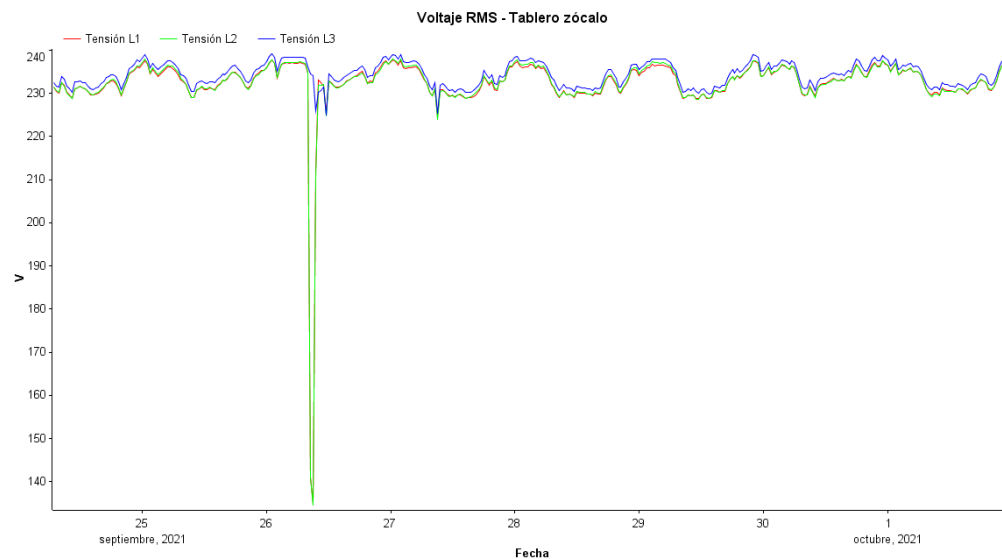


Ilustración 34: voltaje RMS en tablero zócalo.

Utilizando la tensión máxima registrada en el tablero del zócalo en la fase 3, se procede a calcular la variación de voltaje tal como se presenta a continuación:

$$\Delta V_{\text{zócalo}} = \frac{|239.24 - 230|}{230} \cdot 100 = 4.01\%$$

Para el análisis del desequilibrio de tensión se registraron los voltajes que se alejaron en mayor medida de su condición nominal durante el día 27 de septiembre del 2021 a las 00:30 hrs,

$$V_{L1} = 237.84 \angle 0^\circ$$

$$V_{L2} = 238.1 \angle 240.4^\circ$$

$$V_{L3} = 239.24 \angle 120.1^\circ$$

Con estos registros se procede a calcular las componentes de secuencia negativa y positiva para luego obtener el VUF.

$$V_1^+ = \frac{237.84 \angle 0^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 238.1 \angle 240.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 239.24 \angle 120.1^\circ}{3}$$

$$V_1^+ = 238.42 \angle 0.17^\circ$$

$$V_1^- = \frac{237.84 \angle 0}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 238.1 \angle 240.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 239.24 \angle 120.1^\circ}{3}$$

$$V_1^- = 0.92 \angle -135.09^\circ$$

$$\%VUF = \frac{0.92}{238.42} \cdot 100 = 0.38\%$$

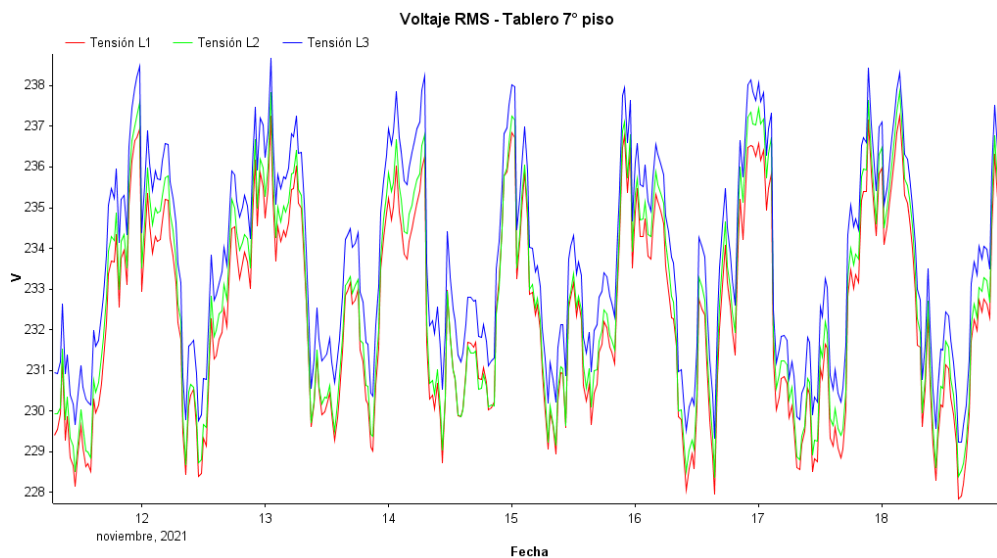


Ilustración 35: voltaje RMS en tablero del 7° piso.

Utilizando la tensión máxima registradas en la fase 3, se calcula la variación de voltaje tal como se muestra a continuación.

$$\Delta V_{7^\circ \text{ piso}} = \frac{|238.41 - 230|}{230} \cdot 100 = 3.66\%$$

Para analizar el desequilibrio de voltaje se registraron los voltajes que se alejaron en mayor medida de su condición nominal durante el día 11 de noviembre de 2021 a las 23:00 hrs

$$V_{L1} = 236.89 \angle 0^\circ$$

$$V_{L2} = 237.5 \angle 240.4^\circ$$

$$V_{L3} = 238.41 \angle 120^\circ$$

Utilizando los registros anteriores se procede a calcular las componentes de secuencia negativa y positiva tal como sigue:

$$V_1^+ = \frac{236.89 \angle 0^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 237.5 \angle 240.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 238.41 \angle 120^\circ}{3}$$

$$V_1^+ = 237.63 \angle 0.13^\circ$$

$$V_1^- = \frac{236.89 \angle 0^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 237.5 \angle 240.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 238.41 \angle 120^\circ}{3}$$

$$V_1^- = 1.02 \angle -149.9^\circ$$

$$\%VUF = \frac{1.02}{237.63} \cdot 100 = 0.42\%$$

La Tabla 16 muestra un resumen de los índices calculados, en la cual se ve que durante la semana se presentaron variaciones de voltaje inferiores a las medidas durante el fin de semana. Sin embargo, en ambas mediciones el voltaje se encuentra en rangos normales de operación, encontrándose dentro del rango $\pm 7.5\%$. Además, ambos resultados cumplen los límites establecidos para el índice de desequilibrio de tensión, ya que el valor obtenido es inferior al 2% estipulado por la NTCSSD.

Tabla 16: desequilibrios y variaciones de voltaje.

Tablero	VUF día de semana [%]	VUF fin de semana [%]	ΔV día de semana [%]	ΔV fin de semana [%]
Zócalo	0.38	0.39	4.01	4.08
7mo piso	0.42	0.41	3.66	3.87

Corriente RMS: Se presentan las mediciones de corriente RMS obtenidas de los tableros medidos. En el tablero del zócalo se registró una corriente RMS mínima de 1.087 A y un máximo de 19.4 A. En cuanto al tablero del séptimo piso se registró una corriente RMS mínima de 9.233 A y un máximo de 64.788 A. De estas mediciones es posible observar que existe desbalance de cargas en las fases de la instalación, por lo que se procede a calcular CUF.

Los desequilibrios de corriente mostrados en los siguientes cálculos son analizados durante la semana que fue cuando se produjeron consumos altos en el campus Rancagua de la Universidad de O'Higgins.

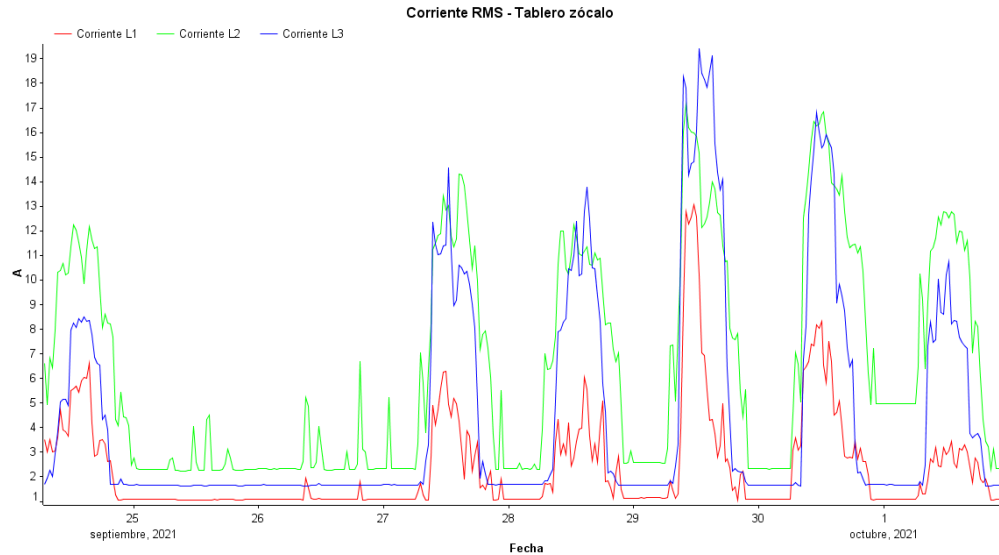


Ilustración 36: corriente RMS en tablero del zócalo.

Para calcular el índice CUF se registraron las siguientes corrientes en el zócalo el día 29 de septiembre de 2021 a las 12:30 hrs, que fue cuando se presentó el mayor consumo durante la semana

$$I_{L1} = 7.177 \angle 21.4^\circ$$

$$I_{L2} = 13.027 \angle 260.4^\circ$$

$$I_{L3} = 19.136 \angle 137.3^\circ$$

Se procede a calcular las componentes de secuencia negativa y positiva tal como sigue:

$$I_1^+ = \frac{7.177 \angle 21.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 13.027 \angle 260.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 19.136 \angle 137.3^\circ}{3}$$

$$I_1^+ = 13.1 \angle 19.1^\circ$$

$$I_1^- = \frac{7.177 \angle 21.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 13.027 \angle 260.4^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 19.136 \angle 137.3^\circ}{3}$$

$$I_1^- = 3.61 \angle -134.28^\circ$$

$$\%CUF = \frac{3.61}{13.1} \cdot 100 = 27.6\%$$

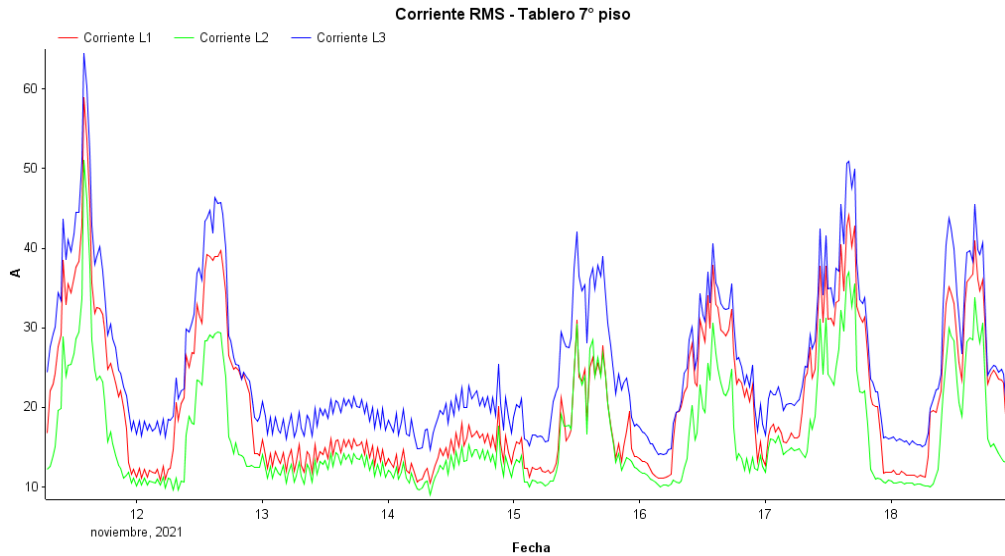


Ilustración 37: corriente RMS en tablero 7mo piso.

Para calcular el CUF, se tienen las siguientes medidas de corriente registradas el día 11 de noviembre de 2021 a las 15:15 hrs que fue cuando se produjo uno de los mayores consumos en el 7mo piso

$$I_{L1} = 34.988 \angle 10.2^\circ$$

$$I_{L2} = 27.642 \angle 259.8^\circ$$

$$I_{L3} = 42.536 \angle 127.6^\circ$$

Se procede a calcular las componentes de secuencia negativa y positiva tal como sigue:

$$I_1^+ = \frac{34.988 \angle 10.2^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 27.642 \angle 259.8^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 42.536 \angle 127.6^\circ}{3}$$

$$I_1^+ = 34.93 \angle 11.66^\circ$$

$$I_1^- = \frac{34.988 \angle 10.2^\circ}{3} + \frac{1 \angle 240^\circ \cdot 27.642 \angle 259.8^\circ}{3} + \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 42.536 \angle 127.6^\circ}{3}$$

$$I_1^- = 5.19 \angle -100.66^\circ$$

$$\%CUF = \frac{5.19}{34.93} \cdot 100 = 14.86\%$$

La Tabla 17 muestra un resumen del índice CUF calculado en condiciones de alto y bajo consumo. En esta se ve que durante altos consumos el tablero del zócalo presentó un alto desequilibrio de corriente y en el tablero del séptimo piso el desbalance de corriente fue bastante

menor. Mientras que en condiciones de bajo consumo el CUF fue bastante similar para ambos puntos de medición siendo levemente superior el tablero del 7mo piso. Sin embargo, en ambas condiciones y tableros no se cumplió el límite del 10% que se suele utilizar en la práctica.

Tabla 17: desequilibrios de corriente en bajo y alto consumo.

Tablero	CUF día de semana en alto consumo [%]	CUF fin de semana en bajo consumo [%]
Zócalo	27.6	18.17
7mo piso	14.86	18.92

6.2.2. Índices de distorsión armónica THD de corriente y voltaje.

Corriente trifásica zócalo. En la Ilustración 38 se observa la forma de onda de la corriente durante un ciclo de red, desde 0 a 0.02 segundos, para cada una de las fases que componen la instalación eléctrica. De esta se puede ver a simple vista que existe afectación en la forma de onda producida por los armónicos que generan las cargas no lineales conectadas y que además el sistema se encuentra desequilibrado, en consecuencia, las formas de onda no son una sinusoidal pura.

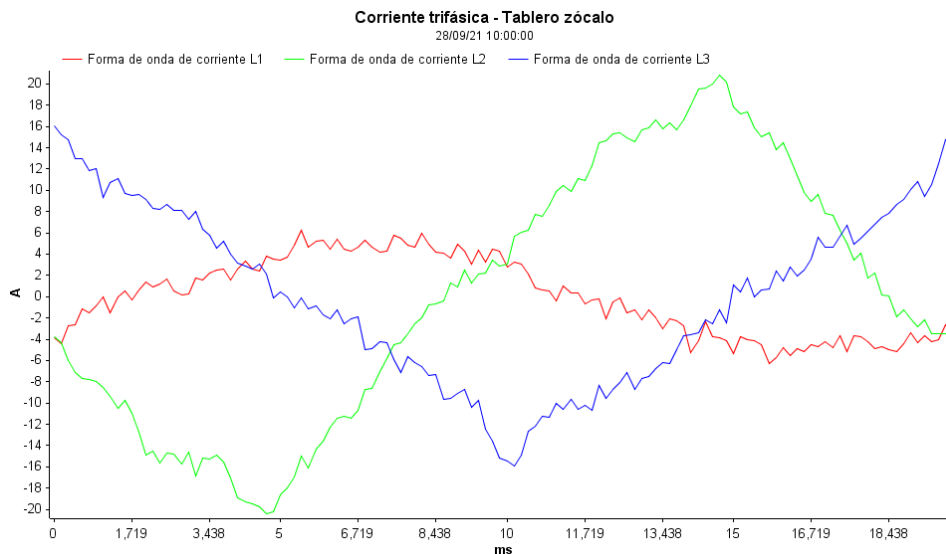


Ilustración 38: corriente trifásica en tablero zócalo.

THD_i en zócalo. Se realizó el gráfico de THD_i mostrado en la Ilustración 39. De este se puede ver que existen instantes donde los niveles de distorsión de corriente son significativos,

alcanzando niveles superiores al 30%, aumentando considerablemente en periodos nocturnos, que es cuando se encienden la mayor cantidad de iluminación.

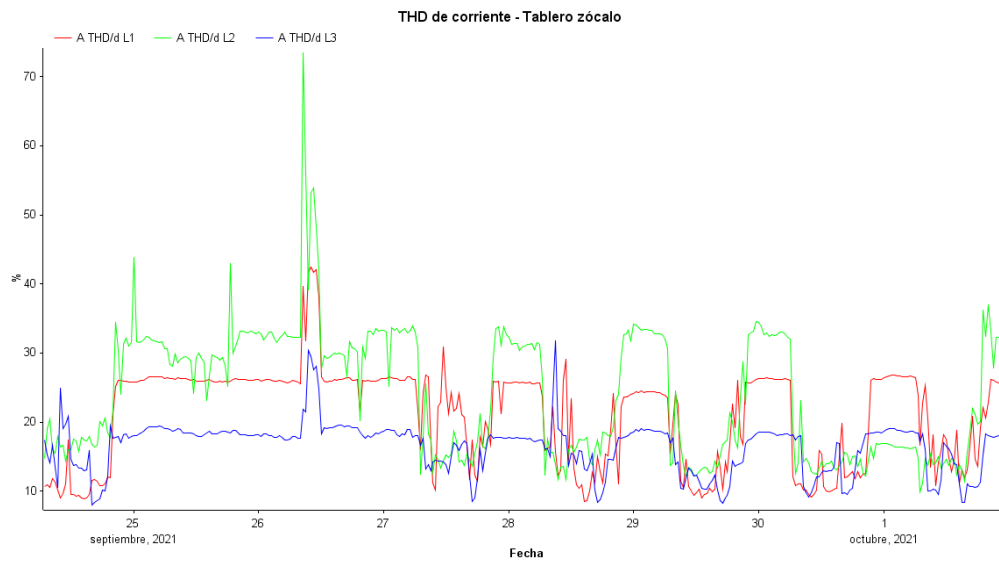


Ilustración 39: THD de corriente en tablero zócalo.

Corriente trifásica 7mo piso. En la Ilustración 40 se observa la corriente trifásica en el séptimo piso durante un periodo. Se observa como las formas de onda de las distintas fases no presentan una forma sinusoidal, siendo estas distorsionadas por los armónicos que generan las cargas no lineales conectadas.

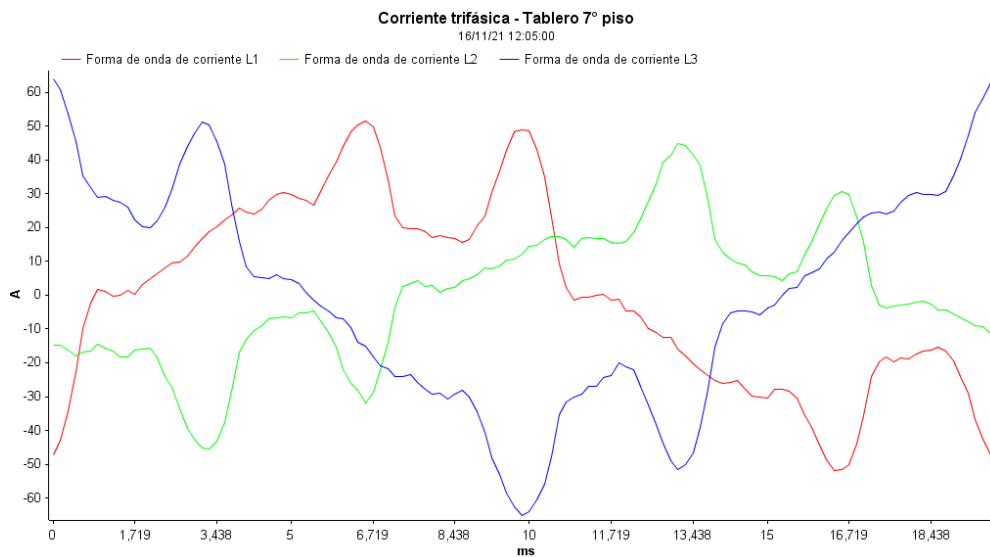


Ilustración 40: corriente trifásica en tablero 7mo piso.

THD_i 7mo piso. Para conocer en mayor detalle los niveles de distorsión armónica que posee la corriente, se procede a analizar el índice THD_i, el cual se muestra graficado en la Ilustración 41. De este se puede ver que existen instantes donde los niveles de distorsión de corriente son significativos, alcanzando niveles máximos del 65.28% en la línea 1, 74.57% en línea 2 y 57.15% en línea 3.

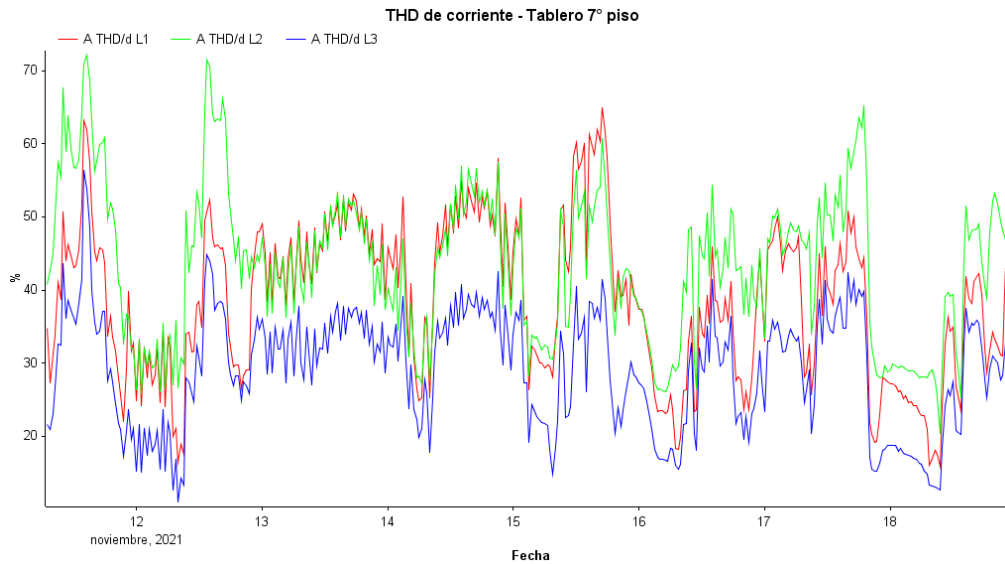


Ilustración 41: THD de corriente en tablero 7° piso.

La Tabla 18 muestra el THD_i para cada tablero y sus tres fases. En esta se ve que en el zócalo se presentaron niveles máximos de distorsión armónica durante el fin de semana, mientras que en el tablero del 7mo piso se presentaron niveles máximos durante la semana. Dado que los niveles de distorsión armónica total durante la mayor parte del tiempo son superiores al 20% es necesario verificar que el TDD cumple con los establecido en la norma IEEE 519.

Tabla 18: mínimos y máximos registrados en THD de corriente.

Tableros	THD _i día semana			THD _i fin de semana			
		L1	L2	L3	L1	L2	L3
Zócalo	Max	22.86	36.95	17.98	25.92	48.88	18.08
	Min	15.02	17.42	8.32	17.14	25.32	18.71
7mo piso	Max	65.28	74.57	57.15	60.86	58.37	45.62
	Min	16.16	26.16	10.81	24.06	27.76	17.36

Voltaje trifásico zócalo. En la Ilustración 42 se observa la forma de onda de voltaje de la instalación trifásica. De esta se puede ver que se tiene sinusoidales casi puras, presentando magnitudes similares y desfase de casi 120°, lo cual indica que posee un bajo desequilibrio de tensión. También se puede observar que se presenta una contaminación armónica muy leve, el cual se hace notar en la cumbre de las sinusoidales provocando un leve achatamiento.

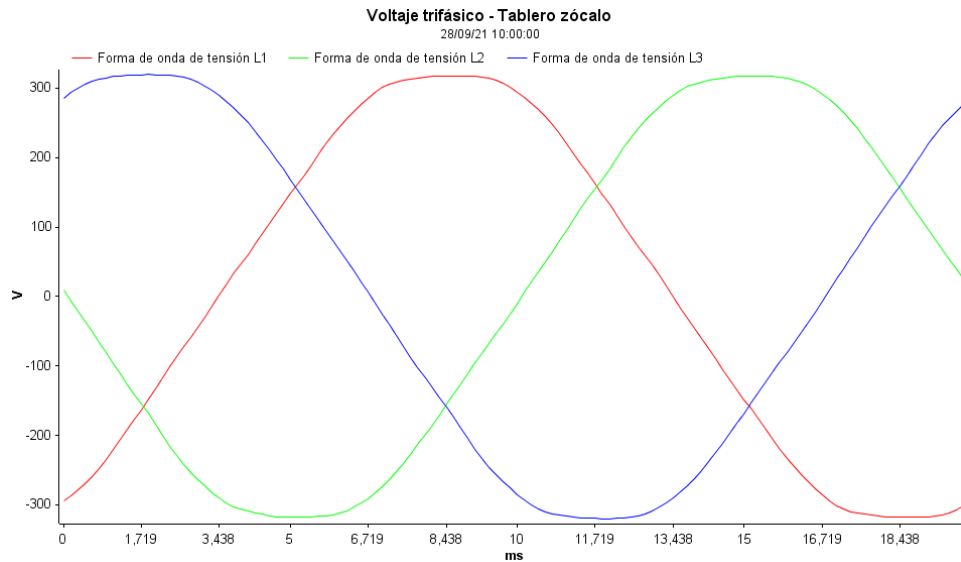


Ilustración 42: voltaje trifásico en tablero zócalo.

THD_V zócalo. Para conocer en mayor detalle los niveles de distorsión armónica que posee el voltaje, se procede a analizar el índice THD_V, el cual se muestra graficado en la Ilustración 43. De este se puede ver que se alcanzan niveles de distorsión de voltaje de a lo mucho el 3%, lo cual tiene sentido, ya que, como se vio anteriormente la forma de onda de voltaje no se encuentra casi distorsionada.

Cabe destacar que el peak registrado donde se ve que el THD_V alcanzó valores superiores al 5%, se debe al evento ocurrido en la instalación eléctrica. El THD_V aumento puesto que durante estos momentos el voltaje en las fases se redujo considerablemente y por definición si se calcula el THD con un voltaje de suministro bajo, el porcentaje de THD aumentará.

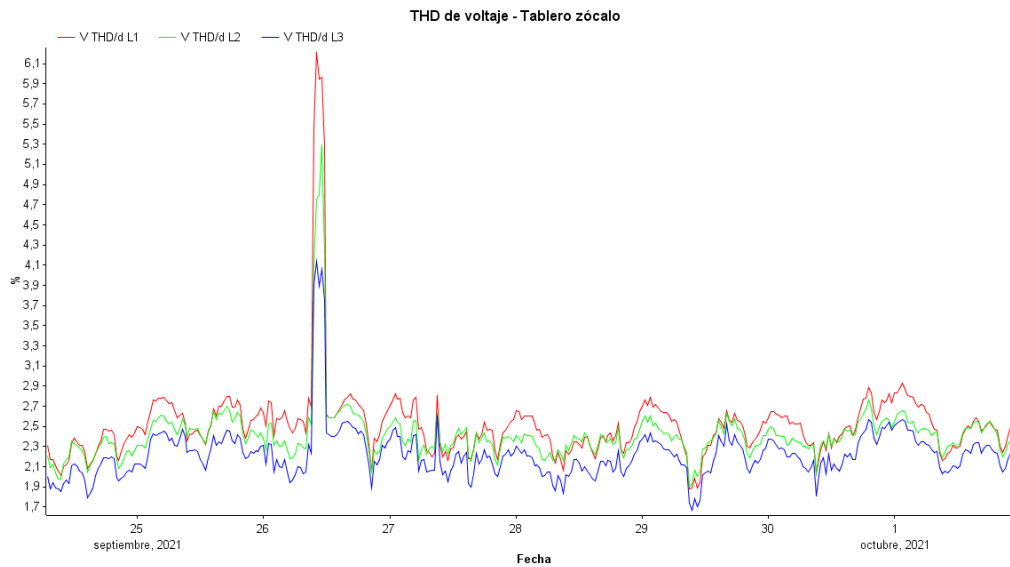


Ilustración 43: THD de voltaje en tablero zócalo.

Voltaje trifásico 7mo piso. En la Ilustración 44 se observa la forma de onda del voltaje durante un periodo a frecuencia fundamental para cada una de las fases que componen la instalación eléctrica. De esta se puede ver que la forma de onda de las corrientes trifásicas son casi ondas sinusoidales lo cual a priori se puede ver que no existe un gran contenido armónico que la esté afectando.

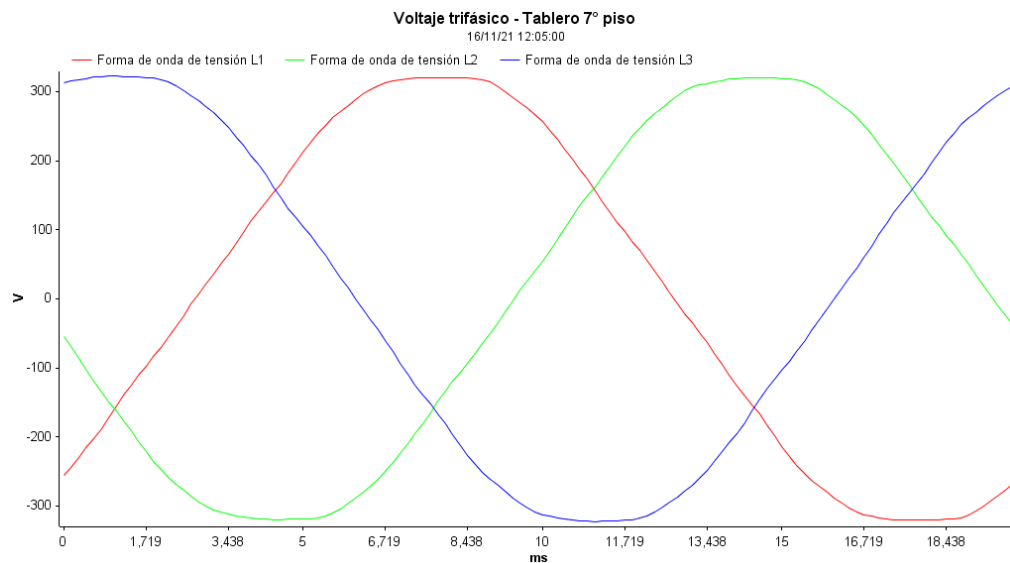


Ilustración 44: voltaje trifásico en tablero 7° piso.

THD_v 7mo piso. De la Ilustración 45 se puede confirmar lo mencionado anteriormente, ya que, como se ve el THD_v es bajo teniendo un valor máximo del 3.09% en línea 1 y un valor mínimo del 1.4% en línea 3, valores medidos que se encuentran por debajo del límite del 5% fijado por la NTCSSD.

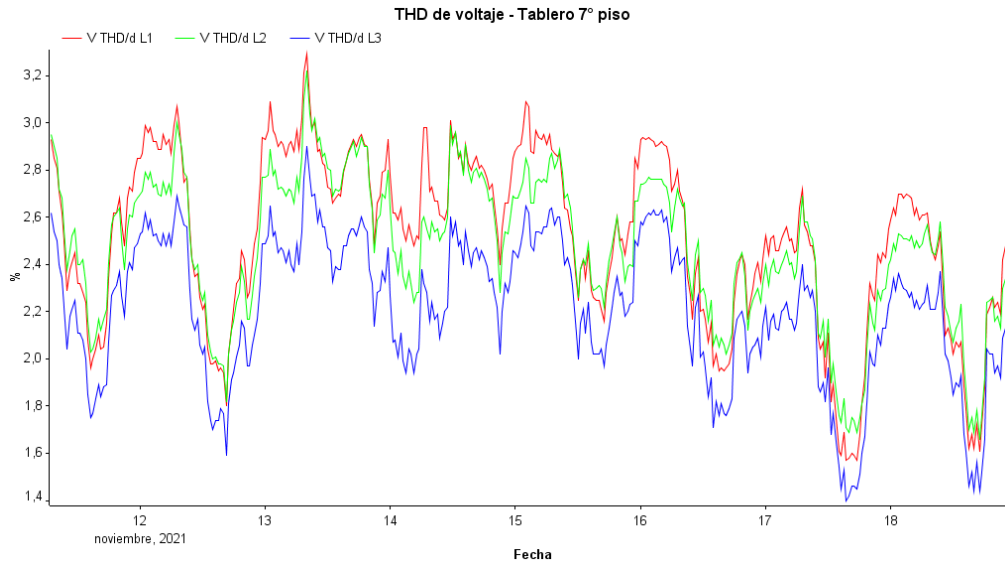


Ilustración 45: THD de voltaje en tablero 7mo piso.

La Tabla 19 muestra un resumen del THD_v para cada tablero y sus tres fases. En esta se ve que en el tablero de zócalo se presentaron niveles máximos de distorsión armónica durante la semana, mientras que en el tablero del 7mo piso se presentaron niveles máximos durante el fin de semana. Al realizar un análisis normativo se ve que el índice de THD de voltaje cumple con la norma en ambos puntos de medición, ya que como se establece en la norma, el máximo valor que se puede tener sin que se presenten problemas es del 5%.

Tabla 19: mínimos y máximos de THD de voltaje.

Tableros	THD _v día semana			THD _v fin de semana			
		L1	L2	L3	L1	L2	L3
Zócalo	Max	3.3	2.88	3.04	2.85	2.73	2.56
	Min	1.81	1.84	1.66	2.01	2.02	1.86
7mo piso	Max	3.09	2.85	2.64	3.31	3.23	2.9
	Min	1.51	1.63	1.4	2.48	2.29	1.92

6.2.3. Armónicos individuales de corriente y voltaje

Armónicos individuales de corriente. La Ilustración 46 muestra el espectro armónico de corriente expresada en porcentaje de la corriente de carga, de aquí se puede observar que el armónico que mayor corriente aporta luego de la fundamental es el 3ro en la línea 3 con un valor de 13.81%, seguido de este viene el 5to con un valor de 7.08% y luego el 7mo armónico con un valor del 6.5%. Puesto que el 3ro, el 9no y 15to corresponden a armónicos de secuencia cero, se tendrán corrientes de secuencia cero circulando por el conductor neutro. Además, al estar alimentando mayormente cargas leds se presenta un espectro con mayor cantidad de componentes armónicas de orden superior, el cual es propio de iluminación de bajo consumo como leds y tubos leds.

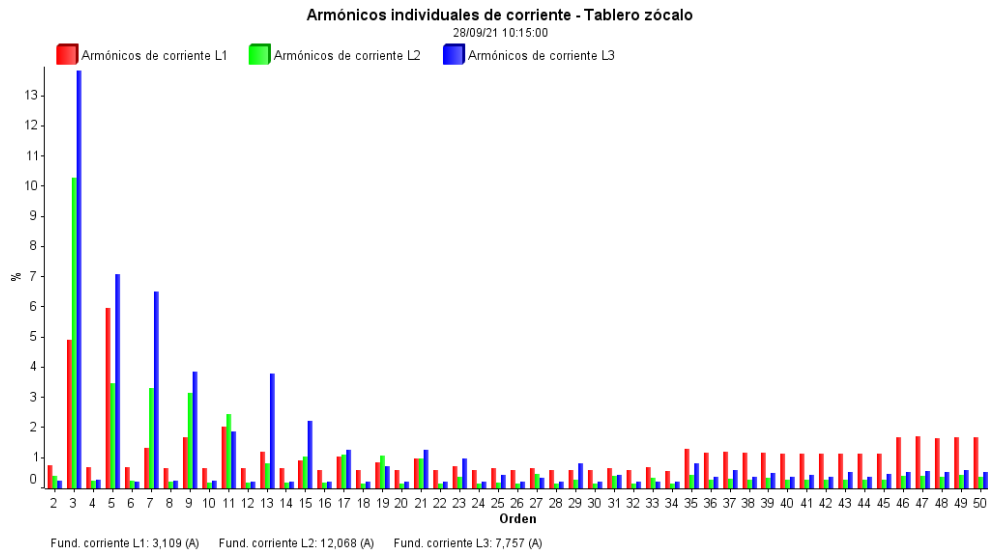


Ilustración 46: armónicas individuales de corriente en tablero zócalo.

En cuanto a la Ilustración 47 se puede ver que el armónico predominante es el 5to con un 31.28% en la línea 2, seguido viene el 7mo armónico que presenta un 30.13%. También hay que tener en cuenta el 3er armónico con un 12.67% en la línea 1, el cual al ser de secuencia cero aportara corriente al neutro.

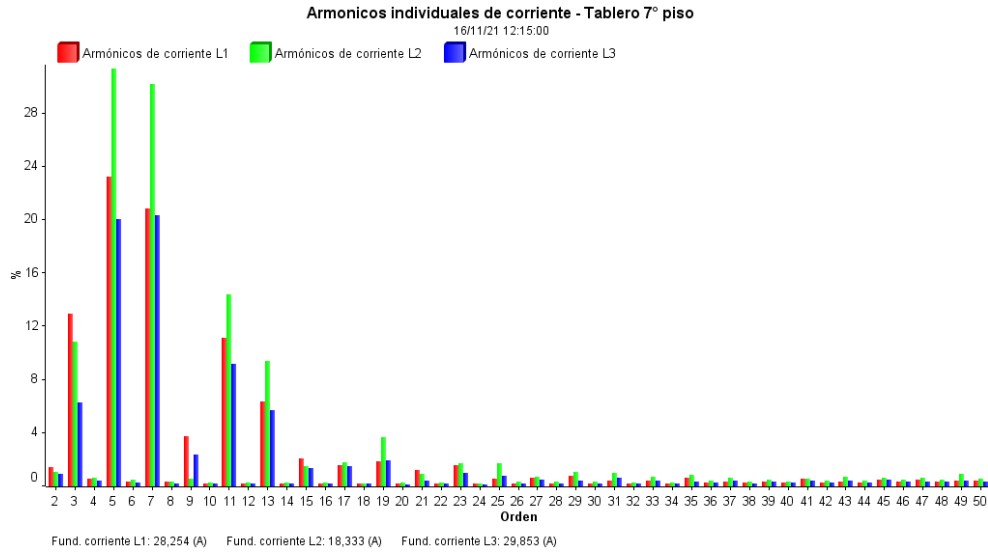


Ilustración 47: armónicos individuales de corriente en tablero 7° piso.

Tras un análisis normativo se observa que los armónicos predominantes corresponden al 3er, 5to y 7mo armónico, los cuales presentan valores medidos por encima a los que establece la NTCSSD con límites del 4%.

Armónicos individuales de voltaje. Se observa tanto en la Ilustración 48 como en la Ilustración 49 que en los diferentes puntos de medición se presentan componentes armónicos en tensión muy similares. Predominando en el tablero del zócalo el armónico 5to en la fase 2 con un valor de 2.17%. Al igual en el tablero del séptimo piso predominando el 5to armónico en la fase 2 con un valor de 2.2%.

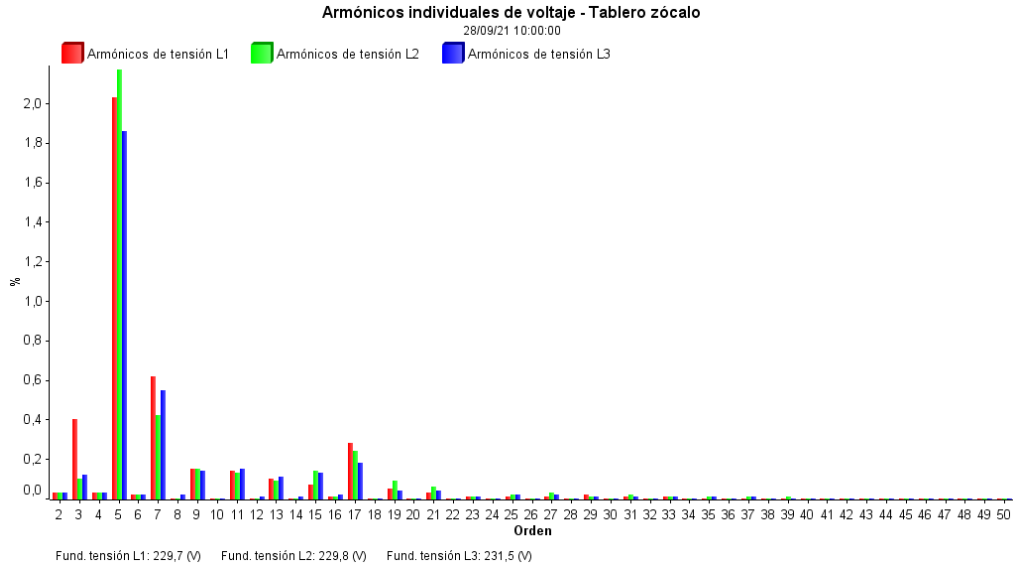


Ilustración 48: armónicos individuales de tensión en tablero zócalo.

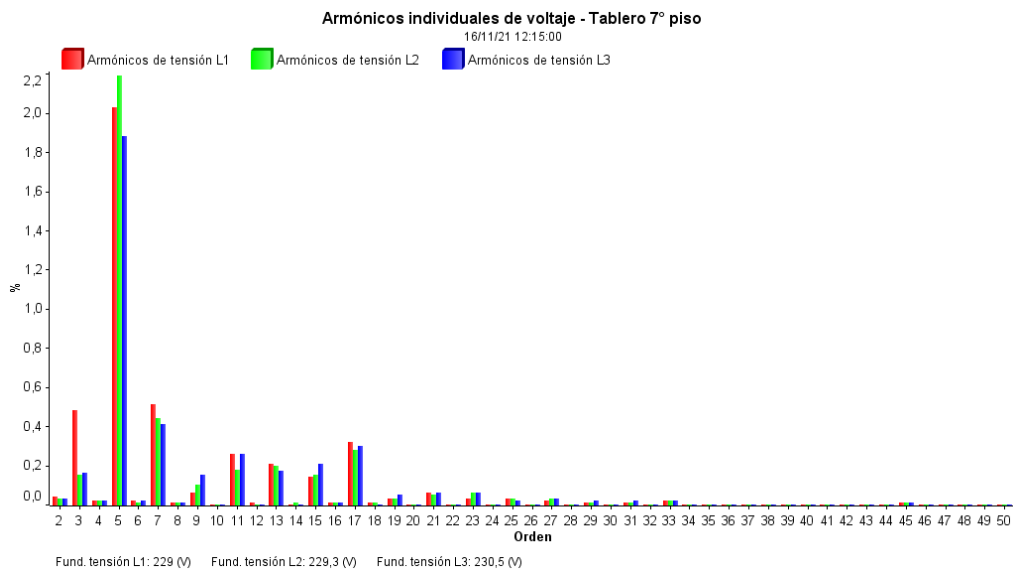


Ilustración 49: armónicos individuales de tensión en tablero 7° piso.

Al realizar un análisis normativo se puede ver que no se presentan escenarios anormales, en ningún punto de medición, ya que, según la NTCSSD, el 5to armónico no debe superar el 3%, notando que en este caso este armónico predomina solo con un 2.2%, cumpliéndose así lo estipulado en la NTCSSD.

6.2.4. Distorsión de demanda total

Las mediciones de distorsión armónica graficadas anteriormente pueden dar una falsa sensación de riesgo, ya que, en condiciones de baja carga se pueden presentar altos niveles de THD de corriente sin presentar un peligro real para el sistema estudiado. En consecuencia, se procede a estudiar la distorsión de demanda total (TDD), la cual brinda una mejor idea acerca del impacto real de la distorsión armónica existente en el sistema eléctrico.

Para el estudio de este índice se hará uso de algunos de los datos del transformador existente en la universidad, los cuales se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20: datos del transformador.

Tensión en AT [kV]	Tensión en BT [kV]	Potencia nominal [kVA]	Frecuencia [Hz]	Refrigeración	Impedancia cortocircuito [%]	Conexión	Peso [Kg]
13.2	0.4	1000	50	Transformador seco, refrigeración natural por aire	6.54	Dyn 1	2490

Primero es necesario calcular la máxima corriente demandada (I_L), la cual se usa para calcular la distorsión de demanda total (TDD) y la relación de corto circuito (SCR). Tomando como caso hipotético que el transformador se encuentra trabajando a plena carga la corriente máxima demandada se calcula como sigue:

$$I_L = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot V_N} \quad (\text{ec. 25})$$

Donde:

- S_T : potencia aparente del transformador, en [kVA].
- V_N : voltaje nominal, en [kV].

Reemplazando los datos del transformador en la ecuación (25) se obtiene la siguiente corriente máxima demandada:

$$I_L = \frac{1000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0.4 \text{ kV}} = 1443 \text{ A}$$

Esta corriente junto al THD_i se usaron para calcular los valores de TDD mostrados en la Tabla 21.

Tabla 21: TDD medido en cada tablero.

Día	TDD Tablero Zócalo [%]			TDD Tablero 7° piso [%]		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	0.037	0.148	0.078	2.58	2.51	2.52
2	0.019	0.084	0.021	1.24	1.28	1.20
3	0.027	0.094	0.021	0.59	0.51	0.55
4	0.073	0.135	0.127	0.81	0.70	0.75
5	0.033	0.140	0.123	1.29	1.19	1.18
6	0.130	0.143	0.147	1.21	1.15	1.17
7	0.088	0.167	0.135	1.55	1.52	1.50
Promedio	0.058	0.130	0.093	1.32	1.27	1.26

Una vez calculada la distorsión de demanda total, se procede a calcular la corriente de corto circuito tal como sigue:

$$I_{SC} = \frac{I_L}{Z_{SC}} \quad (\text{ec. 26})$$

Donde:

- I_L : corriente de máxima demandada, en [A].
- Z_{SC} : impedancia de corto circuito, en [%]

Reemplazando los datos del transformador y la corriente máxima demanda en la ecuación (26) se obtiene lo siguiente:

$$I_{SC} = \frac{1443 \text{ A}}{0.0654} = 22064.22 \text{ A}$$

Finalmente, se determina la relación de corto circuito (SCR) usando los valores anteriormente calculados.

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{22064.22 \text{ A}}{1443 \text{ A}} = 15.29$$

Una vez obtenida la distorsión de demanda total (TDD) y la relación de corto circuito se pueden definir los límites de distorsión en base a la norma IEEE 519. Esta tiene estipulado que

para un $\frac{I_{SC}}{I_L} < 20$, el TDD medido debe ser menor al 5%. Por consiguiente, se puede decir que la elevada distorsión armónica de corriente mostrada anteriormente no presenta un problema, ya que, al revisar la Tabla 21 se ve como el máximo %TDD registrado fue del 2.58%.

6.2.5. Mediciones en el neutro

Se registraron los valores presentados en la Ilustración 50 y la Ilustración 51, en donde se ve que la corriente que fluye por el conductor neutro es elevada presentándose instantes en que la corriente de neutro es igual o superior a las corrientes de fases obtenidas durante el consumo semanal. Esto se debe a que la corriente del neutro se ve afectada por desequilibrios de cargas y/o a distorsiones armónicas, las cuales se detallan a continuación:

Corrientes de desequilibrio: en los sistemas eléctricos balanceados no existen corrientes en el neutro, pero en la práctica el concepto de sistema balanceado prácticamente no existe. Si se considera un caso real de un sistema desequilibrado de 4 hilos, la corriente de neutro viene dada por la ecuación (27).

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_N \quad (\text{ec. 27})$$

Si estas corrientes son desbalanceadas, es decir, presentando corrientes con diferentes amplitudes y desfases, estas se pueden expresar en términos de sus componentes simétricas, tal como se muestra en la ecuación (28).

$$(I_1^+ + I_1^- + I_1^0) + (I_2^+ + I_2^- + I_2^0) + (I_3^+ + I_3^- + I_3^0) = I_N \quad (\text{ec. 28})$$

Al encontrarse desfasadas las corrientes de secuencia positiva y negativa, estas se eliminarán entre sí resultando cero en el nodo de neutro, mientras que las corrientes de secuencia cero no se eliminan entre sí al no presentar desfases, sino que se sumaran entre ellas. En consecuencia, se tendrán corrientes de secuencia cero fluyendo por el conductor neutro.

$$I_1^0 + I_2^0 + I_3^0 = I_N \quad (\text{ec. 29})$$

Los desequilibrios de corriente se deben usualmente a que los usuarios no realizan un control al conectar las cargas monofásicas y terminan sobrecargando una o dos fases por encima de las otras, provocando corrientes de secuencia cero en el neutro.

Corrientes armónicas: otra corriente que puede ser perjudicial para los sistemas eléctricos corresponde a las corrientes armónicas de secuencia cero, es decir, armónicos múltiplos de 3 que se caracterizan por retornar por el neutro sumándose entre sí, aumentando la corriente en el conductor. Estas corrientes son generadas por equipos que utilizan electrónica de potencia.

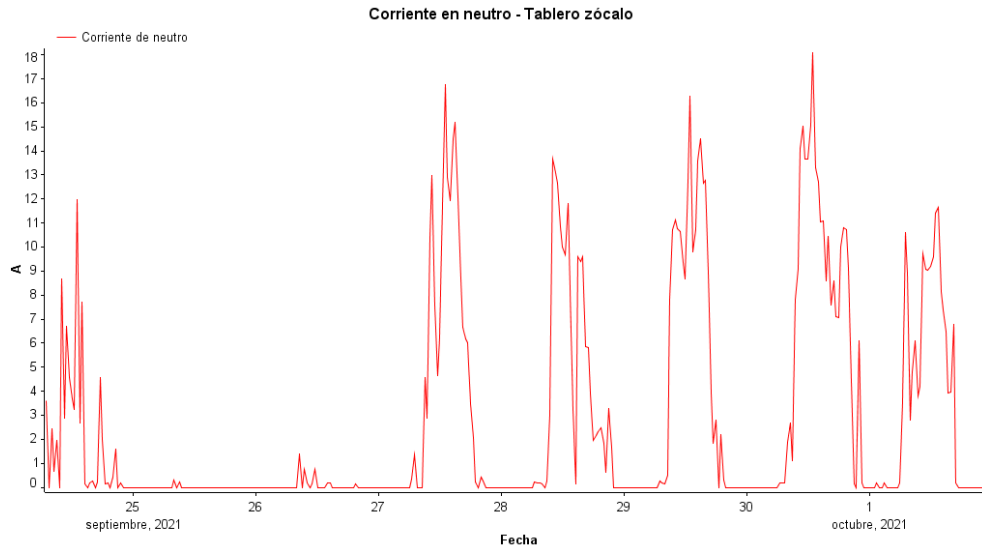


Ilustración 50: corriente de neutro en tablero zócalo.

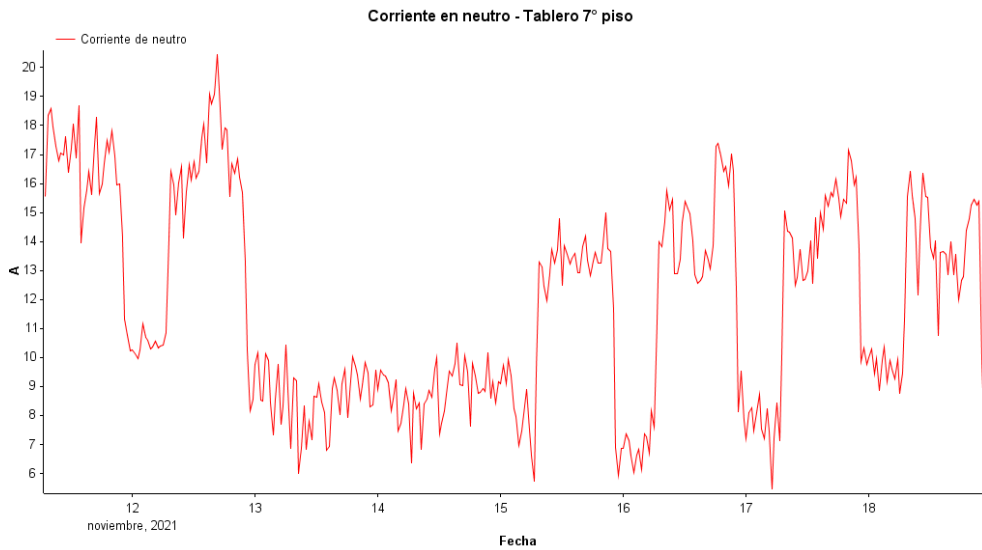


Ilustración 51: corriente de neutro en tablero 7mo piso.

Al comparar las corrientes de neutro durante los días hábiles en consumos altos, se ve que ambos puntos de medición poseen corrientes similares siendo levemente mayor en el 7mo piso. Además, se ve que ambos puntos siguen una clara tendencia de aumentar su corriente de

neutro durante la jornada laboral de los días hábiles. Esto se debe a que durante esta jornada se enciende una mayor cantidad de equipos no lineales que generan desequilibrios de corriente y armónicas de secuencia cero, provocando este aumento de corriente en el conductor neutro. Asimismo, durante el fin de semana y periodos nocturnos se ve que en el zócalo existen corrientes casi nulas, mientras que en el 7mo piso se presentaron corrientes más altas durante estas mismas condiciones, las cuales se deben a consumos como la iluminación, servidores o por aparatos encendidos en modo stand-by, entre otros.

Si se considera que el conductor se dimensiono de forma errónea puede provocar que este se deteriore con el tiempo e incluso se llegue a cortar lo que provocaría un neutro flotante. Por ende, al dimensionar el conductor neutro se debe tener en cuenta un estimado de la corriente que circulara por dicho conductor, para lo cual se utiliza la ecuación (30) que considera las corrientes armónicas y de desequilibrio.

$$I_N = \sqrt{I_{desq}^2 + \sum I_{3k}^2} \quad (\text{ec. 30})$$

6.3. Evento ocurrido durante mediciones

Durante la etapa de medición no se detectaron fallas en equipos conectados en la instalación que pudieran afectar la calidad de energía, sin embargo, durante el día 26 de septiembre del 2021, se presentó una perturbación propia de la red provocando un arco eléctrico entre un animal y un equipo de medida en MT, ocasionando que se destruyeran algunos componentes eléctricos tales como relay y contactores.

A continuación, en la Tabla 22, se presenta un registro de las variaciones de tensión ocasionadas por la falla mencionada, indicando el tipo de evento al que corresponde, la fase que fue afectada, así como también la fecha y hora en que ocurrió.

Tabla 22: registro de eventos ocurridos.

Tipo de evento	Fase	Fecha	Hora
Hueco	L1	26-09-2021	8:16:23
Hueco	L2	26-09-2021	8:16:23
Hueco	L3	26-09-2021	8:16:23
Interrupción	L1	26-09-2021	8:16:23
Interrupción	L2	26-09-2021	8:16:23
Hueco	L1	26-09-2021	8:16:23
Hueco	L2	26-09-2021	8:16:23
Interrupción	L1	26-09-2021	9:20:37
Interrupción	L2	26-09-2021	9:20:37
Interrupción	L3	26-09-2021	9:20:37
Sobretensión	L1	26-09-2021	9:21:53
Sobretensión	L2	26-09-2021	9:21:53
Sobretensión	L3	26-09-2021	9:21:53
Interrupción	L1	26-09-2021	11:39:19
Interrupción	L2	26-09-2021	11:39:19
Interrupción	L3	26-09-2021	11:39:19

A continuación, en la Ilustración 52 se presenta la forma de onda registrada durante la interrupción ocurrida en la fase 3 el día 26 de septiembre de 2021 a las 9:20:37 hrs, de esta se puede observar que el voltaje nominal es inferior al 10%, alcanzando una duración de 1'15" 570ms, entrando en la categoría de interrupciones de larga duración.

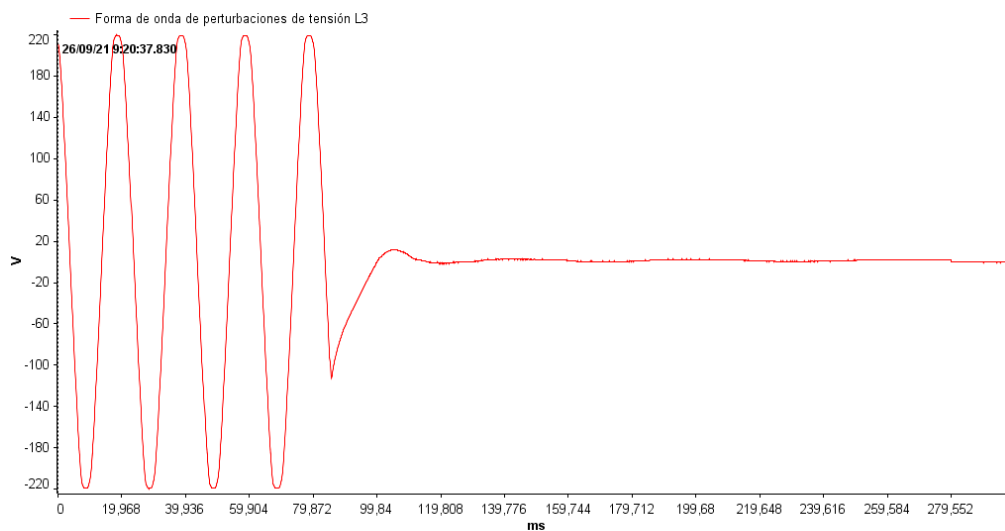


Ilustración 52: Interrupción ocurrida en Fase 3.

En la Ilustración 53 se presenta la forma de onda registrada durante los eventos de huecos de tensión ocurridos en la fase 1 y 2 el día 26 de septiembre a las 8:16:23 hrs, de esta se puede observar que el voltaje nominal de ambas fases se encuentra en un rango inferior al 90%, alcanzando una duración de los eventos de 220 ms y 230 ms para la fase 1 y fase 2.

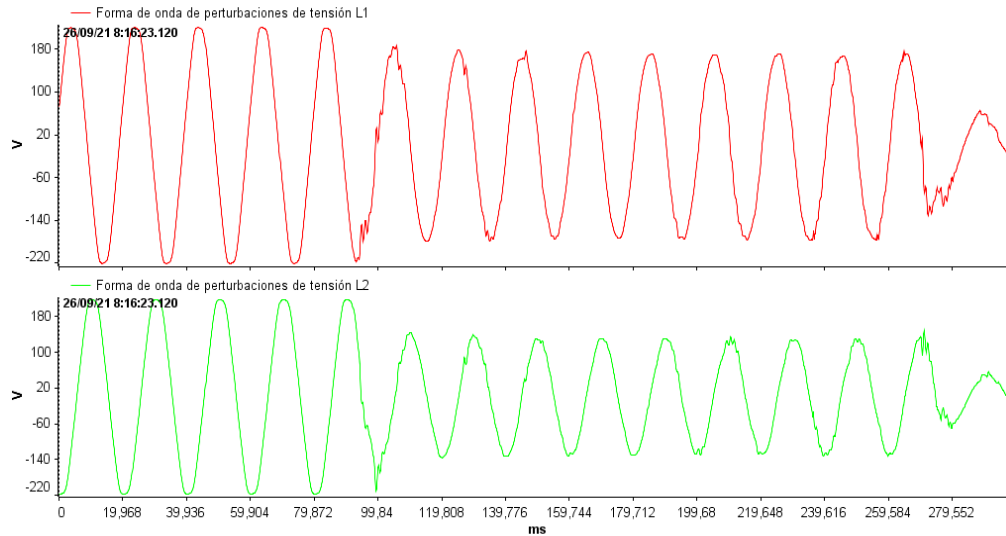


Ilustración 53: huecos de tensión ocurridos en las fases 1 y 2.

6.4. Discusión de los resultados

El estudio tuvo como objetivo analizar e identificar los parámetros que se encuentran fuera de los rangos permisibles por la NTCSSD y normas internacionales de forma que permita conocer el estado de la calidad de la energía en el campus Rancagua de la Universidad de O'Higgins.

Tras realizar los análisis de cada parámetro estudiado, se identificó que la calidad de energía puede verse degradada debido a que existe un permanente desequilibrio de corriente entre las fases, presentando altos desequilibrios durante la semana en el zócalo con un valor del 27.6%, mientras que en el 7mo piso se presentaron desequilibrios altos durante el fin de semana con un valor de 18.92%, los cuales se encuentran por encima de los rangos normales de operación.

Asimismo, se encontraron niveles preocupantes de distorsión armónica en corriente, predominando armónicos impares y de secuencia cero, por lo que al tratarse de un sistema trifásico de 4 hilos (tres fases y neutro) los armónicos de secuencia cero provocan que exista una

corriente en el conductor neutro. Las distorsiones armónicas máximas se presentaron en el tablero del 7mo piso durante la semana con un valor del 74.57%, mientras que en el zócalo se presentaron distorsiones altas el fin de semana con un valor del 48.88%. Cabe destacar que, al presentarse estos niveles elevados de distorsión armónica fue necesario asegurarse de que presentaran un riesgo real para el sistema estudiado lo que llevo a estudiar el TTD y SCR.

Por último, cuando se compararon los índices de calidad calculados en los días hábiles con los del fin de semana, se vio que los desequilibrios de voltajes no presentaron una gran variación a pesar de que se presentaban variaciones de voltajes levemente mayores durante los fines de semana. La distorsión de voltaje presento niveles máximos en el 7mo piso durante el fin de semana con un valor del 3.31%, mientras que el zócalo presento valores mayores durante la semana con un valor de 3.3%. Cabe destacar que todas estas perturbaciones no presentaron valores que sobrepasaran los limites estipulados por las normas, por lo tanto, la calidad de energía en la Universidad de O'Higgins no debería verse afectada por estas perturbaciones eléctricas.

A continuación de forma detallada se muestran los resultados promedios obtenidos tras las mediciones de las variables eléctricas estudiadas.

6.4.1. Análisis de Voltaje

En el análisis de la calidad de energía eléctrica de la universidad de O'Higgins, según los cálculos de variaciones de voltaje, ambos puntos de medición obtuvieron voltajes normales de operación presentando variaciones de voltaje de alrededor del 4.08%, los cuales están dentro del límite de tolerancia del $\pm 7.5\%$ según la NTCSSD. Se presento que las variaciones de voltaje durante el día tendían a disminuir y durante la noche a aumentar, ya que el consumo aumentaba en horas laborales y disminuía en horarios nocturnos. Cabe mencionar que las variaciones de voltaje aumentaron levemente durante el fin de semana. Asimismo, las cargas no lineales de baja potencia no afectaron en gran medida el desequilibrio de voltaje, pues se presentaron niveles de VUF promedio del 0.44%, el cual se encuentra dentro del límite de tolerancia del 2% establecido

en la NTCSSD, presentando ligeramente mayor desequilibrio de tensión durante el fin de semana. Con estas mediciones en principio las cargas conectadas en la instalación eléctrica no se deberían ver afectadas. En [40] se obtuvieron conclusiones similares, estableciendo que superar el límite propuesto por la norma EN-50160 puede provocar efectos negativos en mediciones y motores eléctricos.

6.4.2. Análisis de Corriente

Las corrientes más altas registradas se presentaron durante la semana en ambos puntos de medición. Teniendo horarios de mayor consumo entre las 12:00–15:00 hrs en el tablero zócalo y las 14:00–16:00 hrs en el tablero séptimo piso, presentando mayormente cargada la línea 2 y la línea 3 respectivamente. Por otro lado, se presentaron desequilibrios de corriente promedios del 29.48% y 20.17% en el tablero del zócalo y en el tablero del 7mo piso respectivamente, teniendo que los desequilibrios de corriente mayores se presentaron durante la semana en el tablero del zócalo, mientras que en el tablero del séptimo piso se registraron desequilibrios más altos durante el fin de semana. Estos niveles de desequilibrio se encuentran fuera del rango normal de operación correspondiente al 10%, sin embargo, determinar el nivel de afectación en la calidad de energía se dificulta, ya que no se tiene estándares que lo regulen de forma oficial.

6.4.3. Análisis de THD de voltaje

Tal como se vio en los gráficos realizados, en ambos puntos de medición se presentaron niveles de THD_V muy similares con valores promedio del 2.55%, los cuales se encuentran por debajo del límite del 5% establecido en la NTCSSD. Cabe destacar que el tablero del séptimo piso la distorsión era levemente mayor durante la semana, presentando en horario laboral distorsiones bajas, mientras que en horarios nocturnos la distorsión aumentaba, debido a que la carga disminuía. Puesto que existen grandes cantidades de equipos como PC y tubos fluorescentes e iluminación led los armónicos individuales de voltaje que predominaron fueron impares como el

3ero, 5to, 7mo y 17mo, los cuales se encontraban por debajo de los valores límites estipulados por la NTCSSD.

6.4.4. Análisis de THD de corriente

De los gráficos realizados se vio que en ambos puntos de medición se presentaron niveles de THD_i altos, presentando mayor distorsión en el tablero del séptimo piso alcanzando un valor promedio del 42.8%, predominando los armónicos 3ro, 5to, 7mo, 11mo y 13ro, los cuales se encontraban por encima de los valores límites del 4% y 2% estipulados por la NTCSSD. Al tener distorsiones de corriente tan elevadas llevo a utilizar el indicador TDD y el SCR, obteniendo una alta relación de corto circuito de 15.29, lo que define los límites de distorsión de demanda total en el 5% y dado que se presentaron resultados máximos del 1.32%, los niveles que se creían altos de distorsión armónica no fueron del todo riesgosos debido a la carga ligera que se tenía en la universidad.

Este nivel de distorsión armónica es ocasionado por el tipo de cargas que se encuentran presenten en la universidad, es decir, por el alto número de computadores, aires acondicionados, iluminación led. Cabe destacar que durante la semana en horario laboral se presentó el mayor contenido armónico, mientras que en horarios nocturnos la distorsión disminuía. En [3], se presentaron resultados que se asemejan a los obtenidos en este trabajo, presentando niveles de distorsión armónica en corriente que sobrepasaban los límites estipulados por las normas eléctricas, para lo cual propuso la solución de utilizar filtros que reduzcan el armónico 5to y 7mo que eran los predominantes.

En relación con lo anterior, el alto SCR obtenido indica que se tiene mejor regulación de voltaje, lo que quiere decir que, ante variaciones de cargas, la tensión de suministro se mantendrá casi constante. Esto se comprobó al momento de analizar el voltaje, ya que ante variaciones de cargas se presentaron bajas variaciones de tensión. También es importante destacar que, dada la complejidad para obtener la corriente máxima demandada, el índice TDD obtenido se calculó tomando como caso hipotético que el transformador se encuentra trabajando a plena carga.

Dicho resultado puede afectar directamente al TDD calculado obteniendo valores algo superiores en situaciones reales con cargas más ligeras.

6.4.5. Análisis de corriente y voltaje de neutro

Durante el estudio no se presentaron voltajes en el conductor neutro. Sin embargo, se presentaron corrientes elevadas en dicho conductor en ambos puntos de medición, tales que en momentos determinados eran igual o superior a las corrientes de fase. Estas corrientes en el neutro se deben a los desequilibrios de corriente y al contenido armónico de secuencia cero. Hay que tener en cuenta que cuando se proyectó la instalación eléctrica se dimensionó el conductor neutro considerando corrientes elevadas, por lo cual no se debería presentar problemas con esta corriente alta en el neutro. En [41] para solucionar problemas similares, presentaron una forma de corregir potencias reactivas, corrientes desequilibradas y corrientes en el neutro, debido a cargas no lineales y desequilibradas mediante el uso de un filtro activo, al utilizar esta solución se lograron resultados favorables compensando la potencia reactiva circulante en el sistema, así como también eliminar casi por completo la corriente en el neutro.

En la Tabla 23 y la Tabla 24 se presentan cuadros resumen para ambos puntos de conexión indicando los valores promedios obtenidos de cada parámetro estudiado indicando si es que este cumple o no con la norma técnica.

Tabla 23: resumen de los parámetros eléctricos en el tablero del zócalo.

Parámetro Evaluado	Dato promedio medido		Rango normativo aceptable	Observaciones	Diagnostico final
Tensión	L1	232.6 V	±7.5%	Voltajes normales de operación	Cumple con la norma técnica
	L2	232.7 V			
	L3	234.5 V			
Corriente	L1	2.3 A	Depende del diámetro del conductor	Corrientes bajas, con dimensionamiento de conductor adecuado	Cumple con la norma técnica
	L2	6.1 A			
	L3	4.3 A			
Corriente Neutro	2.59 A		Depende del diámetro del conductor	Promedio de corrientes bajo, sin embargo, durante jornada laboral presenta peak de corriente similares a la corriente de fase	Cumple con la norma técnica
Desequilibrio de Tensión	0.44%		$VUF \leq 2\%$	Desequilibrio de voltaje bajo no presenta escenarios graves	Cumple con la norma técnica
Desequilibrio de Corriente	29.48%		No estandarizado, en la práctica se usa: $CUF \leq 10\%$	No se respeta los valores con los que se suele trabajar, por lo que se debe reorganizar las cargas	No cumple
Armónicos de Tensión	THD _v L1	2.53%	THD _v ≤ 5%	Las armónicas se encuentran dentro de los rangos estipulados por NCSSD	Cumple con la norma técnica
	THD _v L2	2.41%			
	THD _v L3	2.22%			
Armónicos de Corriente	THD _i L1	21.23%		La mayor parte de los armónicos superan lo estipulados en la NTCSSD	No cumple con la norma técnica
	THD _i L2	24.49%			
	THD _i L3	16.64%			
Distorsión de Demanda Total	L1	0.05%	TDD ≤ 5%	Se encuentra dentro del rango estipulado por la norma IEEE 519	Cumple con la norma técnica
	L2	0.13%			
	L3	0.09%			

Tabla 24: resumen de parámetros eléctricos en tablero del 7° piso.

Parámetro Evaluado	Dato promedio medido		Rango normativo aceptable	Observaciones	Diagnostico final
Tensión	L1	232.5 V	±7.5%	Voltajes normales de operación	Cumple con la norma técnica
	L2	232.9 V			
	L3	233.9 V			
Corriente	L1	19.88 A	Depende del diámetro del conductor	Corrientes que el conductor soporta	Cumple con la norma técnica
	L2	15.87 A			
	L3	24.61 A			
Corriente Neutro	11.68 A		Depende del diámetro del conductor	Cableado dimensionado para corrientes altas	Cumple con la norma técnica
Desequilibrio de Tensión	0.38%		$VUF \leq 2\%$	Desequilibrio de voltaje bajo no presenta escenario grave	Cumple con la norma técnica
Desequilibrio de Corriente	20.17%		No estandarizado, en la práctica se usa: $CUF \leq 10\%$	No se respeta los valores con los que se suele trabajar, por lo que se debe reorganizar las cargas	No cumple
Armónicos de Tensión	THD _v L1	2.55%	THD _v ≤ 5%	Distorsión baja que se adecua a los estipulado en la norma técnica	Cumple con la norma técnica
	THD _v L2	2.49%			
	THD _v L3	2.23%			
Armónicos de Corriente	THD _i L1	38.12%		La mayor parte de los armónicos superan lo estipulados en la NTCSSD	No cumple con la norma técnica
	THD _i L2	42.8%			
	THD _i L3	28.39%			
Distorsión de Demanda Total	L1	1.32%	TDD ≤ 5%	Se encuentra dentro del rango estipulado por la norma IEEE 519	Cumple con la norma técnica
	L2	1.27%			
	L3	1.26%			

7. Recomendaciones

Una vez realizado el estudio de calidad de energía en el campus Rancagua de la universidad de O'Higgins para evitar que se presenten problemas en la calidad de la energía eléctrica, es necesario considerar recomendaciones que corrijan o mitiguen las perturbaciones o problemas presentados durante el estudio. Las propuestas presentadas se centran en corregir

específicamente los desequilibrios de corrientes y los armónicos de secuencia cero que son los principales causantes de que fluya corriente por el conductor neutro.

A pesar de tener un dimensionamiento adecuado en el cableado, se busca minimizar la corriente en el neutro, ya que es importante tener en cuenta que por lo general no se utilizan disyuntores que limiten la corriente en el conductor, por lo que para corrientes excesivas se tendrán pérdidas adicionales. Además, es posible que se generen diferencias de tensión excesivas entre el neutro y la tierra. Por último y no menos importante se debe considerar que muchas veces por falta de conocimiento se manipula el conductor sin elementos de seguridad al creer que este no transporta corriente, lo cual puede poner en riesgo la seguridad de las personas. Por tales razones se proponen las siguientes medidas para reducir o minimizar la corriente existente en el campus Rangua de la universidad de O'Higgins.

7.1. Redistribución de cargas en la instalación

Al realizar el estudio en un sector educacional, las principales cargas que se conectan en diferentes puntos de la red son no lineales monofásicas. Este tipo de cargas provocan una mayor facilidad de cargar una fase por encima de las otras. Cuando sucede esto, para reducir las corrientes desequilibradas uno de los métodos que se suele utilizar es redistribuir las cargas monofásicas conectadas a modo de balancear el consumo existente en cada fase.

Por lo general, realizar una redistribución en las cargas conectadas bastaría para reducir el desequilibrio en la corriente. Sin embargo, en este caso al tratarse de un sector educacional uno de los problemas que se presenta al implementar este método es que se tiene un gran número de consumidores que se comporta de forma distinta, lo cual dificulta al realizar una redistribución que corrija completamente el desequilibrio en la corriente, ya que no se tiene un control en la conexión y desconexión de los aparatos eléctricos.

Debido a esta carga variable se presenta otra propuesta para solucionar los desequilibrios de corriente. Esta corresponde a filtros de armónicos, los cuales se comportan mejor antes condiciones de carga variable.

7.2. Filtros de armónicos

Para reducir el desequilibrio de corriente en las fases y el contenido armónico existente, se propone utilizar filtros que reduzcan estas perturbaciones y en consecuencia disminuya la corriente en el neutro. Puesto que la universidad posee grandes cantidades de cargas que se conectan y desconectan de forma aleatoria, se propone el uso de filtros activos, los cuales se comportan mejor en condiciones de cargas variables en comparación con los filtros pasivos.

De las mediciones obtenidas, es claro ver que la solución más acertada es utilizar un filtro activo en paralelo, debido que al usar esta configuración se esperaría reducir los armónicos de corriente ocasionados por las cargas conectadas, obteniendo señales de corriente casi senoidales [37]. Además, al usar esta configuración se tiene la ventaja de que no se debe intervenir el circuito, ya que es una conexión paralela. Puesto que la red trifásica posee neutro, se debe utilizar un filtro activo de 4 piernas para eliminar o reducir las perturbaciones en dicho conductor. En relación con lo anterior la Ilustración 54 muestra la topología propuesta de un filtro activo en paralelo de cuatro ramas.

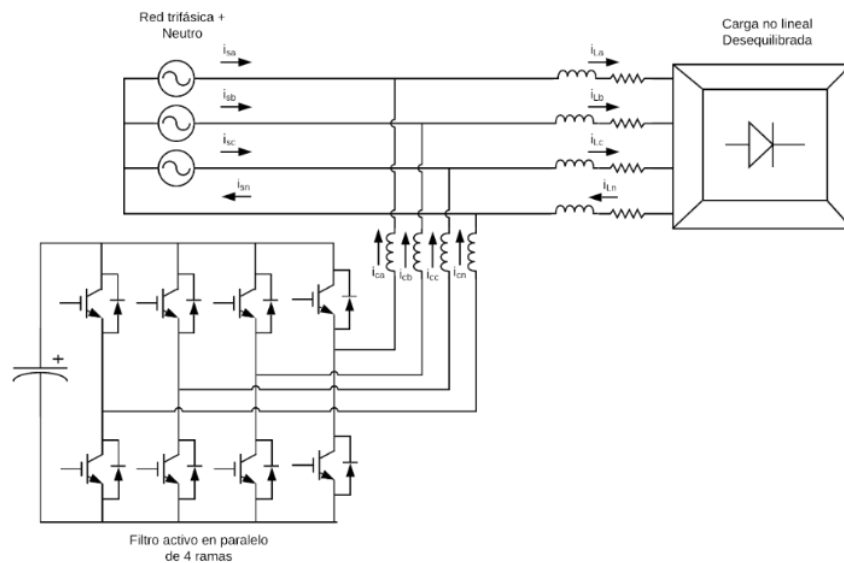


Ilustración 54: filtro activo propuesto.

8. Conclusiones

En el estudio realizado en la presente memoria se recopilieron datos de la instalación eléctrica del campus Rancagua de la Universidad de O'Higgins para conocer el estado de la calidad de energía eléctrica. A pesar de que en un principio se plantearon objetivos de conocer de manera completa la calidad de energía de la universidad, durante el proyecto el estudio se fue acotando, analizando una menor cantidad de perturbaciones. Sin embargo, los parámetros que se estudiaron permitieron identificar algunas perturbaciones eléctricas en la instalación de la universidad que se encontraban fuera de los límites establecidos por las normas eléctricas, tales como: distorsiones armónicas en corriente y desequilibrios de corriente, también se presentaron corrientes altas en conductor neutro.

De las mediciones realizadas con el analizador de redes se vio que se presentaron variaciones máximas de tensiones del 4.08% encontrándose dentro del rango $\pm 7.5\%$ estipulado por la NTCSSD. Además, se vio que no se presentaron elevadas variaciones de voltaje ante los cambios de carga en la universidad, lo cual indica que se tiene un alto SCR que proporciona una buena regulación de voltaje. Asimismo, el desequilibrio de voltaje que se presentó fue aceptable, dado que durante el estudio poseía valores inferiores al 2% estipulado por la NTCSSD.

La distorsión armónica total en voltaje presento valores promedios máximos en el 7mo piso del 2.55%, los cuales se encuentran por debajo del límite del 5% establecido en la NTCSSD. Además, se presentaron armónicos individuales de tensión que cumplían en la totalidad con las tolerancias fijadas por la NTCSSD.

Los desequilibrios de corrientes promedios máximos corresponden al 29.48% en el tablero del zócalo. Estos niveles de desequilibrio se encuentran fuera del rango normal de operación correspondiente al 10%. Sin embargo, determinar el nivel de afectación en la calidad de energía se dificulta, ya que no se tiene estándares que regulen de forma oficial este indicador.

La distorsión armónica en corriente presento niveles altos y preocupantes de distorsión, predominando los armónicos 3ro, 5to, 7mo, 11mo y 13ro, los cuales se encontraban por encima de los valores límites estipulados por la NTCSSD. En consecuencia, se necesitó estudiar los índices TDD y SCR, obteniendo una relación de cortocircuito de 15.29, por lo que el TDD debe ser menor

al 5% estipulado por la NTCSSD, lo cual se cumple al medir un TDD promedio del 1.32% en el 7mo piso. Es importante tener en consideración que este valor no se calculó en condiciones reales de carga máxima demandada, lo que puede provocar un aumento de TDD si se calcula ante condiciones reales.

Debido a presencias de distorsiones armónica en corriente y desequilibrios de corriente, se podrían presentarán diversos problemas en la instalación eléctrica tales como: aumento de temperaturas en devanados de motores, aumento de pérdidas, calentamiento excesivo de conductores, disminución de la eficiencia del sistema eléctrico, retorno de corrientes por el neutro, entre otros problemas. Sin embargo, uno de los problemas que se logró identificar en los lugares de medición, correspondía a corrientes elevadas fluyendo en el neutro. A pesar de que el dimensionamiento de los conductores es adecuado a la carga demandada, estas corrientes pueden ser peligrosas, para personas e incluso para la instalación dado que no se suele utilizar disyuntores para limitar la corriente que fluye por el neutro generando perdidas adicionales de potencia. Es por ello que en este trabajo para reducir la corriente existente en el conductor neutro se propone la implementación de un filtro activo en paralelo de cuatro piernas que reduzcan las distorsiones armónicas en corriente y los desequilibrios de corriente.

Si bien se presentaron algunas perturbaciones que se encontraban fuera de los límites establecidos por las normas, estas no presentan un escenario grave en la instalación debido a la correcta proyección de la instalación eléctrica del campus Rancagua de la Universidad de O'Higgins. En base a toda esta información recopilada se concluye que en general las variables eléctricas analizadas como la tensión, corriente y las distorsiones armónicas son aceptables, reflejando que se tiene un buen estado en la calidad de la energía.

9. Trabajo futuro

Como trabajo futuro, dentro de los mismos alcances del proyecto, es posible profundizar el estudio de calidad de energía en el campus Rancagua de la Universidad de O'Higgins analizando las perturbaciones e índices de calidad que no se tuvieron en cuenta durante este trabajo, tales como el factor de potencia, Flicker y variaciones de frecuencia, los cuales se pueden incluir para realizar un estudio de calidad de energía completo. Para llevar a cabo esto, se recomienda que al analizador de redes portátil se le asignen una mayor cantidad de puntos de monitoreo lo que permitirá recopilar una mayor cantidad de datos sobre el sistema eléctrico. En caso de presentar registros fuera de los rangos normales de operación establecer estrategias para solucionar y/o mitigar los problemas que pudieran surgir con estas nuevas perturbaciones.

Como punto adicional, dado que en este trabajo se propuso la implementación de filtros armónicos para reducir la corriente existente en el conductor neutro, en trabajos futuros es posible estudiar el diseño de filtros activos y su implementación. Para el diseño de estos filtros existen un gran número de elementos adicionales que deben estudiarse para poder llevar a cabo la implementación correcta, entre estos, se debe tener en cuenta el tipo de conexionado, el control adecuado y la topología a utilizar.

Bibliografía

- [1] R. Erazo y P. Quevedo, «Análisis de calidad de energía y rediseño del sistema eléctrico en la planta industrial corporación de proyectos múltiples multiproyectos S.A.», Tesis de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [2] O. Cervantes, «Metodología de medición de calidad de energía eléctrica en base a normas nacionales e internacionales para la Universidad de la Costa – CUC», Tesis de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Costa CUC, Barranquilla, 2015.
- [3] A. Quispe, «ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN – SALIDA I S.E. BELLAVISTA», Tesis de Ingeniería Mecánica Eléctrica, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO, 2018.
- [4] T. Rajesh y S. Rajeswari, «Power quality improvement and reactive power compensation using enhanced sliding mode controller based shunt active power filter and static VAR compensator», *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, n.º 2.8, pp. 543–549, mar. 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i2.8.10518.
- [5] M. Tesařová, «Power Quality and Quality of Supply», *Renewable Energy Sources*, University of West Bohemia: Železná Ruda–Špičák, Czech Republic, 2011.
- [6] Berasategui et al, «ANÁLISIS DE PERTURBACIONES EN REDES ELÉCTRICAS, CAUSAS Y CONSECUENCIAS EN SISTEMAS DE CONTROL INDUSTRIAL», *Rumbos tecnológicos*, 4 de septiembre de 2019.
<http://rumbostecnologicos.utnfrainvestigacionyposgrado.com/areas-tematicas/ingenieria-electrica/analisis-de-perturbaciones-en-redes-electricas-causas->

- y-consecuencias-en-sistemas-de-control-industrial/ (accedido 11 de septiembre de 2021).
- [7] S. Bhattacharyya y S. Cobben, *Consequences of Poor Power Quality – An Overview*. IntechOpen, 2011. doi: 10.5772/13787.
- [8] P. S. Kole y R. L. Chakrasali, «Voltage Regulation Of 11KV Distribution Feeders –A Case Study, International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research», vol. 5, n.º 1, p. 6, 2018.
- [9] Comisión Nacional de Energía, «NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DE SERVICIO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN». diciembre de 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/12/Norma-T%C3%A9cnica-de-Calidad-de-Servicio-para-Sistemas-de-Distribuci%C3%B3n.pdf>
- [10] C. A. Reineri y J. C. G. Targarona, «Unbalance on Power Systems: A General Review», p. 8, 2009.
- [11] C. I. Ciontea, «The Use of Symmetrical Components in Electrical Protection», en *2019 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, College Station, TX, USA, mar. 2019, pp. 1–8. doi: 10.1109/CPRE.2019.8765870.
- [12] R. Charoenwattana y U. Sangpanich, «Analysis of Voltage Unbalance and Energy Loss in Residential Low Voltage Distribution Systems with Rooftop Photovoltaic Systems», *E3S Web Conf.*, vol. 190, p. 00033, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202019000033.
- [13] J. Fernandez, S. Bacha, D. Riu, H. Turker, y M. Paupert, «Current unbalance reduction in three-phase systems using single phase PHEV chargers», en *2013 IEEE International*

- Conference on Industrial Technology (ICIT)*, feb. 2013, pp. 1940–1945. doi:
10.1109/ICIT.2013.6505975.
- [14] Y.-J. Wang, «Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor», *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 16, n.º 3, p. 6, 2001.
- [15] IEEE Std 1159–2019, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality», p. 98, 2019.
- [16] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, y W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality, Second Edition*. 2004.
- [17] UNE-EN 50160–2010 «Características de la tensión suministrada por la redes generales de distribución». 2001.
- [18] I. Diahovchenko, N. Sushchenko, A. Shulumei, y O. Strokin, «Influence of supply voltage and frequency variations on the electrical equipment and power consumption in LV and MV distribution networks», *energetika*, vol. 65, n.º 4, jun. 2020, doi:
10.6001/energetika.v65i4.4246.
- [19] Martínez, «El fenómeno de distorsión armónica en redes eléctricas», *Tecnura*, vol. 5, n.º 9, Art. n.º 9, jul. 2001, doi: 10.14483/22487638.6117.
- [20] C. González, «ESTUDIO DE CONTAMINACIÓN ARMÓNICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CONSIDERANDO CAMBIOS TOPOLÓGICOS DE LA RED EMPLEANDO DIgSILENT+DPL», Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso, 2019. Accedido:

- 24 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.usm.cl/handle/11673/47417>
- [21] E. H. Mayoral, M. A. H. López, E. R. Hernández, H. J. C. Marrero, J. R. D. Portela, y V. I. M. Oliva, «Fourier Analysis for Harmonic Signals in Electrical Power Systems», en *Fourier Transforms – High-tech Application and Current Trends*, G. S. Nikolic, M. D. Cakic, y D. J. Cvetkovic, Eds. InTech, 2017. doi: 10.5772/66733.
- [22] J. D. Arcila, «ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS». Ingeniería especializada IEB S.A, 2010. Accedido: 5 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en:
<https://pdfcoffee.com/armonicos-en-sistemas-electricos-5-pdf-free.html>
- [23] R. Vidal, «Estudio comparativo de las prestaciones obtenidas mediante tres técnicas de sincronización con la red eléctrica trifásica», Universitat Politècnica de Catalunya, 2011. Accedido: 24 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en:
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13780>
- [24] Circutor, «Armónicos: origen, efectos y soluciones», *Circutor*, 13 de mayo de 2019.
<http://circutor.es/es/productos/destacados/4622-armonicos-origen-efectos-y-soluciones> (accedido 28 de septiembre de 2021).
- [25] IEEE Std 519–2014, «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems», IEEE, 2014. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [26] R. Ingale, «Harmonic Analysis Using FFT and STFT», *IJSIP*, vol. 7, n.º 4, pp. 345–362, ago. 2014, doi: 10.14257/ijsip.2014.7.4.33.

- [27] IEEE Standard 519–2019, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality», ago. 2019.
- [28] A. Wilkins, J. Veitch, y B. Lehman, «LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update», en *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, sep. 2010, pp. 171–178. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618050.
- [29] «Manual de instrucciones MYeBOX 150, MYeBOX 1500.» 26 de junio de 2015. Accedido: 26 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://docs.circutor.com/docs/M084B01-01.pdf>
- [30] K. Wahab, M. Rahal, y R. Achkar, «Economic Improvement of Power Factor Correction: A Case Study», *JPEE*, vol. 09, n.º 06, pp. 1–11, 2021, doi: 10.4236/jpee.2021.96001.
- [31] Fluke, «¿Qué repercusiones tiene para el cliente la norma IEC 61000–4–30 Clase A?», *Fluke*, 9 de mayo de 2021. <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/calidad-de-la-energia-electrica/que-repercusiones-tiene-para-el-cliente-la-norma-iec-61000-4-30-clase-a> (accedido 4 de octubre de 2021).
- [32] T. Hoevenaars, K. LeDoux, y M. Colosino, «Interpreting IEEE STD 519 and meeting its harmonic limits in VFD applications», *IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, 2003. Record of Conference Papers.*, pp. 145–150, 2003, doi: 10.1109/PCICON.2003.1242609.
- [33] T. Vu, «Harmonic Allocation to Major Loads in Transmission Systems», University of Wollongong, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ro.uow.edu.au/theses1/1065>

- [34] F. Miyara, «Filtros activos». 2004. [En línea]. Disponible en:
<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/filtros-t.pdf>
- [35] Y. Zapata, «Análisis electrónico de las soluciones que existen en calidad de energía eléctrica y eficiencia energética», Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2010.
- [36] E. Reyes-Trujillo, J. J. Rodríguez-Rivas, y J. Robles-García, «Aplicación de un filtro activo de corriente para mejorar la calidad de la energía en un sistema eléctrico industrial», *IIT*, vol. 11, n.º 4, pp. 389-402, oct. 2010, doi: 10.22201/fi.25940732e.2010.11n4.033.
- [37] M. Lamich, «Eliminación de perturbaciones de baja frecuencia en redes eléctricas mediante compensadores estáticos», *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*, feb. 2015, Accedido: 17 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en:
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/95649>
- [38] S. Pérez Litrán, «Análisis y diseño de filtros activos serie e híbridos para la mejora de la calidad de la potencia eléctrica», Universidad de Huelva, Huelva, 2011.
- [39] C. J. H. Carimán, «CONTROL DE UN FILTRO ACTIVO PARALELO BASADO EN UN CONVERTOR FUENTE DE VOLTAJE DE 4-PIERNAS APLICADO A SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE 4-HILOS», Universidad de Chile, Santiago, 2016.
- [40] G. N. Popa, A. Iagăr, y C. M. Diniş, «Considerations on Current and Voltage Unbalance of Nonlinear Loads in Residential and Educational Sectors», *Energies*, vol. 14, n.º 1, p. 102, dic. 2020, doi: 10.3390/en14010102.
- [41] F. Martinez, B. R. Sanabria-Morel, T. A. Morel-Otazu, y J. Pacher, «Analysis of active power filters for load compensation using two-level and seven-level four-wire

converters», *Rev. cient. UCSA*, vol. 8, n.º 1, pp. 68–90, abr. 2021, doi:

10.18004/ucsa/2409-8752/2021.008.01.068.

- [42] General Cable Cocesa, «Catálogo de Productos». 2019. Accedido: 2 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en:

<https://www.gobantes.cl/pub/media/wysiwyg/catalogo/201910-Catalogo-de->

[Productos-GC.pdf](https://www.gobantes.cl/pub/media/wysiwyg/catalogo/201910-Catalogo-de-Productos-GC.pdf)

Anexo

1. Capacidades del analizador de red MYeBOX

1.1 Variables con las que trabaja el analizador de red

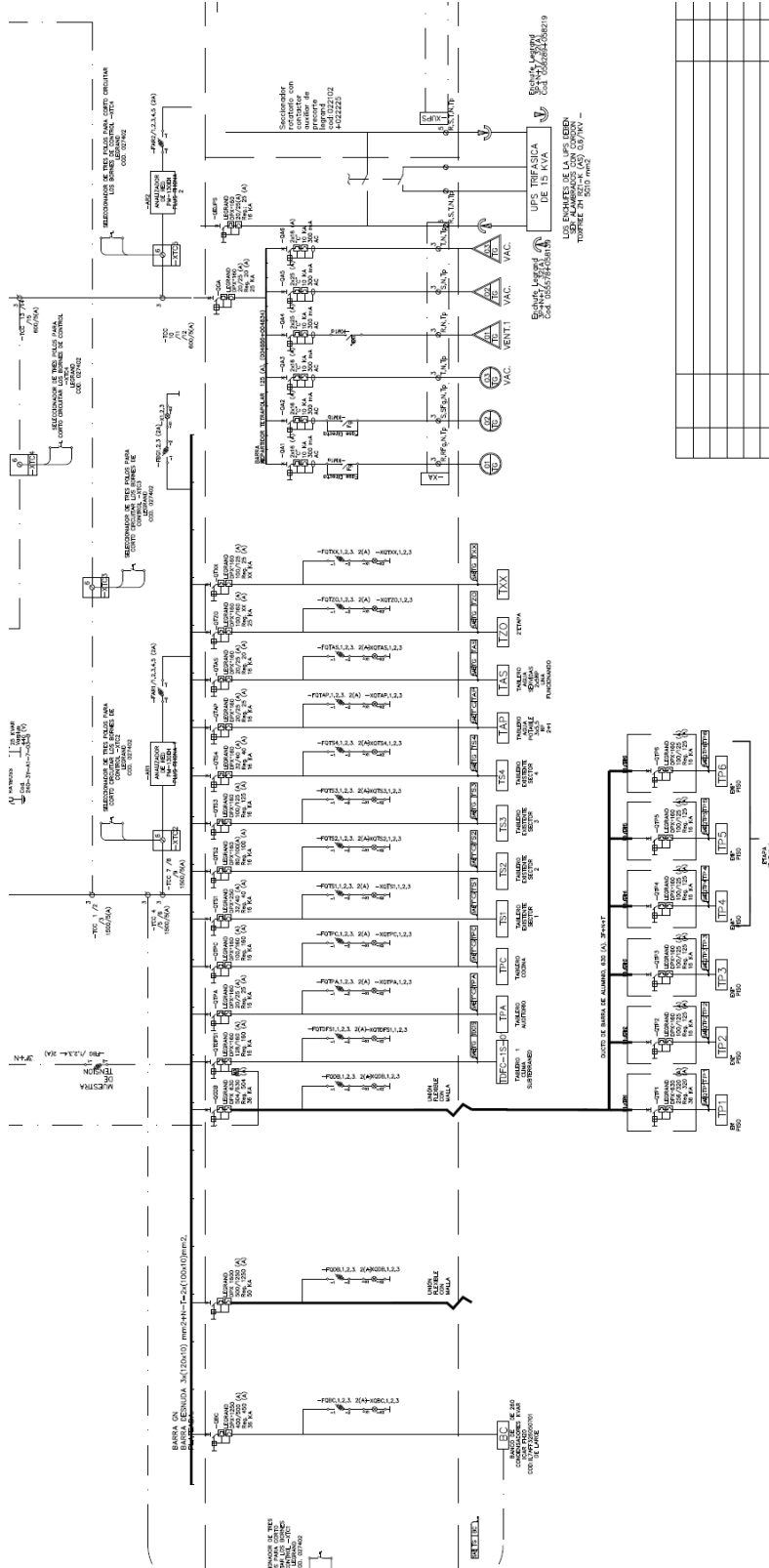
Variables	Unidades	Periodo de registro
Tensión fase-neutro	V _{ph-N}	5 min
Tensión fase-fase	V _{ph-ph}	5 min
Corriente	A	5 min
Corriente de fugas	A	5 min
Frecuencia	Hz	5 min
Potencia Activa	kW	5 min
Potencia Aparente	kVA	5 min
Potencia Reactiva Inductiva	kvarL	5 min
Potencia Reactiva Capacitiva	kvarC	5 min
Factor de potencia	PF	5 min
Factor de cresta	CF	5 min
K-factor	-	5 min
THD % Tensión	% THD V	5 min
THD % Corriente	% THD A	5 min
Descomposición armónica Tensión	harm V	5 min
Descomposición armónica Corriente	harm A	5 min
Flicker instantáneo	P _{inst}	5 min
Flicker PST	P _{st}	10 min
Energía Activa	kWh	5 min
Energía Reactiva Inductiva	kvarLh	5 min
Energía Reactiva Capacitiva	kvarCh	5 min
Desequilibrio de tensión	-	5 min
Asimetría de tensión	-	5 min
Tensión homopolar	-	5 min
Tensión directa	-	5 min

Tensión inversa	-	5 min
Desequilibrio de corriente	-	5 min
Asimetría de corriente	-	5 min
Corriente homopolar	-	5 min
Corriente directa	-	5 min
Corriente inversa	-	5 min
Máxima Demanda de la Corriente	A	15 min
Máxima Demanda de la Potencia Activa	kW	15 min
Máxima Demanda de la Potencia aparente	kVA	15 min

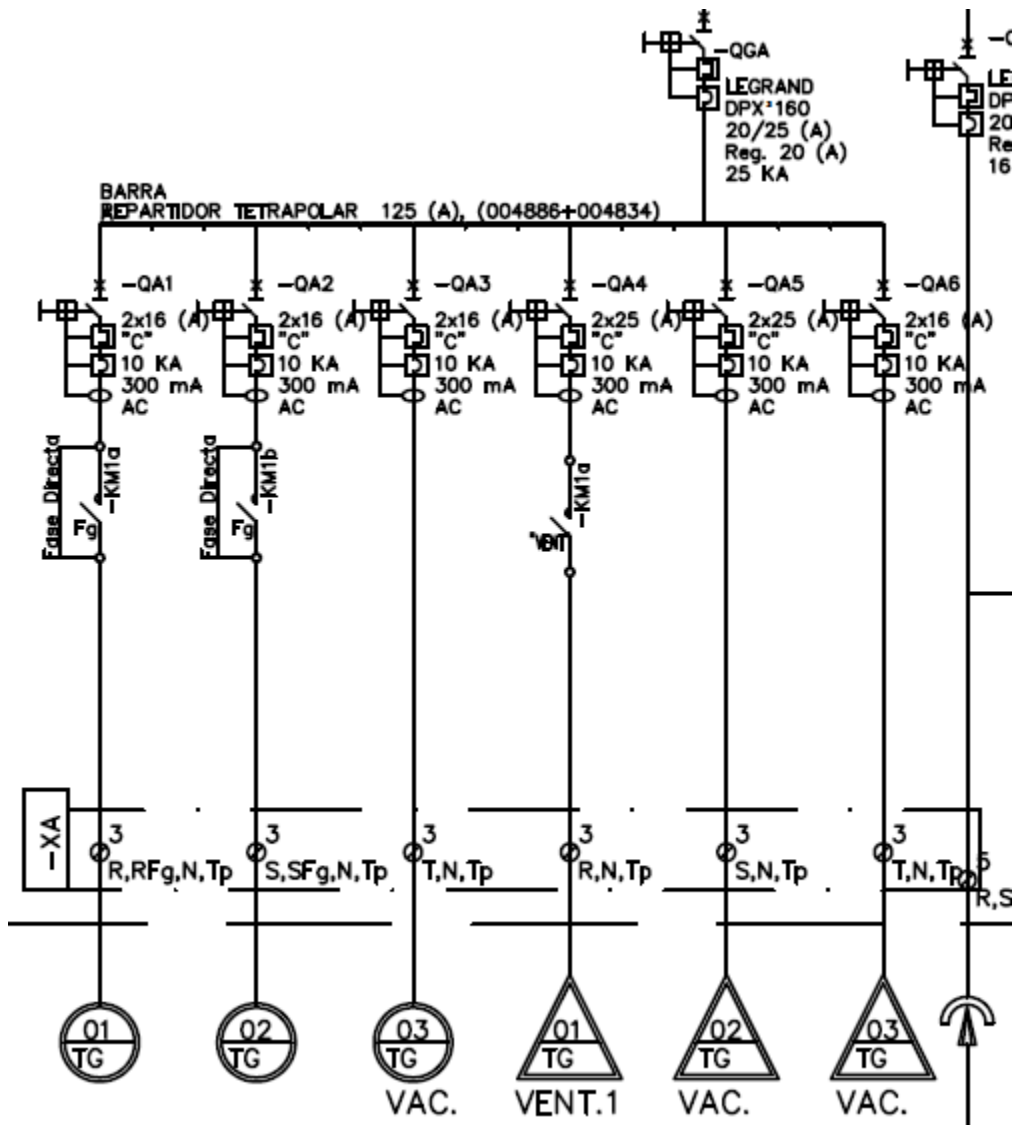
1.2 Precisión con la cual realiza mediciones el analizador de red MYeBOX 1500

Precisión de las medidas	
Medida de tensión (F-N)	Clase 0.2 (10 ...600 V~) (IEC 61557-12) Clase A (23 ...345 V~) (IEC 61000-4-30)
Medida de corriente	Clase 0.2 (1% ... 200%In) (IEC 61557-12)
Potencia activa y aparente	Clase 0.5 ± 1 dígito (IEC 61557-12)
potencia reactiva	Clase 1 ± 1 dígito (IEC 61557-12)
Energía activa	Clase 0.5S (IEC 62053-22)
Energía reactiva	Clase 1 (IEC 62053-23)
Frecuencia	Clase A (42.5 ... 69 Hz) (IEC 61000-4-30)
Factor de potencia	Clase 0.5 (IEC 61557-12)
THD de tensión	Clase I (IEC 61000-4-7)
Armónicos de tensión	Clase I (IEC 61000-4-7)
THD de corriente	Clase I (IEC 61000-4-7)
Armónicos de corriente	Clase I (IEC 61000-4-7)
Pinst Flicker	3 % (IEC 61000-4-15)
Pst Flicker	5 % (0.2 ... 10Pst) (IEC 61000-4-15)
Desequilibrio de tensión	Clase A (IEC 61000-4-30)
Asimetría de tensión	Clase A (IEC 61000-4-30)
Desequilibrio de corriente	Clase A (IEC 61000-4-30)
Asimetría de corriente	Clase A (IEC 61000-4-30)

2.2 Parte inferior del plano eléctrico estudiado.



2.3 Tablero eléctrico del zócalo en donde se ubicó el analizador de redes.



3. Cuadro para calcular el amperaje admisible en el conductor en base a la sección nominal.

Calibre AWG/kcmil	Sección nominal mm ²	Diámetro del conductor aprox. mm	Espesor aislación mm	Diámetro exterior aprox. mm	Peso total aprox. kg/km	Capacidad de corriente A		
						Ducto enterrado (1) Temp. amb. 20 °C	Direct. enterrado (2) Temp. amb. 20 °C	Aire libre (3) Temp. amb. 40 °C
14	2,08	1,9	0,7	5,5	48	26	40	-
12	3,31	2,4	0,7	6,1	62	40	53	-
10	5,26	3,0	0,7	6,5	84	51	69	-
8	8,37	3,8	0,7	7,4	118	61	108	83
6	13,3	4,7	0,7	8,4	164	79	139	110
4	21,2	6,0	0,9	10,0	244	104	178	145
2	33,6	7,7	0,9	11,5	363	137	230	190
1	42,4	8,7	1,0	12,6	443	158	261	225
1/0	53,5	9,4	1,0	13,7	547	182	297	260
2/0	67,4	10,7	1,1	15,1	678	212	340	300
3/0	85,0	11,7	1,1	16,3	805	240	379	345
4/0	107	12,9	1,2	18,2	1.028	278	433	400
250	127	13,8	1,2	19,4	1.200	308	471	445
350	177	17,4	1,6	23,1	1.655	375	557	550
500	253	20,8	1,7	26,8	2.340	473	684	695
750	380	25,2	2,0	32,9	3.570	599	840	900
1000	507	29,8	2,2	38,8	4.845	710	980	1075

Fuente: (General Cable Cocesa, 2019, p.19)

4. Placa de datos del transformador

SEA TEZZE DI ARZIGNANO (VI) ITALY
www.seatrasformatori.it

IEC 60076-11

DRY-TYPE TRANSFORMER FOR INDOOR

N° **3** Phases **50** Hz Type **TR-E**

N° **118160** **1000** kVA IP **54** Year **2018**

HIGH-VOLTAGE		LOW-VOLTAGE	
13,2 + 6 x 2,5 % kV			V
43,7 A			A
Insulation levels 17,5-35-35 kV			kV
Insulation temperature $\Delta\theta$ Winding 100 °C		$\Delta\theta$ Winding	°C
Connection symbol Yyn0		Classes E <input checked="" type="checkbox"/> C <input checked="" type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/>	
Short-circuit impedance 6,54 %		Type of cooling <input checked="" type="checkbox"/> AN <input type="checkbox"/> AN/AF	
MASS: Transformer 2490 Kg		Enclosure 350 Kg	

Ø Rope mm	Breaking load kg	Total mass kg
8	4200	< 1200
12	9750	< 2800
16	18500	< 5300
20	28600	< 8200
28	57100	< 16400

SITI TARGHE S.r.l. Capriate S. Gerardo (BG)

HIGH VOLTAGE - DANGER OF DEATH - DO NOT USE WATER TO BLOW DOWN FIRE