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 Lépez

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. Filtros activos 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. Análisis de Voltaje 93
6.4.2. Análisis de Corriente 94
6.4.3. Análisis de THD de voltaje 94

6.4.4. Análisis de THD de corriente 95
6.4.5. Análisis de corriente y voltaje de neutro 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 tension fundamental con señales armonicas. 31
Ilustración 9: triangulo 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.