INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Energética Soluciones y Consultoría IAC

"Estudio de calidad de energía eléctrica en la instalación de Laboratorios Stein, Costa Rica"

Informe de Práctica de Especialidad para optar por el Título
Ingeniero en Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura

REALIZADO POR

Luis Alejandro Brenes Hernández

COORDINADOR DE PRÁCTICA
Ing. Greivin Barahona Guzmán

Cartago, Mayo 2018

I SEMESTRE 2018

Carrera evaluada y acreditada por
Canadian Engineering Accreditation Board
Bureau Canadien d'Accréditation des Programmes d'Ingénierie

CC BY NC ND

TEC | Tecnológico de Costa Rica

SIBITEC

CARTA DE ENTENDIMIENTO

Fecha: 2018-06-04

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas del Tecnológico

Yo Luis Alejandro Brenes Hernández

carné No. 2013012240, ☑ si autorizo ○ no autorizo, al Sistema de Bibliotecas del Tecnológico (SIBITEC), disponer del Trabajo Final de graduación, del cual soy autor, para optar por el grado de Licenciatura, en la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, presentado en la fecha 2018-06-06, con el título Estudio de Calidad de Energía en Laboratorios Stein,

para ser ubicado en el Repositorio Institucional y Catálogo SIBITEC, con el objetivo de ser visualizado a través de la red Internet.

Firma de estudiante:

Correo electrónico: alebrenes13@gmail.com

Cédula No.: 115750454

Estudio de Calidad de Energía en Laboratorios STEIN, Costa Rica

Ing. Rodolfo Elizondo
Profesor asesor

Ing. Ismael Arroyo Chaves
Asesor empresarial

Ing. Gustavo Gómez Ramírez
Jurado

Ing. Gilberth Bonilla Castillo
Jurado

A mi madre, padre y hermana por estar siempre ahí para mí en todo momento.

A mi abuela, ejemplo de esfuerzo diario.

Datos personales

Nombre completo: Luis Alejandro Brenes Hernández

Número de cédula: 11575 0454

Número de carné: 2013012240

Edad: 23

Números de teléfono: 8869 7685, 2276 5345

Correos electrónicos: alebrenes13@gmail.com, luis@energetica.co.cr

Dirección exacta de domicilio. 400 mts.

sur Instituto de Enseñanza General Básica República de Panamá, San Antonio de Desamparados.

Datos de la empresa

Nombre: Energética Soluciones y Consultoría

Actividad Principal: Consultoría y diseño eléctrico

Dirección: Barrio Don Bosco, San José, Costa Rica

Calle 30, Entre Av. 6 y 10

Contacto: Ismael Arroyo Chaves

Teléfono: 2248 1035

Índice

1) Capítulo 1 - Reseña de la empresa 16

1.1) Servicio 16
1.2) Historia 16
1.3) Áreas de trabajo 16
1.4) Estudios eléctricos 17
2) Capítulo 2 - Descripción del proyecto 18

2.1) Objetivo general 20
2.2) Objetivos específicos 20
2.3) Lista de actividades 21
2.4) Justificación 22
2.5) Metodología a seguir 25
2.6) Alcance 26
3) Capítulo 3 – Marco teórico 27

3.1) Sección 1 - Calidad de energía 27
3.1.1) Términos de importancia 34
3.2) Sección 2 – Sags y swells 40
3.3) Sección 3 – Armónicos 43
3.4) Sección 4 – Parpadeo (Flicker) 52
3.5) Sección 5 – Transitorios de tensión 53
3.6) Sección 6 – Puesta a tierra 65
3.6.1) Medición con ganchos 67
3.6.2) Medición con picas 68
3.7) Sección 7 – Norma de la ARESEP 69
3.8) Sección 8 – Equipo de medición / Fluke 435-ll 76
4) Capítulo 4 - Análisis de resultados 78

4.1) Metodología 78
4.1.1) Procedimiento de medición 78
4.1.2) Evaluación 79
4.1.3) Actualización de diagrama unifilar de la planta 79
4.1.4) Selección de los puntos de medición 80
4.2) Resultados de las mediciones 81

4.3) Medición en subestación principal 82
4.3.1) Metodología de la medición 82
4.3.2) Punto de medición 84
4.3.3) Perfil de tensión 85
4.3.4) Mitigación de variaciones de tensión 87
4.3.5) Perfil de corriente 88
4.3.6) Potencia real, reactiva, aparente y factor de potencia 88
4.3.7) Energía 89
4.3.8) Frecuencia 89
4.3.9) Análisis armónico 89
4.3.10) Mitigación de armónicos 90
4.3.11) Desbalance entre fases 93
4.3.12) Curva ITIC-CBEMA 93
4.3.13) Registro de sag 93
4.4) Medición en TX-06 área administrativa 94
4.4.1) Metodología de la medición 94
4.4.2) Punto de medición 95
4.4.3) Perfil de tensión 96
4.4.4) Perfil de corriente 97
4.4.5) Potencia real, reactiva, aparente y factor de potencia 97
4.4.6) Energía 97
4.4.7) Análisis armónico 98
4.4.8) Mitigación de armónicos 99
4.4.1) Desbalance entre fases 99
4.4.2) Parpadeo 99
4.4.3) Curva ITIC-CBEMA 100
4.4.4) Registros de sag e interrupciones 100
4.5) Medición en chiller 101
4.5.1) Metodología de la medición 101
4.5.2) Punto de medición 101
4.5.3) Perfil de tensión 102
4.5.4) Mitigación variaciones de tensión 102
4.5.5) Perfil de corriente 103
4.5.6) Potencia real, reactiva, aparente y factor de potencia 103

4.5.7) Energía 103
4.5.8) Análisis armónico 104
4.5.9) Mitigación de armónicos 104
4.5.10) Desbalance entre fases 104
4.5.11) Curva ITIC-CBEMA 104
4.6) Puesta a tierra 106
4.6.1) Evaluación de calibres y conexiones de tierra 106
4.6.2) Medición de la malla de tierras 107
4.7) Costo económico por mala calidad de energía 110
5) Capítulo 5 – Conclusiones y Recomendaciones 111
6) Referencias bibliográficas 113
7) Anexos 1 115
8) Anexos 2 136
9) Anexos 3 161
10) Anexo 4 181

Índice de Figuras

Figura 1. Tensiones medidas en el secundario de transformador Y-Y 34500/480V en Laboratorios STEIN 22
Figura 2.. Proceso de trabajo general en Energética Soluciones y Consultoría 25
Figura 3.Configuración de equipo de medición con respecto al sistema donde se va a instalar 34
Figura 4.Representación de sag en medición eléctrica de línea de JASEC..... 42
Figura 5.Representación de swell..... 42
Figura 6.Representación de ondas sinusoidales de tensión y corriente de un sistema con carga inductiva..... 43
Figura 7.Representación de la intervención de armónicas sobre la fundamental..... 45
Figura 8.Representación de secuencia de corrientes armónicas donde la primera ABC es positiva, la segunda ACB es negativa y la tercera representa la secuencia cero 46
Figura 9.Comportamiento de las reactancias capacitivas e inductivas con respecto a la frecuencia 49
Figura 10.Transitorio presentes en onda de tensión de una de las fases de distribución provenientes de JASEC. 53
Figura 11.Representación de categorías según localización en transitorios..... 56
Figura 12.Transitorio oscilatorio 57
Figura 13.Representación de puntos importantes en la forma de onda para interpretación de transitorios 58
Figura 14.Factor de potencia cargas no lineales..... 60
Figura 15.Conexión de un protector de sobretensiones..... 61
Figura 16.Esquema de funcionamiento de un sistema contra sobretensiones escalonado ... 62
Figura 17.Medición de resistividad por medio de ganchos 68
Figura 18.Medición de resistividad por picas..... 69
Figura 19.Componentes de equipo de medición 76
Figura 20. Equipo de protección personal utilizado durante el trabajo de campo..... 79
Figura 21. Puntos de monitoreo de calidad de energía IEEE 1159 80
Figura 22.Subestación eléctrica Laboratorios Stein 83

Figura 23.Ubicación del primer punto de medición en el secundario de TX-1, a la entrada de subestación 84
Figura 24.Barras de subestación donde se colocó equipo de medición 85
Figura 25.Medición fija de tensión a la entrada de servicio 86
Figura 26.UPS Galaxy VX 500kVA, 480V 88
Figura 27.Representación de filtro sintonizado 91
Figura 28.Ubicación de segundo punto de medición en unifilar eléctrico, en el secundario del transformador TX-06 de área de oficinas 95
Figura 29.TX-06 Área administrativa, se muestran donas de corriente y conectores para registro de tensión 96
Figura 30.Punto de medición tresen chiller 101
Figura 31.Donas de medición de corriente conectados en el ramal de chiller en subestación 102
Figura 32. Ejemplo de conexión de puesta a tierra 107
Figura 33. Esferas de influencia de los electrodos de puesta a tierra 107
Figura 34. Interconexión de la malla con el sistema de puesta a tierra 108
Figura 35. Valor de medición de resistencia de puesta a tierra 109

Índice de tablas

Tabla 1. Ajuste de valores de umbral de equipos para pruebas de calidad de baja tensión . 23
Tabla 2. Equipos de medición 28
Tabla 3. Conexión de sistemas eléctricos 31
Tabla 4.Clasificación de sags y swells por parte de IEEE 1159..... 40
Tabla 5. Causas principales de sags en sistemas de distribución 41
Tabla 6. Clasificación de armónicos..... 45
Tabla 7. Factores K recomendados por aplicación..... 47
Tabla 8. Rangos de tolerancia de algunos equipos según IEEE Std 1346-1998 51
Tabla 9.Clasificación de fenómenos transitorios..... 54
Tabla 10. Valores eficaces de baja tensión..... 70
Tabla 11. Intervalos normales y tolerables del valor de baja tensión del servicio 70
Tabla 12.Valores límites de distorsión armónica de corriente para usuarios conectados a la red 72
Tabla 13. Variaciones de tensión de corta duración..... 73
Tabla 14.Parámetros por registrar según el tipo de conexión al servicio eléctrico 74
Tabla 15.Ajuste de valores umbrales de equipos para pruebas a baja tensión 75
Tabla 16. Aspectos de supervisión de la calidad de energía por equipo Fluke 435-II 77
Tabla 17. Resumen medición en subestación principal..... 81
Tabla 18.Resumen medición en área administrativa 81
Tabla 19. Resumen mediciones en chiller 82
Tabla 20. Control de costos por mala calidad de energía..... 110

Tabla de Anexos

Anexo 1-1. Valores de tensión de las tres fases 116
Anexo 1-2. Valores de corriente registrados para las tres fases 117
Anexo 1-3. Potencia real registrada 118
Anexo 1-4. Potencia reactiva 119
Anexo 1-5. Potencia aparente 120
Anexo 1-6. Factor de potencia de desplazamiento 121
Anexo 1-7. Factor de potencia con factor de distorsión 122
Anexo 1-8. Energía consumida durante el periodo de medición 123
Anexo 1-9. Frecuencia 124
Anexo 1-10. Distorsión armónica de tensión 125
Anexo 1-11. Perfil de distorsión armónica de tensión 126
Anexo 1-12. Distorsión armónica de corriente 127
Anexo 1-13. Perfil de distorsión armónica de corriente 128
Anexo 1-14. TDD 129
Anexo 1-15. Desbalance entre fases 130
Anexo 1-16. Flicker 131
Anexo 1-17. Curva CBEMA 132
Anexo 1-18. Sag registrado 133
Anexo 1-19. Comportamiento de sag registrado 134
Anexo 1-20. Armónicas presentes en onda de corriente 135

Anexo 2- 1. Valores de tensión registrados para las tres fases 137
Anexo 2- 2.Valores de corriente registrados para las tres fases 138
Anexo 2- 3. Potencia real registrada 139
Anexo 2- 4. Potencia reactiva 140
Anexo 2- 5. Potencia aparente 141
Anexo 2- 6. Factor de potencia de desplazamiento 142
Anexo 2- 7. Factor de potencia con factor de distorsión 143
Anexo 2- 8. Energía consumida durante el periodo de medición 144
Anexo 2- 9. Frecuencia 145

Anexo 2- 10. Distorsión armónica de tensión 146
Anexo 2- 11.Perfil de distorsión armónica de tensión 147
Anexo 2- 12. Distorsión armónica de corriente 148
Anexo 2- 13.Perfil de distorsión armónica de corriente 149
Anexo 2- 14. TDD 150
Anexo 2- 15. Desbalance entre fases 151
Anexo 2- 16. Flicker 152
Anexo 2- 17. Curva CBEMA 153
Anexo 2- 18. Sags registrados 154
Anexo 2- 19. Comportamiento de sag registrado 155
Anexo 2- 20. Sag dos registrado 156
Anexo 2- 21. Interrupción de la alimentación 157
Anexo 2- 22. Comportamiento de la interrupción en la fase A 158
Anexo 2- 23. Forma de onda de corriente con presencia de armónicos 159

Anexo 3- 1. Valores de tensión de las tres fases 162
Anexo 3- 2. Valores de corriente registrados para las tres fases 163
Anexo 3- 3. Potencia real registrada 164
Anexo 3- 4. Potencia reactiva 165
Anexo 3- 5. Potencia aparente 166
Anexo 3- 6. Factor de potencia de desplazamiento 167
Anexo 3- 7. Factor de potencia con factor de distorsión 168
Anexo 3- 8. Frecuencia 169
Anexo 3- 9. Distorsión armónica de tensión 170
Anexo 3- 10. Perfil de distorsión armónica de tensión 171
Anexo 3- 11. Distorsión armónica de corriente 172
Anexo 3- 12. Perfil de distorsión armónica de corriente 173
Anexo 3- 13. TDD 174
Anexo 3- 14. Desbalance entre fases 175
Anexo 3- 15.Flicker 176
Anexo 3- 16. Curva CBEMA 177

Anexo 3- 17. Sag registrado 178
Anexo 3- 18. Comportamiento de sag registrado 179
Anexo 3- 19. Armónicas presentes en onda de corriente 180

Resumen

Debido a indicios previos de eventos relacionados con la calidad de energía suministrada por la compañía distribuidora a Laboratorios Stein, se toma la decisión de llevar a cabo un estudio de calidad de energía representativo de toda la instalación eléctrica existente. El proyecto busca presentar los límites y criterios de las diferentes normas establecidas para regular este tema tanto nacionales -como la AR NT SUCAL 2015-, como internacionales de la IEEE, para de esta manera caracterizar el estado actual de calidad de energía con la que se trabaja en la planta, y poder señalar aquellos eventos que se encuentren fuera de los rangos a fin de proponer su respectiva mitigación.

Además, se obtiene el documento escrito que sirve como base para los estudios de calidad de energía de Energética Soluciones y Consultoría IAC.

Palabras Clave: *Calidad de energía, sobretensiones, armónicos, sags, swells, parpadeo, mitigación, AR NT SUCAL 2015, IEEE 1159, tensión, corriente, potencia.*

Abstract

Due to previous indications of events related to the power quality supplied by the distribution company to Laboratorios Stein, it is decided to make a representative power quality study of the whole existing electrical installation. The project seeks to present the limits and criteria of the different standards established to regulate this subject, such as the national standard AR NT SUCAL 2015 and the international ones such as the IEEE standards, to characterize the current state of the power quality, with which the plant works, pointing out those events that are outside the ranges, and proposing their respective mitigation.

In addition, the written document serves as the basis for the power quality studies of Energética Soluciones y Consultoría IAC

KeyWords: *Power quality, over voltages, harmonics, sags, swells, flicker, mitigation, AR NT SUCAL 2015, IEEE Std 1159, voltage, current, power.*

1) Capítulo 1 - Reseña de la empresa

1.1) Servicio

Energética es una empresa de consultoría en Ingeniería Eléctrica y Mecánica, ubicada en Barrio Don Bosco en San José, Costa Rica. Se posiciona como una empresa especializada en servicios de análisis de sistemas eléctricos y seguridad eléctrica a través de simulación mediante el uso del *software* de análisis *SKM PowerTools*, y también tiene amplia experiencia en calidad de energía y eficiencia energética. La empresa cuenta con personal altamente calificado y herramientas como analizadores de calidad de energía, cámaras termográficas, medidores de iluminación, medidores de caudal; entre otros, todos con el objetivo de medir con el mayor nivel de detalle las variables energéticas en los proyectos desarrollados por Energética. Se cree fielmente en que lo que no se mide, no se puede controlar, así que pone mucho énfasis en la medición de las variables.

1.2) Historia

La empresa inició operaciones en Costa Rica en 2010, por lo que, hasta la fecha, ha realizado cerca de 55 estudios eléctricos, 94 mediciones de calidad de energía en ocho países de la región. Dentro de sus áreas de operaciones representativas se encuentran:

1.3) Áreas de trabajo

Auditoría energética: por medio de mediciones del perfil de consumo eléctrico de la instalación, termografías, mediciones de iluminación; entre otras, se recomiendan al cliente estrategias de uso eficiente de energía, tomando en consideración las principales cargas y la operación del sistema. Asimismo, se asesora al usuario en la interpretación de su factura eléctrica mensual, de tal forma que pueda comprender cómo se realiza el cargo con consumo eléctrico y cuál es el costo de la energía en los diferentes períodos de facturación

Auditoría eléctrica: se realizan auditorías de la instalación eléctrica o sistema, para identificar las áreas de mejora más importantes o bien, el estado de los equipos dentro de la instalación eléctrica, de acuerdo con los códigos eléctricos de instalación vigentes, así como con las buenas prácticas de instalación, de acuerdo con estándares internacionales; a saber:

National Fire Protection Association (NFPA), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); entre otras. Para ello, se realizan pruebas de diferentes sistemas usando equipos de medición, como, por ejemplo: medición de resistencia, equipo de termografía y medición de aislamiento.

Seguridad eléctrica y análisis de sistemas eléctricos: proporcionar soluciones de consultoría a nivel de estudios de sistemas eléctricos, como, por ejemplo: estudio de corto circuito, estudio de coordinación de protecciones, estudio de *Arc Flash;* entre otros, mediante el uso de herramientas de *software* para simulación; el más común o de mayor uso es SKM PowerTools.

1.4) Estudios eléctricos

La empresa también se dedica a realizar los estudios de seguridad eléctrica, desde el levantamiento de información, simulación, coordinación de protecciones, estudio de arco eléctrico, etiquetado de tableros, entrenamiento en implementación de NFPA 70E y auditoría en seguridad eléctrica. Asimismo, ofrece soluciones de diseño e inspección para sistemas eléctricos y mecánicos para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales.

2) Capítulo 2 - Descripción del proyecto

La calidad del suministro de energía es un tema de vital importancia para las empresas con altos estándares de calidad dentro de su producción; por ello, para Laboratorios STEIN, por ser una compañía altamente competitiva, la calidad de energía suministrada por la red, así como dentro de sus instalaciones, es una de sus prioridades para garantizar un correcto funcionamiento de toda su estructura de trabajo.

Actualmente, en dichos laboratorios se presentan tres problemas marcados debido a la calidad de energía y que afectan la parte económica de la empresa, por lo que se precisa realizar una investigación a fondo, a fin de tomar acciones. A continuación, se describen los problemas identificados:

En primer lugar, están los tiempos de inactividad que se presentan cada vez que se realizan acciones correctivas o reemplazo de equipos por daños que se generan cuando ocurren variaciones dentro del sistema, así como cuando estos no funcionan correctamente, lo cual ocasiona que se deban repetir los procesos hasta obtener el producto con la calidad deseada.

En segundo lugar, está el problema del costo de los equipos y piezas para su reemplazo, ya que como se mencionó anteriormente las variaciones en el sistema eléctrico generan problemas en los equipos, tanto en los electrónicamente sensibles, como en motores, transformadores y otros que han tenido que ser reemplazados dentro del proceso. En tercer lugar, se menciona el costo por consumo de energía generado, el cual aumenta su valor cuando la distribución de esta es ineficiente y presenta factores como alta intensidad de corriente en el neutro, desbalance de cargas, exceso de armónicos, calentamiento de cables, entre otros.

Como datos previos a estas tres situaciones, se tienen los resultados de una medición que se realizó en setiembre de 2017, con las variables de demanda de potencia, corriente y tensión. En las instalaciones de Laboratorios STEIN en Cartago, se observaron variaciones en las mediciones de la variable de tensión, dentro de rangos no permitidos en la norma AR NT SUCAL 2015 de la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP), lo cual despertó el interés en realizar un estudio de la calidad de energía, para evaluar los problemas anteriormente citados. Estas mediciones se llevaron a cabo en el secundario del transformador de entrada TX1.

De esta manera se busca, por medio del desarrollo del proyecto, indagar las fuentes de las distorsiones presentes, tanto las ya encontradas, como las que se encuentren en demás puntos de estudio por definir dentro de la instalación eléctrica de la empresa, y así tomar las medidas correctivas necesarias, como uso de protecciones contra sobretensión, corrección del sistema de puesta a tierra, uso de *Uninterruptible Power Supply* (UPS) y demás, para de esta manera, generar ahorros económicos y promover un mejor uso del presupuesto de mantenimiento de la empresa. Además de la importancia de contribuir con el aspecto ambiental que es de consideración actualmente, ya que al operar con una alta calidad de energía se evita la sobredemanda y generación extra de energía eléctrica para este cliente en específico.

2.1) Objetivo general

- Evaluar el estado actual de la calidad de energía en Laboratorios STEIN tanto del suministro eléctrico por Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago (JASEC), así como en la distribución del sistema eléctrico a lo interno de las instalaciones.

2.2) Objetivos específicos

- Desarrollar las mediciones eléctricas de las diferentes variables de calidad de energía, para asegurar que el suministro de energía por la empresa distribuidora es correcto para Laboratorios STEIN.
- Estudiar los equipos instalados, para la identificación de posibles fuentes de distorsión, mediante revisiones realizadas en las visitas al sitio.
- Presentar posibles propuestas de mejora para un uso eficiente de la energía, que permita beneficios a la empresa en cuanto a productividad y competitividad y que puedan evaluarse mediante indicadores de disponibilidad y eficiencia.
- Diseñar una base escrita para los estudios de calidad de energía.

2.3) Lista de actividades

- Evaluar el estado actual de calidad de energía en Laboratorios Stein, el cual se llevará a cabo por medio de mediciones en diferentes puntos dentro de la empresa, como transformadores, subestación, tableros de distribución. Una vez lista, se comparará tanto con normas nacionales (AR NT SUCAL 2015), como internaciones (Information Technology Industry Council (ITIC), SEMI F47, IEEE 1159, IEEE P1100), además del uso de la curva de la Asociación de Manufactureros de Equipos de Computación de Negocios (CBEMA).

- Corroborar, por medio de los datos de placa y *Datasheet* de los equipos utilizados en el proceso de producción, que los requerimientos de alimentación eléctrica se estén cumpliendo.

- Realizar las mediciones por medio de equipo *Fluke 435 Power Quality Analyzer*, *Fluke Voltaje Quality Recorders* y medidores de consumo como *Fluke 1732, 1735, PEL 103*.

- Realizar un análisis mediante el uso de métodos numéricos, que permita obtener el ahorro económico, conociendo el costo de la energía eléctrica y las mediciones a realizar, tomando en cuenta factores como armónicos, duración y amplitud de las variaciones, desequilibrio, entre otros.

- Evaluar las recomendaciones dependiendo del análisis de los datos obtenidos, con su respectivo impacto y diferenciación con su operación actual.

- Elaborar, por medio de la investigación y estudio de las diferentes normas, un documento que presente de manera clara, el proceso del estudio de la calidad de energía, de manera que pueda ser copiado y utilizado como base.,

2.4) Justificación

Laboratorios STEIN es una empresa dedicada a la producción y comercialización de medicamentos de alta calidad para uso humano; por lo tanto, es de gran importancia que toda su estructura de trabajo esté a la misma altura.

Como parte de los trabajos normales que se realizan en la empresa Energética Soluciones y Consultoría, se llevó a cabo una medición de consumo eléctrico en el secundario del transformador principal, el cual es de 1500 kVA, conexión estrella-estrella tensión 34500/480 V. Además, se recibió la consulta acerca de algún posible problema existente debido a que equipos electrónicos del proceso de producción se estaban dañando. Al analizar la Figura 1 de Tensión-Tiempo obtenido de la medición, se puede observar que ocurrió una variación importante en el nivel de tensión suministrado hacia la planta, tal como se muestra a continuación:

Figura 1. Tensiones medidas en el secundario de transformador Y-Y 34500/480V en Laboratorios STEIN

Fuente: Elaboración propia

Según la norma de regulación AR NT SUCAL 2015 de ARESEP “Supervisión de la calidad del suministro eléctrico en baja y media tensión”, para un sistema trifásico con tensión nominal 480/277 V, se toma como intervalo tolerable que el 95% de los valores de

la tensión estén entre los 254V y 293V. En este caso, según los datos mostrados, el desbalance de tensión tiende a estar por encima de 3%, el cual es el parámetro máximo permitido por la norma AR NT SUCAL 2015. La medición anterior también demostró que el valor máximo de desbalance alcanzado es a la 1:45 p.m., con un valor de 3.42%; mientras que a las 4:16 p.m. se registra el mínimo de 2.29%.

Tabla 1. Ajuste de valores de umbral de equipos para pruebas de calidad de baja tensión

Ajuste de valores de umbral de equipos para pruebas de calidad de baja tensión

Categoría de Servicio	Categoría de Evento	Valores de Umbral (Volts rms)	Porcentaje de la Tensión Nominal
Monofásico bifilar	Hueco de tensión	104	87% de Vn
	Pico de tensión	138	115% de Vn
	Impulso	240	200% de Vn
Monofásico Trifilar	Hueco de tensión	104/209	87% de Vn
	Pico de tensión	138/276	115 % de Vn
	Impulso	240/480	200 % de Vn
Trifásico	Hueco de tensión	104/181Y - 209Δ	87% de Vn
	Pico de tensión	138/239Y - 276Δ	115% de Vn
	Impulso	240/416Y - 480Δ	200 % de Vn
	Tensiones Armónicas	3% de Vn	Para cada tensión armónica
		5% TDA	Armónicas hasta orden 35
	Desbalance	3%	Sin carga
	Corrientes armónicas	5% a 20 % TDD	Refiérase a lo indicado en el artículo 13.

Y: Conexión estrella aterrizada. Δ: Conexión delta. TDA: Total distorsión armónica del tensión. TDD: Total de distorsión de demanda de corriente

Fuente: AR NT SUCAL (2015, p.13)

La fase B, la cual presenta menores valores de tensión, se comparó con el comportamiento de la demanda conectada. La demanda máxima en esta fase es de 242A cerca de la 1:42 p.m., por lo que se descarta que el aumento de tensión en horas de la tarde dependa del comportamiento de la corriente. Por lo anterior, es importante llevar a cabo un estudio más específico mediante mediciones de distorsión armónica, transientes, entre otras.

Además, se precisa analizar estratégicamente la calidad de energía en Laboratorios STEIN, tanto en el suministro de la compañía, como dentro de la planta, con el fin de evitar los daños presentes en equipos, así como para añadir un mejor desempeño en los equipos y con esto, aumentar la productividad eliminando los tiempos de espera y disminuyendo costos de mantenimiento de equipo. También, se espera aumentar la competitividad de la empresa en cuanto a eficiencia eléctrica y continuidad de servicio de calidad.

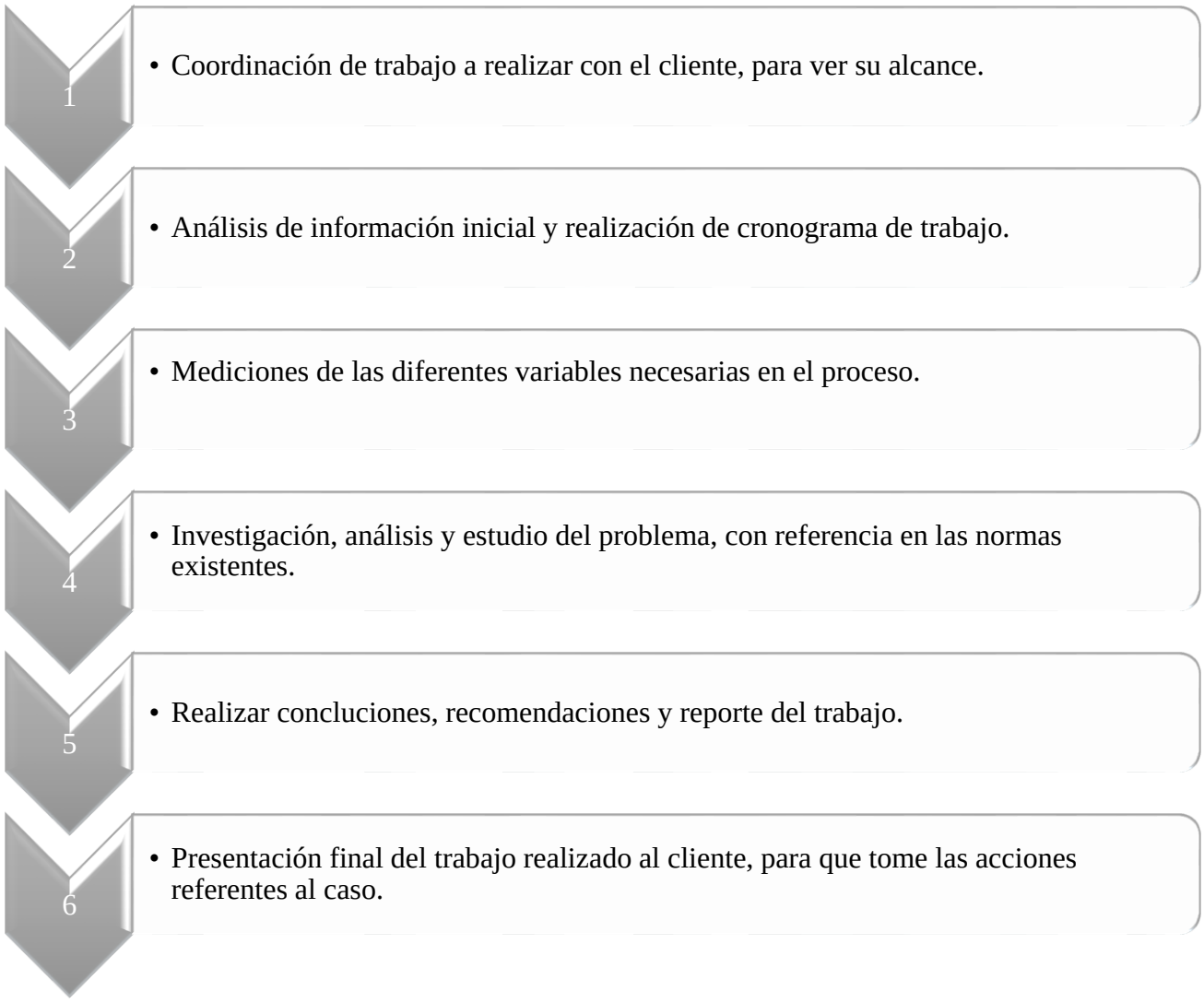
Otra de las razones para realizar este proyecto es su viabilidad, ya que se cuenta con un equipo *Fluke 435 Three-Phase Power Quality and Energy Analyzer*, el cual posee como características:

- Eficiencia de inversores de potencia: permite medir simultáneamente la potencia de salida CA y la potencia de entrada CC para sistemas electrónicos de potencia usando la pinza CC opcional.
- Captura de datos *PowerWave*: captura rápidamente datos RMS, muestra medios ciclos y formas de onda para caracterizar las dinámicas de los sistemas eléctricos (arranques de generadores, conmutación de SAI, etc.).
- Calculadora de pérdida de energía: las mediciones clásicas de potencia activa y reactiva, desequilibrios y armónicos se cuantifican para poner de manifiesto el costo de las pérdidas de energía.
- Solución de problemas en tiempo real: analiza las tendencias con los cursores y las herramientas de ampliación.
- La clasificación de seguridad más alta de la industria: clasificación de CAT IV a 600 V y CAT III a 1000 V para su uso en la entrada de servicio.
- Permite medir las tres fases y el neutro: con cuatro puntas de prueba de corriente flexibles incluidas y un mejorado diseño delgado para adaptarse a los lugares más estrechos.
- Tendencia automática: todas las mediciones se registran siempre automáticamente, sin necesidad de configuración alguna.
- Monitor del sistema: diez parámetros de calidad de potencia en una sola pantalla, de acuerdo con la norma de calidad de potencia eléctrica EN50160.
- Función de registrador: configurado para cualquier condición de prueba con memoria de hasta 600 parámetros a intervalos definidos por el usuario.
- Visualización de gráficos y generación de informes: con el software de análisis incluido.

Además de medidores de consumo de energía Fluke 1735, Fluke 1732, PEL 103, así como también una cámara termográfica FLIR E60, también se cuenta con una amplia biblioteca de referencias bibliográficas, donde destacan las normas NFPA, y IEEE; entre otras.

2.5) Metodología a seguir

Figura 2.. Proceso de trabajo general en Energética Soluciones y Consultoría



Fuente: Elaboración propia

2.6) Alcance

1- Presentar a Laboratorios STEIN el trabajo realizado y evacuar las dudas actuales en cuanto a la calidad de energía del sitio.
2- Proponer mejoras en el sistema eléctrico de la empresa, para optimizar la calidad de energía.
3- Proponer, mediante la investigación y análisis, una serie de recomendaciones, así como dar una retroalimentación a la empresa de la importancia de la calidad de energía y del trabajo realizado.
4- Realizar una estructura para los trabajos de análisis de calidad de energía para que, de esta manera, tener una base sólida que permita que los trabajos de calidad de energía tengan una línea similar.

3) Capítulo 3 – Marco teórico

3.1) Sección 1 - Calidad de energía

Tratar de definir el término “calidad de energía” y lo que esto conlleva, puede resultar complejo; no obstante, según IEEE Std 1159-2009, el término hace referencia a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un momento dado y una ubicación determinada del sistema de eléctrico. Por su parte, según IEEE Std 1100-2005, el término hace referencia al concepto de alimentación de tensión y puesta a tierra de equipo electrónico, de manera que estos sean adecuados para la operación del equipo y compatibles con la instalación eléctrica y con cualquier otro equipo que forme parte del sistema; sin embargo, esta concepción sigue siendo compleja, ya que lo que es bueno para un equipo, no necesariamente lo será para el resto.

Por lo tanto, se considera que un buen diseño eléctrico que busca la mayor calidad de energía posible considera el desempeño de la instalación eléctrica como tal, así como las tolerancias de los equipos que se encuentran conectadas a esta, de manera que se eviten o minimicen fallas y problemas potenciales que afecten la red. Ahora bien, es importante conocer el por qué las industrias buscan realizar los estudios de calidad de energía; de forma que se indagó a partir de varias encuestas y se obtuvieron las siguientes razones, como las principales para desarrollar un estudio de este tipo:

- Determinar la causa y fuente de los problemas de calidad de energía presentes.
- Referenciar la calidad de energía presente en la instalación.
- Determinar la factibilidad e idoneidad de la red para la expansión o instalación de nuevos equipos.
- Evaluar el impacto de la calidad de energía en los costos de la empresa.
- Mejorar la calidad de energía.

Existen dos enfoques bien definidos para el monitoreo de la calidad de energía, el reactivo y el proactivo. El enfoque proactivo de monitoreo de calidad de energía busca conocer y representar la dinámica del sistema eléctrico a través del tiempo; por lo tanto, este se lleva a cabo mediante sistemas de medición instalados de manera permanente, los cuales son capaces de anticipar problemas futuros cuando ocurren las fallas, debido a que poseen

los perfiles del sistema para funcionamiento normal y en falla. Este tipo de enfoque es utilizado para mantenimiento eléctrico preventivo como predictivo, identificación de deterioro de equipos y caracterización de las tendencias de la red eléctrica. Es común en *Data-Centers*, instalaciones de alta confiabilidad como centros de salud, hospitales, bancos, en plantas de manufactura, entre otras. Su principal ventaja es que en caso de que suceda alguna falla en el sistema, este equipo la va a registrar, puesto que su monitoreo es total: las 24 horas del día, durante los 7 días de la semana.

El enfoque reactivo; por su parte, está basado en una metodología de solución de problemas, a través de un análisis forense de datos. Este se lleva a cabo mediante la instalación de equipos de medición portátiles (no fijos), durante un tiempo determinado para realizar la recolección de las diferentes variables eléctricas que permitan la identificación del problema. Una de sus mayores desventajas es que no se sabe si el problema que llevó a la instalación del equipo se presentará de nuevo.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó equipo de medición portátil, por lo cual, el enfoque es paralelo a estos equipos. Existen diferentes tipos de equipos para el monitoreo, dentro de los cuales se encuentran multímetros, osciloscopios y equipos especializados, y equipos de calidad de energía. A continuación, se muestra una tabla con los pros y los contras de cada uno de estos.

Tabla 2. Equipos de medición

Equipo	**Pros**	**Contras**
Multímetros	Costo bajo, facilidad de uso	Capacidades de medición y registro de datos para calidad de energía limitado, típicamente miden solo una fase
Osciloscopios	Costo bajo, facilidad de uso	Capacidades de medición y registro de datos para calidad de energía limitado, típicamente miden solo una fase
Analizadores de armónicas, *Fault Recorders*.	Verifican un evento especifico de manera bastante especializada	Solamente un tipo de evento, algunos son simplemente de una fase y no registran durante periodos largos
Especializados en calidad de energía	Medición de diferentes tipos de eventos, espectros de potencia totales, análisis mediante software en PC.	Periodo de medición limitado y acceso remoto limitado a la red de conexión. Costo alto

Fuente: Elaboración propia

A través de múltiples estudios realizados por empresas consultoras, como fabricantes de equipos de medición a lo largo del mundo, se ha llegado a establecer un procedimiento básico para la realización de los estudios de calidad de energía. De acuerdo con este, primeramente, se debe realizar un plan que especifique las variables que se van a medir, los equipos a utilizar, las fechas de monitoreo, las herramientas necesarias, entre otras. Segundo, una inspección al lugar de la instalación del equipo de monitoreo, ya sea en una planta de producción, edificios de facilidades, hospitales, centros comerciales u otros, para identificar equipos existentes conectados a la red y verificar previamente el estado de la instalación eléctrica.

Tercero, se realiza el monitoreo de calidad de energía durante un periodo determinado (este periodo debe de cumplir con un tiempo mínimo de acuerdo con las especificaciones de la entidad reguladora de cada país. En el caso de Costa Rica, la entidad reguladora es ARESEP, que se muestra más adelante). Seguidamente, se realiza la recolección de los datos y se procede al análisis de estos, en busca de anormalidades presentes en los valores de tensión, corriente, armónicas y demás que permitan asociar el problema existente a los registros tomados. Finalmente, si se logra identificar claramente la causa raíz del problema, se propone la solución correspondiente para este. De no encontrarse el problema, se procede a realizar las mediciones nuevamente repitiendo todos los pasos mencionados.

Es importante, por seguridad y cumplimiento de normas de seguridad que rigen en el país como NFPA 70E, que todo trabajo de estudio de calidad de energía sea realizado por personal capacitado y calificado para trabajos eléctricos y funcionamiento de equipos de especializados de medición, que vele por el cumplimiento de todas la instrucciones dadas por los fabricantes de los equipos, así como de las reglas internas de cada lugar y que además, todo sea realizado con el equipo de protección personal, como guantes dieléctricos, zapatos de seguridad dieléctricos, protector facial y protección para el cuerpo como camisas y pantalones de cierta cantidad de calorías incidentes, según lo especifique el lugar donde se realice el trabajo.

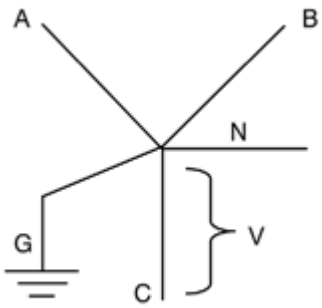
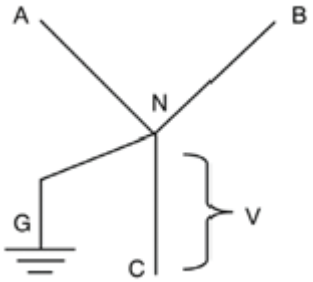
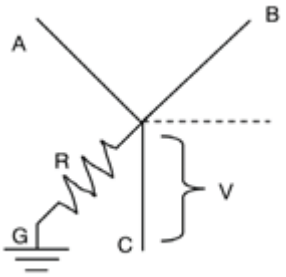
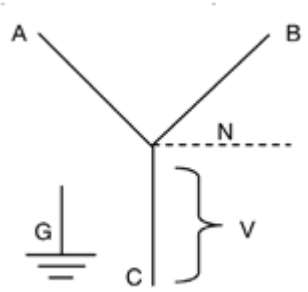
Asimismo, es indispensable considerar que para planear un correcto estudio de calidad de energía, se deben considerar varias preguntas que las empresas se deben responder antes de contratar un estudio de calidad de energía:

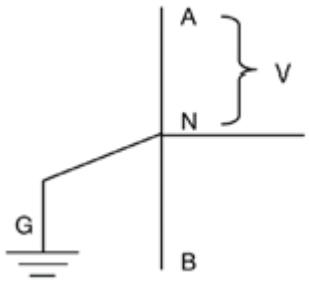
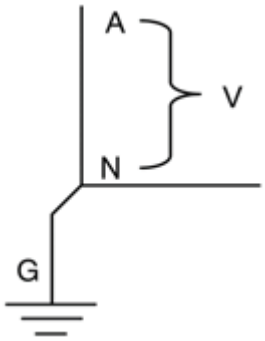
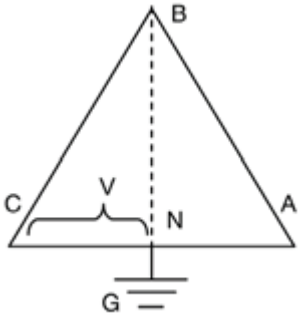
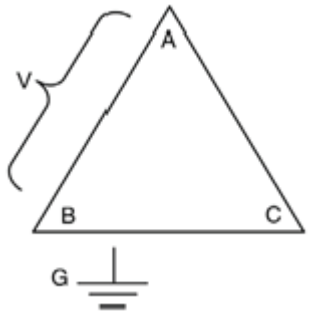
- ¿Qué tipo de eventos estoy buscando? La respuesta a esta pregunta puede ser tan simple como que se desconoce la razón de ocurrencia de problemas y por eso se contrata el servicio o bien, que se tiene una pequeña idea de por qué se dan las distorsiones en la red; por ejemplo, sags, swells, armónicos, flickers, entre otros.
- ¿Dónde ocurren los problemas? Con ello interesa saber en qué ubicación física dentro de la instalación están ocurriendo los problemas, pues es importante saber si es a nivel de acometida en tableros principales o más adentro de la instalación, a fin de encontrar con mayor facilidad la causa de los problemas y determinar si el problema sucede por causa interna o por causas en la red de la compañía distribuidora.
- ¿Cuándo ocurren los problemas? Es importante preguntarse si las situaciones ocurren siempre en el mismo horario o en momentos aleatorios, si coinciden con la puesta en marcha de equipos de producción grandes como motores o hornos de inducción o bien, cuando hay conmutación de equipos como bancos de capacitores.

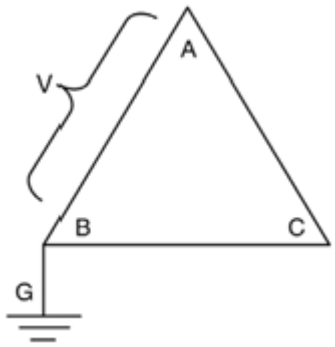
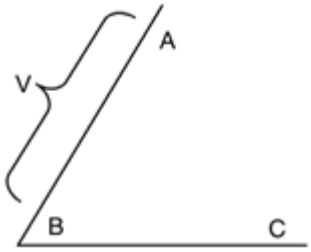
La realización de estas preguntas facilita el trabajo de detección e inspección por parte de quien realice el estudio de calidad de energía, ya que localizará de manera más rápida la falla, lo que economiza tiempo y dinero. Es importante también tener en cuenta que los problemas presentes pueden no estar relacionados a temas de calidad de energía; por ejemplo, pueden ser desperfectos en los equipos, mala instalación, problemas en software, entre otros; sin embargo, en caso de duda, se deben descartar todas las opciones.

El reconocimiento del sistema eléctrico de alimentación de la instalación eléctrica es de vital importancia y se llevará a cabo mediante su reconocimiento en el lado secundario del transformador principal. A continuación, se presentan los posibles sistemas de conexión eléctrica.

Tabla 3. Conexión de sistemas eléctricos

Sistema	Imagen descriptiva
3 fases 4 hilos "Y" aterrizada Neutro conectado a tierra Neutro a la entrada de la instalación Configuración de sistemas comunes V = 120V (208Y/120V) V = 277V (48OY/277V)	
3 fases 4 hilos "Y" aterrizada Neutro conectado a tierra Sin neutro a la entrada de la instalación Configuración de sistemas comunes en CCM, bombeo y plantas de tratamiento de agua V = 120V (208Y/120V) V = 277V (480/277V)	
"Y" aterrizada a través de resistencia o impedancia Neutro conectado a tierra a través de una resistencia de tierra El neutro puede estar o no a la entrada de la instalación Cada vez más popular sistema de alta tecnología V = 120V (208Y/120V) V = 277V (48OY/277V)	
3 fases 4 hilos "Y" aterrizada Neutro NO conectado a tierra El neutro puede estar o no a la entrada de la instalación Poco frecuente; Nota del Código Eléctrico Nacional (NEC) 285.3(2). No permite la instalación de supresores ni pararrayos V = 120V (208Y/120V) V = 277V (48OY/277V)	

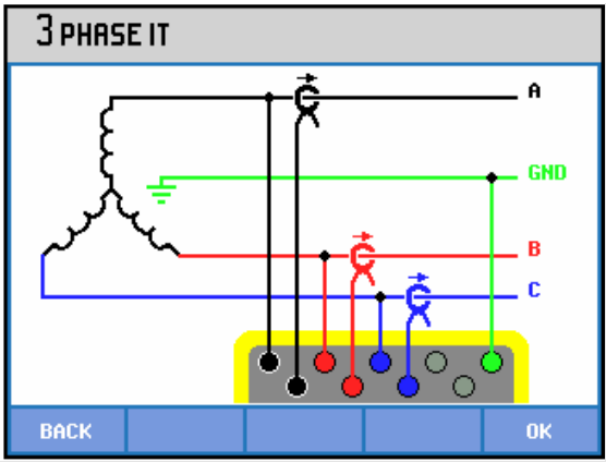
Fase partida "monofásico" Neutro conectado a tierra Neutro usualmente a la entrada de la instalación. Muy común V = 120V (120/240V) V = 240V (240/48OV)	
Monofásico Verificar adónde el neutro y la tierra están aterrizados A menudo para una sola pierna o una pieza del equipo. Neutro conectado a tierra. Menos común V = 120V V = 240V V = 277V V = 480	
Delta aterrizada pierna alta Neutro conectado a tierra Neutro usualmente a la entrada de la instalación. Configuración de sistemas comunes V = 120/240V V = 240/480V	
3 fases 3 hilos Delta no aterrizada El sistema no tiene ninguna referencia a tierra Los voltajes L-L son fijados por el transformado, pero los voltajes L-T pueden variar Conocido por ser inestable. Nota NEC 285.3(2). No permite la instalación de supresores ni pararrayos V = 240V V = 480V V = 600V	

3 fases 3 hilos Delta con una fase aterrizada El sistema tiene referencia a tierra porque la fase B (generalmente) es aterrizada V = 240V V = 480V V = 600V	
Delta abierta 3-fases 3 o 4-hilos. Puede ser no aterrizada, con una fase a tierra o pierna alta. Muy poco frecuente, tienda a estar zonas rurales	

Fuente: Advance Protection Technologies Inc (2012, pág 26).

A partir de la caracterización del sistema eléctrico, la cual se puede hacer mediante mediciones de tensión o identificación visual por colores, según lo establece el NEC en el artículo 310.12©: los conductores de fase se deben distinguir por colores distintos del blanco, gris natural o verde o por cualquier combinación de colores y sus correspondientes marcas; se procede a la configuración del equipo de medición de calidad de energía específico, en el cual los datos de entrada incluyen tensiones, sistema eléctrico al que se va a conectar, frecuencia y tiempo de medición; además de las variables que se quieren registrar y la conexión física de los cables y donas de corriente del equipo.

Figura 3.Configuración de equipo de medición con respecto al sistema donde se va a instalar



Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que un buen estudio de calidad de energía se basa desde un principio en la correcta instalación y parametrización del equipo de medición a utilizar, manera fin de que registre valores representativos y reales que caractericen claramente el sistema eléctrico a evaluar.

Ahora, para hablar de manera más profunda acerca del tema de calidad de energía, es necesario definir primero otros términos fundamentales en este campo tomados de la norma de la ARESEP "Supervisión de la calidad del suministro eléctrico en baja y media tensión" (AR-NT-SUCAL 2015), razón por la cual en la siguiente sección se conceptualizarán algunos términos de importancia.

3.1.1) Términos de importancia

Abonado: persona física o jurídica que ha suscrito o aceptado uno o más contratos para el aprovechamiento de la energía eléctrica.

Alta tensión: tensión utilizada para el suministro eléctrico, cuyo valor nominal eficaz (rms) es superior a 100 kV.

Área de concesión: área territorial asignada por ley o por concesión para la distribución o comercialización de la energía eléctrica.

Área de distribución: área territorial, dentro del área de concesión donde la empresa distribuidora posee redes eléctricas de distribución.

Autoridad Reguladora (ARESEP): Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos.

Avería: cualquier daño, deterioro o cambio no deseado en las propiedades físicas, químicas o eléctricas de un equipo o componente de una red y que llevan hacia la pérdida o disminución de su funcionalidad.

Baja tensión: nivel de tensión menor o igual a 1 kV.

Bajo nivel de tensión: condición de tensión inferior al valor mínimo de operación normal permitido respecto del valor de tensión nominal, con una duración superior a un minuto.

Calidad de la tensión de suministro: se refiere a las características de la tensión (magnitud y frecuencia) normal suministrada a un servicio eléctrico para su utilización.

Caso fortuito: acciones de la mano del hombre tales como: huelgas, vandalismo, conmoción civil, revolución, sabotaje y otras que estén fuera de control de la empresa eléctrica, las cuales deben ser demostradas y que afecten de tal manera que sobrepasen las condiciones que debieron considerarse en el diseño civil, mecánico y eléctrico en aras de un servicio eficiente (técnico y económico), continuo y de calidad.

Concesión: es la autorización que el Estado otorga para operar, explotar y prestar el servicio de generación, transmisión, distribución o comercialización de energía eléctrica.

Condiciones especiales de operación: operación del sistema de distribución o parte de él, bajo características diferentes a las habituales y que tengan como fin la continuidad del servicio, con detrimento de la calidad de tensión.

Condiciones normales de operación: condiciones que permiten responder a la demanda de potencia y energía, a las maniobras de operación y a la eliminación de fallas por los sistemas de protección manuales o automáticos, en la ausencia de condiciones especiales o a casos de fuerza mayor o caso fortuito.

Continuidad del suministro eléctrico: medida de la continuidad (libre de interrupciones) con que la energía se brinda a los abonados y usuarios para su utilización.

Contrato para el suministro de energía eléctrica: documento suscrito entre una empresa eléctrica y un abonado, en el que se establecen las condiciones y requisitos técnicos y comerciales bajo los cuales se brindará el servicio eléctrico, así como las obligaciones, derechos y deberes a que se comprometen las partes, en estricto apego a la normativa y leyes vigentes.

Desbalance de las tensiones trifásicas: diferencia entre los valores de las magnitudes de tensión entre fases o entre fases y neutro.

Distorsión en la onda de tensión o corriente: cualquier desviación con respecto de la forma de onda sinusoidal nominal de la tensión o corriente.

Empresa eléctrica: persona jurídica concesionaria que suministra el servicio eléctrico en cualquiera de sus etapas.

Empresa distribuidora: empresa cuya actividad consiste en la distribución de la energía eléctrica para su uso final en el área concesionada.

Ente Regulador: Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos.

Frecuencia de la tensión: tasa de repetición de la componente fundamental de la tensión, medida durante un segundo.

Fuerza mayor: hechos de la naturaleza tales como vientos, lluvias, huracanes, tornados, movimientos sísmicos, maremotos, inundaciones y tormentas eléctricas, que sobrepasen las condiciones que debieron considerarse en el diseño civil, mecánico y eléctrico en aras de un servicio eficiente (técnico y económico), continuo y de calidad.

Hueco de tensión (Sag): disminución del valor eficaz (rms) de tensión a 90 % hasta 10 % con respecto del valor de tensión nominal a frecuencia nominal, con una duración desde medio ciclo (8,33 ms) hasta un minuto.

Impulso de tensión (transitorio): un cambio súbito, unidireccional (positivo o negativo) en la tensión, a una frecuencia diferente de la fundamental.

Índice de calidad: medida cuantitativa que permite efectuar un diagnóstico sobre la calidad del suministro eléctrico y que coadyuva a establecer medidas correctivas con el fin de lograr su mejoramiento en forma continua.

Interrupción: pérdida de la tensión en una o más fases durante un periodo dado.

Media tensión: nivel de tensión mayor a 1 kV pero menor o igual a 100 kV.

Norma técnica: precepto obligatorio conformado por un conjunto de especificaciones, parámetros e indicadores que definen las condiciones de calidad, confiabilidad, continuidad, oportunidad y prestación óptima con que deben suministrarse los servicios eléctricos, de conformidad con los artículos 6 y 14 de la Ley N° 7593 y sus reformas.

Parpadeo (Flicker): impresión de irregularidad de la sensación visual debida a un estímulo luminoso cuya luminosidad o distribución espectral fluctúa en el tiempo.

Pico de tensión (Swell): aumento del valor eficaz (rms) de tensión a un valor comprendido entre el 110 % y 180 % de la tensión nominal a frecuencia nominal, con una duración desde medio ciclo (8,33 ms) hasta un minuto.

Punto de entrega: es el lugar topológico donde se entrega la energía eléctrica a una instalación para su aprovechamiento.

Ramal: En media tensión, derivación del circuito principal que cuenta con su protección propia. En baja tensión, derivación de la red que parte de la conexión al secundario del transformador.

Red de distribución: es la etapa de la red eléctrica conformada por: las barras a media tensión de las subestaciones reductoras (alta tensión/media tensión), subestaciones de maniobra o patios de interruptores, conductores a media y baja tensión, y los equipos de transformación, control, monitoreo, seccionamiento y protección asociados, para la utilización final de la energía.

Red eléctrica: conjunto de elementos, en un sistema de potencia, mediante el cual se transporta la energía eléctrica desde los centros de producción y se distribuye a los abonados y usuarios.

Servicio eléctrico: disponibilidad de energía y potencia en las etapas de generación, transmisión y distribución y, en las condiciones para su comercialización.

Sitio geográfico: es el lugar geográfico: provincia, cantón, distrito, etc., donde se instala o se ubica un equipo eléctrico o se suscita una avería o perturbación.

Sobretensión (Alto nivel de tensión): condición de tensión superior al valor máximo de operación normal permitido respecto del valor de tensión nominal, con una duración superior a un minuto.

Tensión de alimentación (Va): valor eficaz (rms) de la tensión (fase–fase o fase-neutro) presente en el punto de entrega en un instante dado.

Tensión de servicio (Vs): la tensión en valor eficaz (rms) en el punto donde se enlazan la instalación del abonado o usuario y la red general de distribución.

Tensión mínima de una red de distribución (Vmín): el valor eficaz (rms) más bajo de la tensión permisible, en condiciones normales de operación, en una red de distribución o parte de ella.

Tensión nominal (Vn) de una red de distribución: tensión en valor eficaz (rms) que caracteriza o identifica una red de distribución o parte de ella y a la cual se hace referencia para ciertas características de operación de dicha red o porción de esta.

Tiempo de localización: intervalo de tiempo comprendido entre el momento en que la cuadrilla se ubica en el área geográfica o topológica afectada por la avería y el momento en que ésta ubica con precisión el lugar topológico y geográfico donde se localiza la avería.

Tiempo de organización: el tiempo de organización se refiere al lapso de tiempo, entre el momento en que la empresa eléctrica tiene conocimiento de la avería y el momento en que el personal de mantenimiento se ubica en el área geográfica o topológica afectada por la avería.

Tiempo de reparación: el tiempo de reparación se refiere al período de tiempo comprendido, entre la localización precisa de la avería y la finalización de la reparación o eliminación de la avería y consecuentemente el restablecimiento de las condiciones normales de operación.

Usuario en alta tensión: persona física o jurídica que es consumidor final de energía en la red de alta tensión.

Usuario en media tensión: persona física o jurídica que es consumidor final de energía en la red de media tensión.

Valor de umbral: es el valor límite de la magnitud de un parámetro eléctrico, a partir del cual un equipo de medición registra un evento de tensión, corriente o frecuencia.

Valor eficaz (rms): raíz cuadrada del valor medio de la suma de los cuadrados de los valores instantáneos alcanzados durante un ciclo completo de la onda de tensión o de corriente.

Variación de tensión: aumento o disminución del valor eficaz de una tensión.

Variaciones de tensión de corta duración: una variación del valor eficaz (rms) de la tensión nominal a la frecuencia fundamental de la red de distribución, con una duración mayor que 8,33 milisegundos y menor o igual que un minuto.

A manera de resumen, según la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), en términos generales y fundamentados en estudios realizados por expertos, se ha logrado determinar que la mayoría de los problemas de calidad de energía (un 80%) son generados a nivel interno. Debido a esta realidad, las empresas deben tomar acciones preventivas para proteger sus equipos sensibles, ya que en la mayoría de los casos, estos pueden fallar por problemas generados internamente en la instalación.

3.2) Sección 2 – Sags y swells

Las caídas repentinas de tensión (sags o *dips*) y aumentos repentinos de tensión (swells), son eventos relacionados directamente con variaciones en la onda de tensión. Los sags como tales, se definen, según IEEE Std 1159, como una disminución del valor RMS de tensión por unidad (p.u.) de entre 0,1 p.u. y 0,9 p.u., para duraciones de 0,5 ciclos a 1 minuto, y los swells, como incrementos en el valor de tensión RMS de entre 1,1 p.u. y 1,8 p.u. con duraciones entre 0,5 ciclos y 1 minutos igualmente. La Hartford Steam Boiler (HSB), empresa de los Estados Unidos especialista en calidad de energía, destaca el hecho de que perturbaciones en las líneas como sags y swells, entre otras condiciones, son las principales causas del malfuncionamiento de equipos y máquinas que atienden.

La terminología utilizada para referirse a este tipo de eventos suele ser confusa, por lo que se debe interpretar de la siguiente manera: un sag de 20%, corresponde a una disminución de valor de tensión RMS nominal de un 20%; por lo tanto, su valor actual corresponde al 80% del valor inicial, conocido como "valor de la tensión retenida" o "restante". Así, por ejemplo, si se tiene una disminución del 30% del valor de tensión en un evento considerado como sag, para un sistema alimentado a 480 V, el valor de tensión restante corresponde a 336 V. De igual manera sucede con los swells. La IEEE 1159 clasifica los sags y los swells en tres categorías:

Tabla 4.Clasificación de sags y swells por parte de IEEE 1159

Categoría		Duración típica	Magnitud típica
Instantánea	Sag	0,5-30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
	Swell	0,5-30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
Momentánea	Interrupción	0,5 – 3 segundos	<0,1 pu
	Sag	0,5 – 3 segundos	0,1 – 0,9 pu
	Swell	0,5 – 3 segundos	1,1 – 1,8 pu
Temporal	Interrupción	3 segundos – 1 minuto	<0,1 pu
	Sag	3 segundos – 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
	Swell	3 segundos – 1 minuto	1,1 – 1,8 pu

Fuente: IEEE 1159 (2009, pág 6)

Los sags pueden ser provocados por diferentes razones: corto circuitos o sobrecarga en la línea suministradora; maniobras de mantenimiento eléctrico de la red; encendido de cargas de alta potencia como motores, *chillers*, elevadores, compresores; caída de líneas de

distribución por causa de la naturaleza, por ejemplo, ramas de árboles o contacto con animales; entre otras.

En un estudio realizado por Dranetz (2008, p.45), se determinaron las causas más probables de sags en los sistemas de distribución según su número de ocurrencia durante un periodo de estudio determinado. En la Tabla 5 se presentan los resultados:

Tabla 5. Causas principales de sags en sistemas de distribución

Causa	Número de ocurrencia	Porcentaje
Viento y rayería	37	46%
Fallas en equipo de distribución	8	10%
Accidentes de tránsito	8	10%
Animales	5	6%
Caída de árboles	1	1%
Desconocido	21	26%

Fuente: Dranetz (2008, p.45),

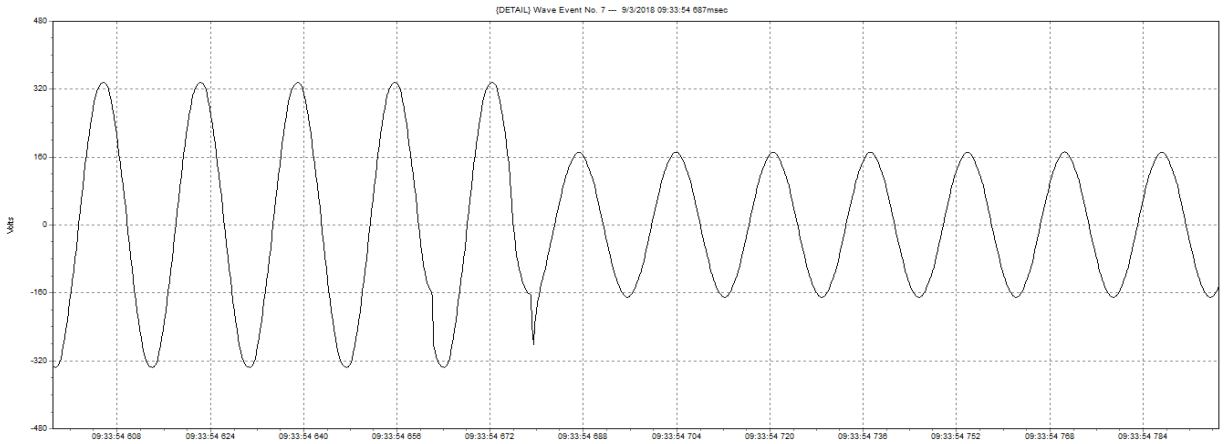
Las causas anteriormente mencionadas, causaron consecuencias dentro de las instalaciones en las que sucedieron; entre ellas: reducción de intensidad luminosa; parpadeo de monitores; variaciones en funcionamiento de motores; apertura de bobinas en contactores electromagnéticos, lo que causaba la interrupción de circuitos potencia y degradación de equipos eléctricos. Dichas causas además pueden generar desconexión de equipos sensibles dentro de su rango de tensión de funcionamiento; de hecho, los sags en centros de computadoras y dispositivos de control, pueden resultar en pérdida de datos almacenados en memorias volátiles como la Random Access Memory (RAM), en computadores de escritorio y en Controladores Lógicos Programables. (PLC).

Debido a lo anterior, un punto importante es el cómo determinar dónde se generan los sags, si es en el lado de distribución o dentro de la instalación eléctrica de la empresa; por ejemplo. Por lo tanto, para determinar si el sag o disminución en la caída de tensión se genera por la carga o por la línea de distribución, se recomienda tener en cuenta dos reglas importantes:

- Para una disminución en el valor eficaz o RMS de tensión generada por la fuente, la corriente usualmente se decrece o se va a cero.
- Para una disminución en el valor RMS de tensión generada por la carga, la corriente se incrementa significativamente.

A continuación, se ejemplifica lo descrito:

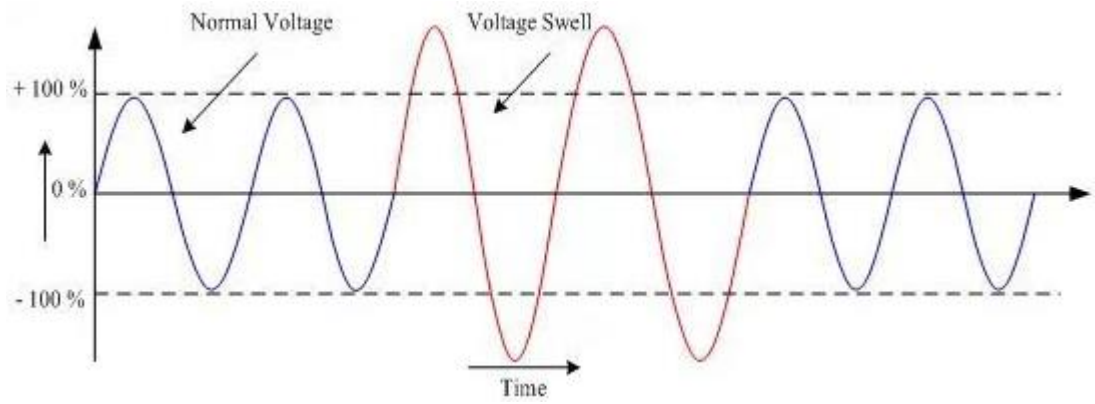
Figura 4. Representación de sag en medición eléctrica de línea de JASEC



Fuente: Elaboración propia

Los swells, por su parte, son generados por descargas atmosféricas directas sobre las líneas de distribución eléctrica, apagado de cargas de alta potencia, apagado de bancos de capacitores y maniobras de mantenimiento o eventos que resulten en cortos en las líneas de alimentación. Dentro de sus consecuencias se encuentra la degradación y daño frecuente de equipo eléctrico y electrónico por sobretensiones repentinas, además de envejecimiento y daños en los aislamientos tanto de conductores como de máquinas eléctricas. La figura que se muestra a continuación ejemplifica la representación de swell:

Figura 5. Representación de swell



Fuente: Accuenergy (s.f)

3.3) Sección 3 – Armónicos

Los armónicos se definen como componentes sinusoidales de la onda, que poseen una frecuencia que es múltiplo entero de la frecuencia fundamental; de manera que la señal de onda que se obtiene como respuesta, se ve deformada por acción de estas. Para su análisis se utiliza la descomposición por medio de las *Series de Fourier*. Como pilar de la calidad de energía se debe mantener las formas de onda de tensión, así como las de corriente iguales o lo más similar posible, tanto en la entrada como en la salida. Estas formas de onda se caracterizan mediante las siguientes ecuaciones:

$$V(t) = V_o sen(wt + \emptyset)$$

Donde:

V= Tensión (V)

w= Frecuencia angular (rad/s)

t= tiempo (s)

Ø= Ángulo de fase (rad)

$$I(t) = I_o sen(wt + \emptyset)$$

Donde:

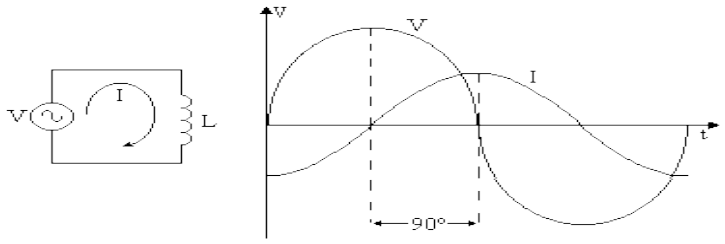
I= Corriente (A)

w= Frecuencia angular (rad/s)

t= tiempo (s)

Ø= Ángulo de fase (rad)

Figura 6.Representación de ondas sinusoidales de tensión y corriente de un sistema con carga inductiva



Fuente: Electrónica fácil (s.f.)

Tal como se observa en la figura anterior, las cargas lineales reciben un valor de tensión especifico con forma de onda sinusoidal y dan como respuesta un valor de corriente

de igual manera, con forma de onda seno. Dentro de estas cargas se encuentran; por ejemplo, motores de inducción, lámparas incandescentes, calefactores, entre otros dispositivos. En oposición, las cargas no lineales son aquellas que se alimentan mediante un valor de tensión con forma de onda sinusoidal y dan como respuesta una forma de onda de corriente deformada, de impulsos; este tipo de cargas generan armónicos que se inyectan al sistema eléctrico al que se encuentren conectados. Estas cargas se pueden clasificar de la manera que sigue:

Equipo Industrial

- Equipo de electrónica de potencia como variadores de velocidad y frecuencia, rectificadores, onduladores, puentes rectificadores.
- UPS (unidades de alimentación ininterrumpida)
- Hornos de arco
- Máquinas de soldar
- Arrancadores electrónicos
- Energización de transformadores de potencia
- Robots
- Chillers

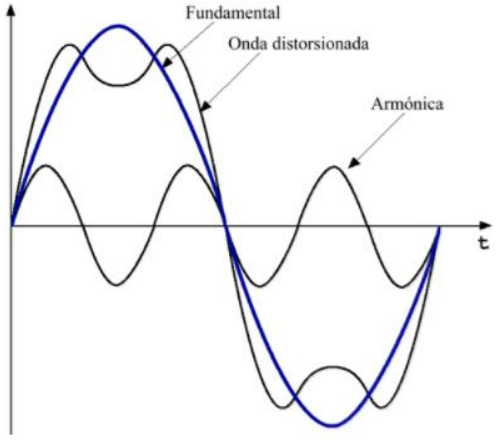
Equipo de oficina

- Computadores
- Impresoras
- Fotocopiadoras

Electrodomésticos

- Televisores
- Horno microondas
- Computadores
- Lámparas fluorescentes

Figura 7.Representación de la intervención de armónicas sobre la fundamental



Fuente: Publicaciones Urbe (s.f)

Dentro de las amónicas se encuentran los términos inter armónicas, que son aquellas distorsiones que se presentan en frecuencias que no son múltiplos enteros de la fundamental, y los sub-armónicos que son distorsiones que se presentan en frecuencias menores a la fundamental.

La clasificación de las armónicas se puede realizar de tres maneras: por su orden, por su frecuencia y por su secuencia, como se puede observar en la Tabla 6**.**

Tabla 6. Clasificación de armónicos

Orden	1^{er}	2^{do}	3^{er}	4^{to}	5^{to}	6^{to}
Frecuencia	60	120	180	240	300	360
Secuencia	+	-	0	+	-	0

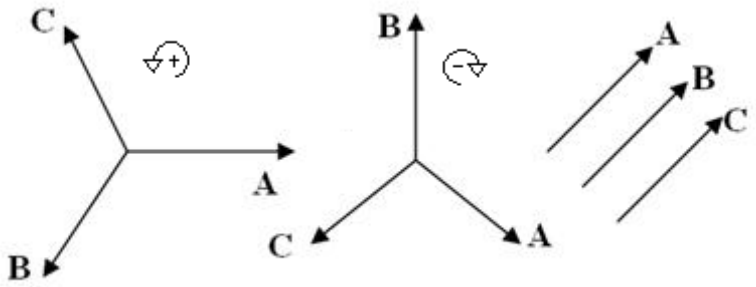
Fuente: Elaboración propia

Un ejemplo de identificación de armónicas, a partir de la Tabla 6, es que en un sistema de 60 Hz, la cuarta armónica tendrá una frecuencia de 240 Hz, con una secuencia positiva. La secuencia de cada armónica toma en consideración los ángulos de desfasamiento o retraso de 120 grados entre fasores, y es de vital importancia, puesto que en relación con este se encuentra su direccionamiento.

Las de secuencia negativa; por ejemplo, en motores tienden a crear campos magnéticos opuestos, por lo cual frenan el movimiento normal de los rotores, situación que genera calentamiento; por lo tanto afecta la eficiencia de los motores. Las armónicas de

secuencia cero, por su parte, se regresan por los conductores tierra y neutro, lo cual ha sido una de las razones que lleva a que el conductor de neutro sea dimensionado del mismo calibre que los conductores de fase en algunas instalaciones eléctricas en la modernidad. Sin embargo, sin importar la secuencia, orden y frecuencia, las armónicas son sobre corrientes que afectan disyuntores electromagnéticos, conductores y demás equipo eléctrico.

Figura 8. Representación de secuencia de corrientes armónicas donde la primera ABC es positiva, la segunda ACB es negativa y la tercera representa la secuencia cero



Fuente: Elaboración propia

En IEEE Std 141-1986, Prácticas Recomendadas para la Distribución de Energía Eléctrica para Plantas Industriales, se muestra la ecuación para el cálculo de las armónicas más representativas dependiendo del número de pulsos, orden y magnitud que producen los equipos electrónicos.

$$h = pn \pm 1$$

Donde:

h= Orden de la armónica

p= número entero (Serie de Fourier)

n= número de pulsos

De esta manera, si se tiene un sistema trifásico, con una frecuencia base de 60 Hz, con elementos rectificadores de seis pulsos, va a presentar armónicas elevadas en las armónicas de 5to, 7mo, 11mo, 13vo; entre otros, de acuerdo con la ecuación correspondencia. Las amónicas triples, las cuales provienen en su mayoría de equipo electrónico monofásico, como alumbrado fluorescente con balastros electrónicos, computadoras, UPS, entre otros,

que funcionan mediante rectificadores de cuatro pulsos, sus amónicas representativas son de orden múltiplo de tres.

Estas armónicas son de sumo cuidado, debido a que al ser de secuencia cero, añaden sobre corrientes a los conductores neutros del sistema; es decir, se suman a estos en cada uno de los equipos conectados en cada una de las fases, razón por la cual se genera sobrecalentamiento, caídas de tensión mayores y, por ende, mayores costos en el consumo de energía eléctrica y disminución en la eficiencia del proceso por pérdidas adicionales.

Para sistemas con corrientes armónicas se recomienda el uso de los transformadores que son manufacturados con lo que se conoce como "factor K", constante establecida por los fabricantes de transformadores y Underwriters Laboratories (UL) que indica la capacidad de los transformadores a operar bajo sistemas que poseen corrientes armónicas. Este factor se debe seleccionar desde el diseño, ya que por diseño del transformador su función principal es de no exceder las temperaturas máximas de operación permitidas en estos equipos. Este factor se determina mediante la siguiente ecuación:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 * h^2$$

Donde:

I_h= corriente RMS a la armónica h, en p.u. de la corriente nominal en RMS

Para estos existen capacidades estándar de factor K; por ejemplo 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50. El factor K normal de los transformadores donde este no viene indicado es 1, y es especial para cargas lineales.

Tabla 7. Factores K recomendados por aplicación

Tipo de carga	Factor *K*
Lámparas incandescentes (sin *dimmers* de estado sólido), calefactores eléctricos resistivos (sin controles de calor de estado sólido), motores (sin controladores de estado sólido), transformadores de control, dispositivos electromagnéticos de control, motor generador (sin controladores de estado sólido).	*K*-1
Lámparas de descarga, UPS con filtros de entrada opcional, equipos de calefacción inductivos, PLC y controladores de estado solido	*K*-4
Equipos de telecomunicaciones, UPS sin filtros de entrada.	*K*-13
Servidores de computadores, controladores de estado sólido (variadores de frecuencia), conectores multiconductor para instalaciones de salud, escuelas, etc., conectores multiconductor para alimentadores en equipos de inspección o prueba o para líneas de producción.	*K*-20
Conectores multiconductor para circuitos industriales, médicos y laboratorios educacionales, conectores multiconductor para circuitos comerciales en oficinas, pequeños servidores.	*K*-30
Otras cargas identificadas como productores de grandes cantidades de armónicos.	*K*-40

Fuente: Gouda, Amer y Salem (2011)

El factor se verifica por medio de cálculos, con los que se realiza la medición de las armónicas reales con equipo de monitoreo. Así pues,

- Si K calculado < K placa = el transformador opera correctamente.
- Si K calculado > K placa = el transformador debe ser derateado.

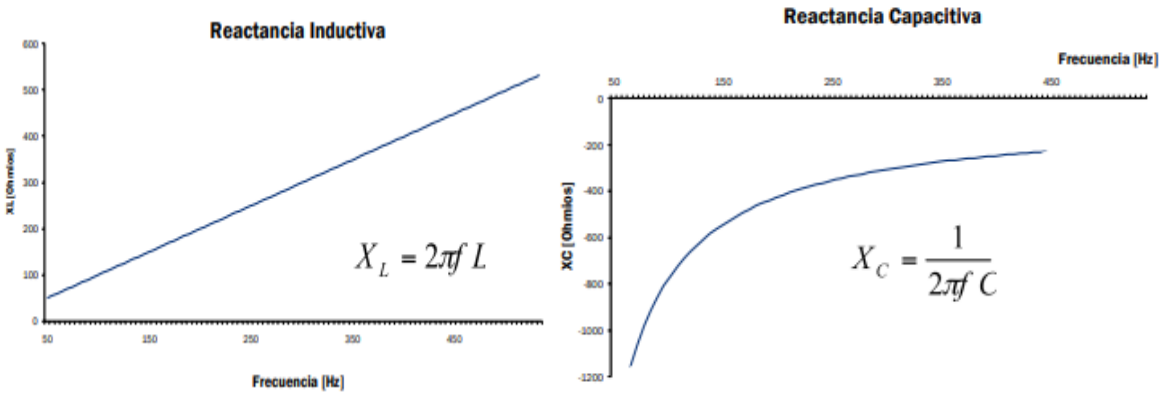
El derateo de un transformador es el proceso inverso al factor K, es una forma de calcular la carga real que un transformador puede soportar cuando hay armónicos. Por ejemplo, mientras que un transformador puede tener una capacidad nominal de 150 kVA, los armónicos la reducirían a una disponibilidad de carga de 75 kVA. Cuantos más altos sean los armónicos, menos eficaz es el transformador y menos corriente puede soportar, ya que los armónicos compiten por la potencia total. En este caso, la combinación de la carga del cliente y los armónicos había desembocado en un transformador sobrecargado.

Dentro del tema de la distorsión armónica es importante mencionar el término de la "impedancia", debido a que esta posee una relación directa en el desarrollo y comportamiento de las distorsiones. Cuando se tiene una fuente de armónicos de baja impedancia, se provoca una alta distorsión de corrientes armónicas; caso contrario, una baja distorsión de tensión armónica. En este caso los sistemas son considerados fuertes en relación a las cargas individuales, mientras que una fuente de alta impedancia provocará una menor distorsión en corriente, pero mayor en tensión.

La corrección de factor de potencia e incluso los filtros de armónicos mal diseñados pueden llevar a consecuencias mayores en cuanto a los niveles de corriente dentro de los sistemas eléctricos. Esto se presenta cuando ocurre el fenómeno llamado resonancia, el cual puede darse de dos maneras diferentes: en serie o en paralelo.

Las reactancias de los capacitores, como de las de los inductores dependen directamente de las frecuencias de funcionamiento. Mientras que la reactancia inductiva aumenta proporcionalmente con la frecuencia, de manera inversa la reactancia de los capacitores disminuye con el incremento de esta.

Figura 9.Comportamiento de las reactancias capacitivas e inductivas con respecto a la frecuencia



Fuente: Arteche (s.f)

Debido a la variación con la frecuencia de las reactancias inductiva y capacitiva y a sus signos antagónicos, existirá una frecuencia a la que las reactancias se anulan o toman valores muy elevados; esto dependerá de su conexión, serie o paralelo, de forma que se ocasionan problemas de gran severidad. Ese valor de la frecuencia al cual los valores de las reactancias inductiva y capacitiva son iguales, se denomina frecuencia de resonancia.

La reactancia en paralelo sucede cuando la capacitancia de un banco de condensadores y la inductancia presente en el sistema eléctrico forman un circuito resonante en paralelo. Cuando esto sucede, las corrientes armónicas pueden amplificar su valor nominal hasta en 20 veces. Además, si la frecuencia resonante coincide con alguna frecuencia armónica presente, se enfrentarán problemas de distorsión en la onda de tensión. Por esta razón, los bancos de condensadores comunes no son recomendados para corregir el factor de potencia en redes con contenido armónico elevado.

La reactancia en serie se da cuando se tienen un inductor y condensador en serie y sus reactancias se igualan, de manera que se cancelan; así el valor de impedancia será únicamente limitado por el valor de la de la resistentica, lo que genera que el valor de la corriente en el circuito sea sumamente elevado.

Dentro del tema de las variaciones de tensión, se tienen las conocidas curvas de tolerancia, las cuales, relacionando las variables tensión y duración, pretenden señalar el límite para el adecuado funcionamiento de un equipo. Estas curvas establecen durante cuánto tiempo puede funcionar un equipo a determinado nivel de tensión, sin que se presente mal funcionamiento. Ejemplos de estas curvas son la presentada por CBEMA, y su posterior

versión revisada y adoptada por el Information Technology Industry Council (ITIC). Una evaluación y comparación de estas curvas de tolerancia arrojó como conclusión, que la mayoría de los equipos susceptibles tienen una respuesta a las fluctuaciones de tensión muy similar a la que tiene el ser humano a estas a través del flicker; de hecho, el ser humano es -al parecer- el equipo más sensible del sistema. La primera curva de tolerancia conocida como la curva CBEMA (ITIC (CBEMA), 2005), se puede emplear para evaluar la calidad de la tensión de suministro en relación con las interrupciones, caídas y bajadas de tensión y las sobretensiones.

"Esta curva se aplicó inicialmente como una guía para ayudar a los miembros de la CBEMA a diseñar las fuentes de alimentación de sus computadores y equipos electrónicos (IEEE Std-1346-1998). La curva CBEMA se construyó a partir de datos experimentales y de datos históricos obtenidos de grandes computadores. Estudios posteriores sobre la calidad de energía pusieron de manifiesto que había un gran número de eventos en la tensión de alimentación (caídas de tensión fundamentalmente) que no estaban incluidos dentro de la zona aceptable definida por la curva CBEMA" (J.A. Oliver, 2002; D.S. Dorr, 1997).

La revisión de esta curva ha sido adoptada por el ITIC, razón por la cual se conoce como la curva ITIC. La curva ITIC describe el rango de la tensión de suministro de corriente alterna que normalmente puede tolerar la mayoría de los equipos electrónicos denominados equipos de la tecnología de la información; es decir, que no interrumpe su funcionamiento.

La curva define tanto condiciones estacionarias como transitorias y su utilización para otras tensiones nominales y para otras frecuencias no está específicamente considerada. Fuera de esta región de tolerancia se definen dos regiones desfavorables. La región de funcionamiento sin daño incluye caídas e interrupciones de tensión y que aplica tensiones inferiores al límite mínimo de la tolerancia. En esta región no se espera que los equipos funcionen correctamente, pero; en cambio, no es de esperar ningún daño sobre ellos.

En la región restante, denominada región prohibida o de interrupción y daño, incluye sobretensiones que superan el límite superior de la curva y es una región a evitar, ya que, si se somete a los equipos a tensiones con estas condiciones, se puede esperar que se produzca su avería. Aunque la curva ITIC (CBEMA) se ha definido para equipos de las denominadas tecnologías de la comunicación, también se emplea como un estándar en otros tipos de equipos

Tabla 8. Rangos de tolerancia de algunos equipos según IEEE Std 1346-1998

Equipo	Tolerancia a las variaciones de tensión		
	Rango superior	Promedio	Rango inferior
PLC	20 ms, 75%	260 ms, 60%	620 ms, 45%
Tarjeta de entradas de un PLC	20 ms, 80%	40 ms, 55%	40 ms, 30%
Controlador motor AC de 5 C.V	30 ms, 80%	50 ms, 75%	80 ms, 60%
Relé de control de alterna	10 ms, 75%	20 ms, 65%	30 ms, 60%
Arrancador de un motor	20 ms, 60%	50 ms, 50%	80 ms, 40%
Computador personal	30 ms, 80%	50 ms, 60%	70 ms, 50%

Fuente: IEEE Std 1346 (1998, p.

3.4) Sección 4 – Parpadeo (Flicker)

El parpadeo (flicker) es un fenómeno asociado a la calidad de energía, relacionado con la onda de tensión, donde se tiene la impresión subjetiva de pequeñas variaciones de su valor -no tan considerables como los sags- son también de importancia. Es un fenómeno no simétrico, lo cual quiere decir que puede ser diferente en todas las fases. Se percibe como pequeños cambios en las salidas de iluminación como lámparas y bombillos, en oficinas, viviendas o industria, lo que causa inestabilidad de la onda luminosa.

Las fuentes de dichos eventos pueden ser de corta duración como arranques de motores o uso de máquinas de soldadura o bien, de larga duración como hornos de arco o de inducción o funcionamiento continuo de cargas provenientes de motores de alta potencia con cargas pulsantes. Es un fenómeno posible de visualizar por el ojo humano, principalmente cuando se presenta a frecuencias menores a los 9 Hz, que puede generar problemas de deterioro de equipo electrónico como computadoras, PLC, equipo de comunicación, y físicamente puede llegar a irritar el ojo. Para su estudio, se trata de caracterizar su percepción mediante instrumentos de medición que posean un nivel de percepción visual de un observador promedio, pero que sea suficientemente representativo.

De esta manera se han realizado experimentalmente en laboratorios curvas que relacionan para determinada fluctuación de tensión, la amplitud para la cual el flicker se hace perceptible y la frecuencia de este. En general, las fluctuaciones de tensión generadas por cargas causan de disturbios, tienen características variables en el tiempo y es necesario fijar un periodo de observación considerado significativo y evaluar en modo estadístico la variación de la sensación instantánea en el mismo periodo.

La norma AR NT SUCAL 2015 de la ARESEP establece, tomando en cuenta el IEEE Std 1453-2015, que durante el 95% del tiempo, por un periodo de siete días consecutivos, el nivel de severidad de parpadeo ligado a fluctuaciones de tensión de largo plazo (P_{lt}) debe ser menor a 1%. Dentro del análisis de los parpadeos se tienen dos variables principales: el Parpadeo de Corto Plazo (P_{st}), que se refiere a la severidad de los parpadeos durante periodos de 10 minutos. Como la intensidad de sensación provocada por el flicker no depende solo de su nivel, sino también de su persistencia, se hace referencia a la curva de frecuencias acumuladas, que indica el porcentaje de tiempo de observación en el cual el nivel de flicker ha superado un valor asignado. Esta curva sirve como base para obtener el parámetro de

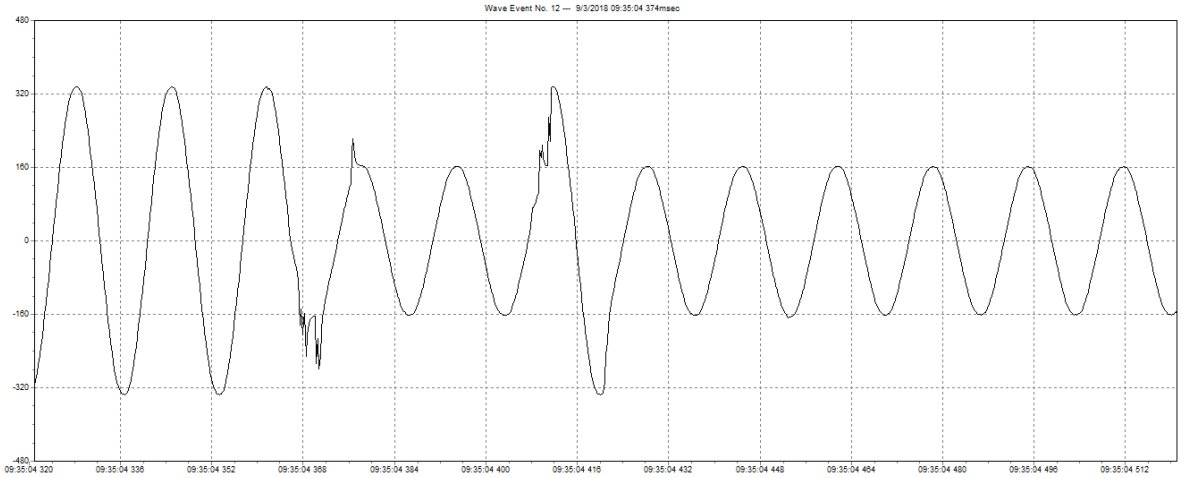
severidad del flicker, indicado con el símbolo Pst. En este punto es necesario relacionar el valor de severidad del flicker con una curva límite para las fluctuaciones de tensión, más allá de la cual ellas deben considerarse intolerables.

El segundo, es el Parpadeo de Largo Plazo (P_{lt}) que se refiere a la severidad de las fluctuaciones durante un periodo de dos horas empleando 12 valores sucesivos de P_{st}, esto debido a que existen equipos que poseen un ciclo de funcionamiento mucho más amplio, y que no se pueden representar fácilmente mediante los parpadeos de corto plazo.

3.5) Sección 5 – Transitorios de tensión

Los transitorios de tensión son perturbaciones que ocurren en las líneas de distribución de energía y que son de corta duración. También se les conoce como picos de tensión debido a la forma puntiaguda que toma su representación en la onda sinusoidal de tensión. Estos eventos dentro de las redes eléctricas generan que el nivel deseado de tensión para el correcto funcionamiento de máquinas, protección y equipo electrónico no sea el indicado y pueda llegar a provocar mal funcionamiento o inclusive daño total de los equipos.

Figura 10.Transitorio presentes en onda de tensión de una de las fases de distribución provenientes de JASEC.



Fuente: Elaboración propia

Estos transitorios corresponden a elevaciones de tensión de corta duración y muy alta frecuencia, generalmente superior a los 60 Hz, situación que los diferencia de los eventos de los mencionados anteriormente conocidos como swells. Su clasificación se puede encontrar en el IEEE Std 1159, tal como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 9. Clasificación de fenómenos transitorios

Categoría		Contenido en el espectro	Duración típica	Magnitud típica
Impulsivos	Nanosegundos	Aumento de 5 ns	< 50 ns	
	Microsegundos	Aumento de 1 µs	50 ns – 1 ms	
	Milisegundos	Aumento de 1 ms	> 1 ms	
Oscilatorios	Frecuencia baja	< 5 kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 pu
	Frecuencia media	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 pu
	Frecuencia alta	0,5 – 5 MHz	5 µs	0 – 4 pu

Fuente: Elaboración propia

Según IEEE Std 1159, un transitorio impulsivo es un evento repentino en el que no se encuentra cambio en la frecuencia de las condiciones normales de tensión o corriente, con polaridad unidireccional, ya sea del lado positivo, ya sea del lado negativo, según la onda sinusoidal. Estos transitorios son generalmente caracterizados por su tiempo de subida y bajada. También se pueden describir por su contenido en el espectro; por ejemplo, cuando un transitorio impulsivo de tensión se describe como 1,2/50 de la forma de onda, el 1,2 representa una medición del tiempo de subida en microsegundos, mientras que 50 expresa la medida del tiempo de bajada igualmente en microsegundos.

La causa principal de eventos transitorios de tensión en las líneas de distribución son los rayos. Debido a las altas frecuencias a las que se producen estos transitorios, son amortiguados rápidamente por los elementos resistivos de las instalaciones. Es importante mencionar que la ocurrencia de uno de estos eventos puede impulsar y producir transitorios oscilatorios, debido a resonancia en los sistemas de potencia

De igual manera IEEE Std 1159 define los transitorios oscilatorios como tensiones o corrientes que cambian rápidamente su polaridad de onda, se caracterizan por su magnitud, duración y contenido en el espectro, donde, como se observa en la

Tabla 9. Clasificación de fenómenos transitorios, se encuentran frecuencias altas, bajas y medias.

Otra de las consideraciones que se debe tomar en cuenta a la hora de realizar un estudio de calidad de energía que involucre transitorios para su correcta evaluación y búsqueda de causas es el entorno físico en el que se encuentra el lugar de estudio e instalación. Al respecto, se deben considerar las siguientes variables:

- Tipo de industria y su funcionamiento
- Instalación expuesta (exterior) o interna
- Formas de onda representativas del entorno de trabajo
- Rangos de funcionamiento; por ejemplo, amplitudes y duración de valores críticos que pueden causar daños en los equipos
- Posibles razones de generación de transitorios

Además, según *Advanced Powder & Coatings* (AP&C S.A), empresa de manufactura de dispositivos eléctricos, se debe tomar en cuenta el nivel de exposición del sistema a transitorios. Dicha exposición puede ser baja, media o alta. A continuación, se detalla cada una de estas:

Exposición baja

- Sistemas en áreas con baja frecuencia de rayería
- Poca carga instalada
- Sin conmutación de capacitores

Exposición media

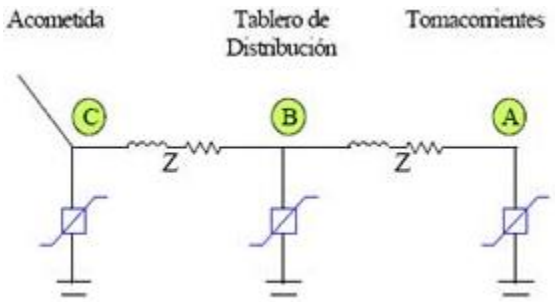
- Sistemas en áreas con frecuencia media a rayería
- Conmutaciones frecuentes y significativas
- Cargas instaladas de alta potencia

Exposición alta

- Exposición a eventos mayores a los descritos en las categorías media y baja.

Estos transitorios se clasifican además dentro de tres categorías de localización para representar las ubicaciones dentro de las instalaciones eléctricas de una planta, edificio o residencia, teniendo como punto de inicio las acometidas y final los elementos más alejados a esta. Se utiliza de manera tal, que la categoría “A” es la más alejada e incluye los tomacorrientes y circuitos de esta zona. Los de categoría “B” se refiere a tomacorrientes y circuitos cercanos a los tableros de distribución y cargas de importancia cercanas, y por su parte, los de la categoría “C” son los que se encuentran en la acometida de entrada del servicio, donde se está expuesto a transitorios de mayor nivel, como tensiones cercanas a los 10 kV y corrientes hasta los 10 kA en residencias.

Figura 11.Representación de categorías según localización en transitorios



Fuente: QuimiNet (QuimiNet,2008)

Las descargas atmosféricas o rayos se clasifican dentro de los transitorios impulsivos, y pueden ocurrir de diferentes formas: la más común es el impacto directo de la descarga sobre las líneas de alta tensión, lo cual inyecta altas corrientes que producen tensiones o que fluyen por la resistencia de la tierra generando diferenciales de tensión; además, se puede presentar el efecto de las descargas cercanas de un rayo entre nubes o tierra que pueden producir variaciones electromagnéticas en los conductores, lo cual induce corrientes en los circuitos primarios y secundarios. De igual manera, las descargas directas a tierra, producen que la corriente fluya a través de la malla de tierra, evento que genera diferenciales de tensión importantes, además conmutaciones de la red de alta tensión y accidentes industriales.

Se caracterizan por tener un tiempo de subida muy rápido, pero con una caída lenta y alto contenido energético. La forma de onda de tensión de circuito abierto está definida por un tiempo de frente de onda de 1.2µs y un tiempo de valor medio de 50µs, mientras que la forma de onda de corriente de cortocircuito está definida por un tiempo de frente de onda de

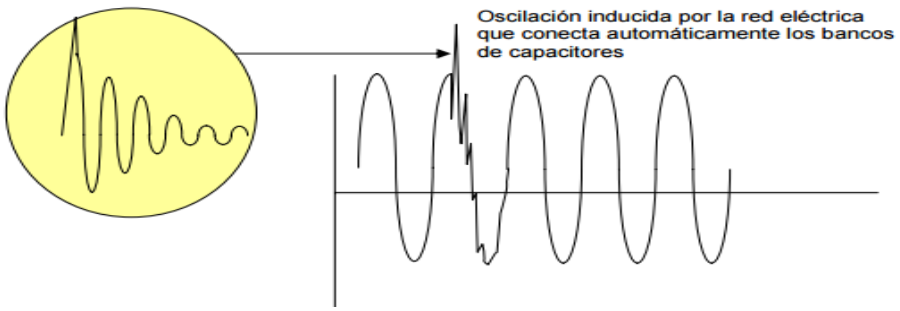
8µs y un tiempo de valor medio de 20µs. En la norma IEEE Std C62.41 se recomiendan valores de tensión de 6 kV y 3 kV, respetivamente para la prueba de los supresores de tensión.

Los transitorios presentes oscilatorios se producen principalmente en elementos conectados en la red eléctrica como soldadoras, aires acondicionados, accionamiento de fusibles y motores. Dentro de estos se encuentra la más común: la conmutación de los bancos de capacitores para la compensación del factor de potencia.

Además, conmutaciones debido al encendido y apagado de diferentes cargas o reigniciones múltiples o rebotes durante las operaciones de conmutación de contactores de aire o relés de mercurio; por ejemplo. Además de transitorios periódicos generalmente vistos como muescas de tensión, que ocurren durante el ciclo de operación de convertidores electrónicos de potencia o cortocircuitos. Recierres en la red eléctrica y cortocircuitos de línea a tierra o entre líneas.

Es importante tener en consideración que la actuación de los dispositivos de protección produce transitorios, por lo que entre más rápido sea su reacción, mayor magnitud tendrá el transitorio. Seguidamente se observa una representación gráfica del transitorio:

Figura 12.Transitorio oscilatorio



Fuente: QuimiNet (QuimiNet,2008)

Este tipo de onda se utiliza para las pruebas que se realizan a equipos diseñados para operar dentro de las categorías A y B de acuerdo con IEEE Std C62.41 y con impedancias del generador de señales de entre 30 Ω y 12 Ω, respectivamente; con corrientes de cortocircuito de 200 A y 500 A para una tensión de 6 kV valor máximo establecido.

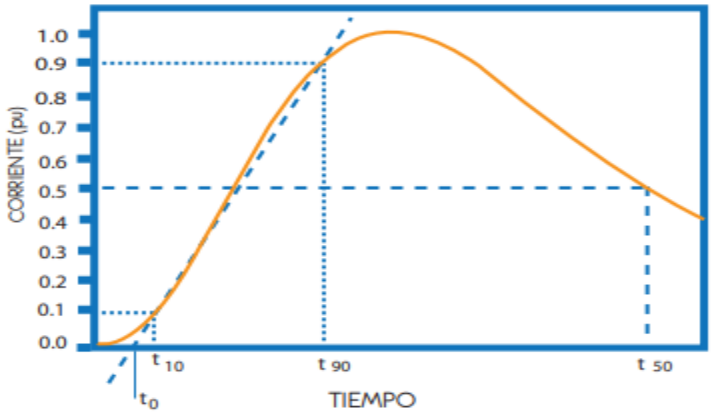
Algunos términos característicos de los eventos transitorios deben definirse claramente para entender el entorno en el que se trabaja, para las explicaciones se representan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. A continuación, se presentan términos característicos para el análisis de estos.

El origen virtual (*virtual origin*) es una definición establecida para determinar el inicio de una señal, para lograr tener dos puntos en la onda. Para encontrarlo, se trazan dos puntos a 10% y 90% del valor pico y se intersecan con la onda, para encontrar su valor sobre el eje de las abscisas. De este par de coordenadas se debe trazar una recta que las una e interseque el eje de las abscisas, este punto será el de origen en t_0.

De igual manera, el tiempo de subida (*rise time*) se identifica como la diferencia entre t_{90} y t_1, para el 90% y 10%, mientras que el tiempo de frente de onda se obtiene mediante la multiplicación por el factor de 1,25 para corriente y 1,67 para tensión, la diferencia entre t_{90} y t_{10}, que es el valor respectivo al 90% de onda en su dirección ascendiente.

El tiempo al valor medio se refiere a la diferencia entre el tiempo virtual t_0 y el tiempo al que la onda alcanza el 50% de su valor pico en la etapa de descenso. Su formato α/ ß, donde α corresponde al tiempo de subida de la señal y ß el tiempo de caída en el cual se alcanza el 50% del valor pico de la señal, según IEEE Std C62.41.

Figura 13.Representación de puntos importantes en la forma de onda para interpretación de transitorios



Fuente: CNFL (s.f)

En este tema, también es relevante destacar que, según la CNFL en el Boletín informativo de tensiones transitorias especifica que las fallas por eventos transitorios se pueden clasificar en tres:

- Fallas disruptivas: son aquellas que se dan por acople inductivo, y su acción afecta los datos de salida, lo que puede generar que los componentes electrónicos procesen

esta señal como un comando valido y genere bloqueos de programa, problemas de operación, archivos dañados, perdida de datos.

- Fallas disipativas: son aquellas que se relacionan con eventos repetitivos, que al final terminan provocando estrés y degradación en los sistemas eléctricos, tanto equipos como instalaciones. A largo plazo se podrían tener consecuencias severas.
- Fallas destructivas: son aquellas que a final de cuentas terminan por dañar o destruir equipos que se encuentran conectados a la red. Generalmente poseen un alto contenido energético a altas frecuencias y de muy corta duración.

Por lo tanto, algunos de los efectos que se pueden presentar por la acción de transitorios son:

- Corrupción de información
- Daño paulatino permanente de equipo y cargas eléctricas.
- Problemas transmisión de datos
- Operación intermitente
- Reducción de vida útil
- Disparo de protecciones sin causa aparente
- Conmutación de bancos de capacitores

Estos últimos, los bancos de capacitores se instalan en primera instancia para mejorar el factor de potencia, reducir costos y, en fin, mejorar la eficiencia de la instalación eléctrica; no obstante, una mala selección de estos puede generar problemas importantes, dentro de los que se encuentran los transitorios ya mencionados anteriormente. Asimismo, estos bancos son instalados para realizar la compensación de potencia reactiva requerida por la instalación eléctrica, que genera un bajo factor de potencia y por lo cual se cobra una penalización por bajo factor de potencia. Los bancos de capacitores son empleados a diferentes tensiones y en diferentes ubicaciones dentro de los sistemas de transmisión, como de distribución.

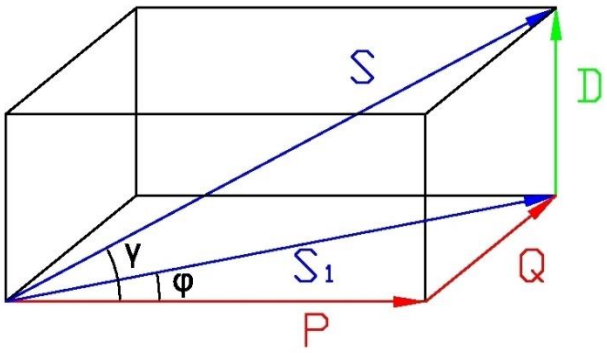
“Los transitorios suceden debido a la propiedad de los capacitores de reaccionar repentinamente a los cambios de tensión, de manera que cuando se energizan a nivel de la compañía, la tensión en los buses colapsa, seguida por una recuperación oscilatoria del nivel de tensión nominal. Esta recuperación tarda cerca de medio ciclo, cercano a los 8,33 milisegundos. La sobretensión asociada a la oscilación es debida a una tensión pico teórica

de dos veces el máximo valor RMS de la onda. Este efecto se produce de igual manera cuando se des energizan los bancos de capacitores" (CNFL, s.f).

Los eventos anteriores de transitorios de esta magnitud y duración usualmente no son problema en los sistemas de transmisión de la utilidad; sin embargo, pueden producir problemas importantes dentro de las plantas industriales, residencias y demás conectados a la red. A nivel de industrias estas sobretensiones relacionadas con los bancos de capacitores se conocen como magnificación de tensión, donde los valores de tensión pueden alcanzar momentáneamente valores de hasta el 400%. Los mayores transitorios de tensión ocurren en los bancos conectados a tensiones menores, en los que las características de la frecuencia de conmutación y la frecuencia de resonancia del sistema son casi iguales Según IEEE Std 18-1992 de Capacitores de Potencia en Paralelo, especifica que es razonable que los capacitores puedan resistir tensiones transitorias de entre un 205% - 354% del pico nominal en kV, dependiendo de la cantidad de veces que ocurran al año.

El factor de potencia con cargas no lineales posee una componente de potencia reactiva en un tercer plano, lo cual produce que el factor de potencia total sea equivalente al producto del factor de potencia de desplazamiento a frecuencia fundamental y el factor de potencia de distorsión, así mientras mayor sea la distorsión, menor será el factor de potencia. A continuación, se presenta un factor de potencia de cargas no lineales.

Figura 14.Factor de potencia cargas no lineales



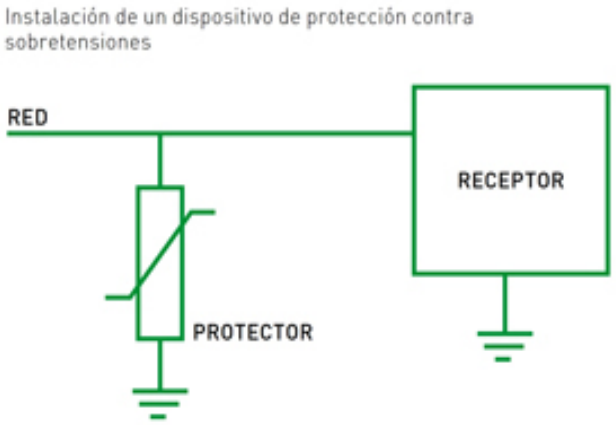
Fuente: QuintoArmónico (s.f)

La mitigación de este tipo de factor sucede gracias al uso de Transient Voltage Surge Supressors (TVSS) o de Surge Protector Device (SPD) ; dispositivos especiales para la protección contra sobretensiones transitorias, ya que actúan como un conmutador controlado por tensión y se instalan entre los conductores activos y los conductores de tierra en paralelo

a los equipos que se desea proteger. Si la tensión de la red es menor a la tensión de activación, el SPD actúa como un elemento de alta impedancia, de modo que por él no circula corriente eléctrica. Al contrario, cuando la tensión de red es mayor a la tensión de activación el SPD actúa como un elemento de impedancia cercana a cero, conduciendo de esta manera las sobretensiones a tierra, de forma que evita que los equipos conectados sientan sus efectos.

Aunque estos elementos se diseñan especialmente para estos eventos, la atenuación de los transitorios no es de un 100%, sino que corresponde a un porcentaje del evento original, que debe ser inferior al valor máximo permitido por la carga para evitar daños. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta las indicaciones del fabricante de los productos, pues es quien establece los valores de sobretensión oscilatoria que pueden soportar los equipos. En el caso de las computadoras, por ejemplo, este se encuentra entre el 150% y el 300%.

Figura 15.Conexión de un protector de sobretensiones



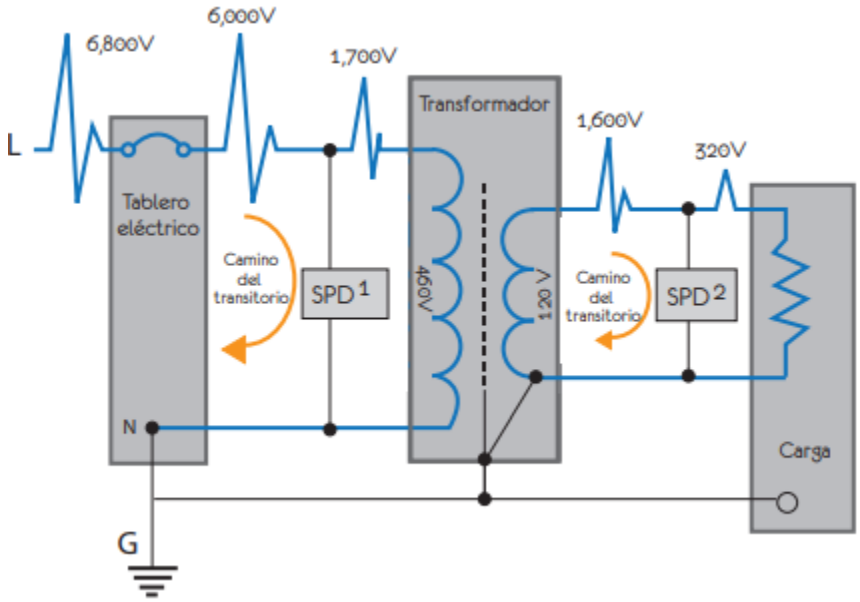
Fuente: Schneider Electric (s.f)

Debido a que la mayor cantidad de eventos transitorios son generados a lo interno de la red eléctrica de cada usuario, es importante considerar un esquema de protección escalonado que contemple desde el tablero principal hasta los tableros de distribución e incluso usuarios finales como máquinas, debido a que los transitorios se pueden generar en diferentes puntos de la instalación.

La tensión de anclaje es el valor de tensión a la cual el sistema de protección va a empezar su funcionamiento, o sea, su proceso de conducción y atenuación del evento transitorio, este valor de anclaje (*clamping*), se encuentra por arriba de la tensión nominal de operación del dispositivo de protección para evitar su funcionamiento continuo. Como se

mencionó anteriormente, el SPD no atenuará el total del transitorio, por lo cual siempre existe una tensión mayor a la nominal a la salida del protector. Este valor se conoce como tensión residual.

Figura 16.Esquema de funcionamiento de un sistema contra sobretensiones escalonado



Fuente: CNFL(s.f.)

Para la selección de un dispositivo de protección de sobretensiones se deben tomar en cuenta factores como la topología de la red, la tensión nominal de trabajo y polaridad de la protección, debido a que estas variables condicionan los valores máximos de la tensión de servicio del dispositivo y el margen de seguridad que se debe tener en cuenta por encima de la tensión nominal de la red. La exposición frecuente a descargas atmosféricas es otro evento de consideración, ya que el dispositivo deberá de contar con diferente capacidad de descarga, dependiendo si se dan impactos directos de los rayos (conducción) o indirectos (inducción electromagnética). La selección del SPD o TVSS adecuado para cada punto de la instalación,

se lleva a cabo especificando la categoría, tal como se muestra en la Figura 16 además de la capacidad en KV del evento esperado.

Por lo anterior, es de suma importancia conocer los distintos componentes de los SPD, a fin de elegir el más adecuado para cada punto de la instalación:

Varistor de Oxido Metálico (MOV): un varistor es un componente electrónico con una curva característica similar a la del diodo. El término proviene de la contracción del inglés variable resistor. Los varistores suelen usarse para proteger circuitos contra variaciones de tensión al incorporarlos en el circuito, de forma que cuando se active la corriente no pase por componentes sensibles. Un varistor también se conoce como Resistor Dependiente de Voltaje o VDR. La función del varistor es conducir una corriente significativa cuando el voltaje es excesivo.

Por debajo de la tensión de anclaje, el MOV se comporta como una resistencia de alta impedancia, que deja pasar una pequeña corriente de fuga. Una vez que se alcanza o sobrepasa esta tensión de anclaje, el MOV cambia de estado y se convierte en una resistencia de bajo valor, lo que limita la tensión de salida o residual al valor de anclaje, más la caída de tensión en el dispositivo (MOV).

Con el fin de establecer un nivel o ambiente seguro de operación, se define otra característica de los supresores que contienen MOV: la Tensión de Operación Continua Máxima (MCOV por sus siglas en inglés, Maximum Continuos Operating Voltage) y que corresponde a la máxima tensión RMS de línea que puede ser aplicado al SPD sin ocasionar daños o deterioro a los MOV en su interior.

Los diodos de avalancha: estos dispositivos presentan tensiones residuales más bajas que las ofrecidas por los SPD compuestos por MOV. Debido a lo anterior, en esquemas de protección de multietapa, son ideales en las aplicaciones tipo A, para proteger equipo sensible como, por ejemplo, circuitos integrados. Adicionalmente tienen mejores tiempos de respuesta en comparación con los MOV; es decir, son más rápidos. Sin embargo, su capacidad de disipación de energía es inferior que la proporcionada por los MOV y su costo es superior a estos últimos.

Tubos al vació: una de sus principales características es la gran capacidad de disipación de energía; sin embargo, la tensión residual es mucho más elevada que la

proporcionada por los MOV, (en el orden de 3kV-4kV) y su tiempo de respuesta es lento en comparación con los MOV. Su aplicación ideal es en acometidas telefónicas.

3.6) Sección 6 – Puesta a tierra

Un correcto sistema de puesta a tierra de una instalación eléctrica se considera como la base de la pirámide de una buena calidad de energía, ya que los sistemas de puesta a tierra tienen la función principal de proteger a los seres humanos en caso de que ocurra una falla en el sistema. El correcto funcionamiento de este tipo de protecciones garantiza seguridad a sus usuarios, de ahí que con los años se han ido mejorando; sin embargo, existen normas que lo regulan, pero que eventualmente no se cumplen (Tapia,2012), pese a que, de la misma manera que lo hacen con los seres humanos, el sistema de puesta a tierra protege elementos y dispositivos conectados a una instalación eléctrica.

El sistema de puesta a tierra se utiliza en cualquier tipo de instalación desde residencias, comercios, industrias, entre otras. El objetivo de esta manera de protección es habilitar la conexión a tierra en sistemas con neutro a tierra, con el fin de proporcionar el punto de descarga para las carcasas, armazón e instalaciones; asegurar que las partes sin corriente estén siempre equipotenciales con la tierra. Dicho sistema también limita las distorsiones de tensión provenientes de rayos, fenómenos de inducción, cortocircuitos, entre otros.

Por lo anterior, los sistemas de puesta a tierra deben ser capaces de tolerar corrientes de cortocircuito durante el tiempo transcurrido entre la producción de la falla y la actuación de las protecciones e interruptores que la eliminan, sin deteriorar sus propiedades mecánicas ni eléctricas. Además, deben ser capaces de drenar corrientes a tierra, provenientes de eventos transitorios, tales como descargas atmosféricas o por actuación de los pararrayos frente a sobretensiones, sin producir diferencias de potencial significativas que puedan ocasionar el deterioro prematuro de equipos importantes en la subestación, plantas industriales, edificaciones o líneas de transporte.

Según, IEEE 1100 (1992) y IEEE 1159 (1995), se define calidad de energía como “energizar y poner a tierra el equipo sensible de una manera adecuada para la operación del equipo”. En la Figura 1 se muestra la pirámide de calidad de energía, donde se observa que la base son los sistemas de puesta a tierra, un sistema eléctrico con un sistema de puesta a tierra ajustado a las normas permitirá la disminución de fallas relacionadas con interrupciones, eventos transitorios y variaciones en los parámetros fundamentales.

Asimismo, un buen sistema de puesta a tierra mejora la confiabilidad de los equipos y reduce la posibilidad de daños debidos a rayos o corrientes de falla. Cada año se pierden miles de millones en el lugar de trabajo debido a incendios eléctricos, sin incluir las costas procesales ni las pérdidas en productividad empresarial y de personal.

El artículo 250 del NEC (2008, p.109) define la conexión a tierra como "una conexión conductora de electricidad ya sea de forma intencionada o accidental, entre un circuito o equipo eléctrico y la tierra o cualquier otro cuerpo conductor de electricidad que pueda sustituir a la tierra". Dentro de las conexiones a tierra se distinguen dos categorías: conexión a tierra y conexión a masa. Una conexión a tierra es una conexión intencionada de un circuito conductor de electricidad (normalmente el neutro) a un electrodo de conexión a tierra ubicado dentro de la tierra. La conexión a masa garantiza la correcta puesta a tierra del equipo que está funcionando en una estructura. Estos dos sistemas de conexión deben mantenerse por separado excepto cuando se trate de una conexión entre los dos sistemas. Así se evitan diferencias de potencial de tensión por posibles descargas disruptivas generadas por rayos. El circuito de tierra, además de proteger a las personas, las instalaciones y los equipos, proporciona una ruta segura para la disipación de corrientes de fallo, rayos, descargas estáticas e interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia.

Es importante mantener monitoreados los sistemas de conexión a tierra puesto que con el paso del tiempo las condiciones de la tierra, dependiendo del lugar, pueden variar debido al contenido de humedad, niveles de sal, temperaturas elevadas, entre otros, lo que puede degradar la varilla y conductores. Por ello, se recomienda evaluar todas las tomas y conexiones a tierra al menos una vez al año, como parte del mantenimiento predictivo del departamento de Mantenimiento. También, se debe tener en cuenta que no hay ningún valor de resistencia de tierra estándar que se haya reconocido de manera unánime por parte de todas las agencias de normativas; no obstante, la NFPA y el IEEE recomiendan un valor de resistencia de tierra de 5 Ω o menos.

El NEC indica que es necesario "asegurarse de que la impedancia del sistema a tierra sea menor de 25 Ω, tal y como se especifica en el artículo NEC 250.56 (2008, p.115). En instalaciones con equipos sensibles, debería ser de 5 Ω o menos". En Costa Rica, el ICE recomienda un valor menor o igual a los 25 Ω.

Para realizar esta medición se debe utilizar el equipo adecuado; además, existen dos métodos permitidos para llevarlo a cabo: el método de picas y el de ganchos. El método de ganchos es el más confiable y es lo primero que se debe procurar cuando se vaya a realizar una medición de resistividad del terrero; sin embargo, no siempre se cuenta con las facilidades físicas para llevarlo a cabo, es por esto que también se avala el método por gancho, ya que es menos exigente en cuanto a instalación del equipo. En las siguientes líneas se abordará cada uno de estos.

3.6.1) Medición con ganchos

El comprobador de puesta a tierra 1625-2 de Fluke puede medir resistencias en paralelo de tierra utilizando solo pinzas. Con este método, se ubican dos pinzas alrededor de la varilla de conexión a tierra y cada una se conecta al comprobador. No se utiliza ninguna pica de puesta a tierra. Con una de las pinzas se induce una tensión fija conocida, mientras que con la otra se mide la corriente. Luego, el comprobador determina automáticamente la resistencia de la varilla de puesta tierra. Este método de medición solo funciona si el edificio o estructura en donde se realiza la medición cuenta con un sistema de puesta a tierra, aunque la mayoría lo tiene. Si existe solo una trayectoria a tierra, como sucede en muchas aplicaciones residenciales, el método sin picas no proporcionará un valor fiable y se debe utilizar el método de prueba de caída de potencial.

Con el método sin picas, no es necesario desconectar la varilla de puesta a tierra, por lo que no se altera el sistema de puesta a tierra existente durante la medición. Actualmente no es necesario dedicar tiempo a colocar y conectar picas para cada varilla de puesta a tierra de su sistema, con lo que se ahorra mucho tiempo. También, puede efectuar mediciones de puesta a tierra en lugares que antes no se hubiese considerado: dentro de edificios, en torres de alta tensión o en cualquier lugar donde no haya contacto directo con el suelo.

Figura 17.Medición de resistividad por medio de ganchos

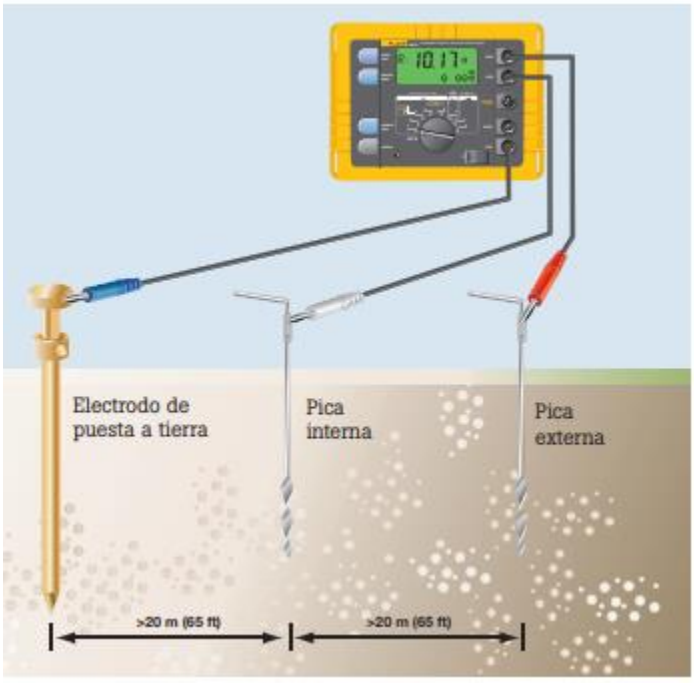
Fuente: Fluke (s.f.)

3.6.2) Medición con picas

Para este método se posicionan en línea recta sobre el terreno cuatro picas de puesta a tierra, equidistantes entre sí. La distancia entre las picas de puesta a tierra debe ser al menos tres veces mayor que la profundidad de la pica; de modo que, si la profundidad de cada pica de puesta a tierra es de 0,30 metros, la distancia entre picas deber ser mayor que tres pies 0,91 metros. El Fluke 1625 genera una corriente conocida a través de las dos picas externas de puesta a tierra y la caída de potencial de tensión se mide entre las dos picas de puesta a tierra internas. Usando la ley de Ohm (V=IR), el comprobador Fluke calcula automáticamente la resistencia del terreno. Dado que los resultados de medición con frecuencia quedan distorsionados e invalidados por la interferencia de piezas subterráneas de metal, acuíferos subterráneos, etc., siempre se recomienda tomar mediciones adicionales en donde los ejes de las picas se giren en 90 grados.

Al cambiar la profundidad y la distancia varias veces, se produce un perfil que puede determinar un sistema apropiado de resistencia del terreno. Las mediciones de resistividad del terreno con frecuencia son perturbadas por la existencia de corrientes en el terreno y sus armónicos.

Figura 18.Medición de resistividad por picas



Fuente: Fluke (s.f.).

3.7) Sección 7 – Norma de la ARESEP

En Costa Rica la entidad encargada de la calidad del suministro eléctrico es la ARESEP. En el documento *"Supervisión de la calidad del suministro eléctrico en baja y media tensión*", se establecen las características físicas principales con las que debe suministrarse el servicio eléctrico en Costa Rica, en el punto de entrega a los abonados, tanto a baja como a media tensión, donde incluye los límites de las variaciones tolerables de las variables. También, establece la obligatoriedad del cumplimiento de las condiciones impuesta en los artículos , para todas las empresas de distribución presentes en el país, y excluye de responsabilidad a las empresas si se presentan daños por eventos fuera de las condiciones establecidas.

En cuanto a regularidad de la frecuencia nominal de la tensión suministrada, el documento señala que esta será de 60 Hertz (Hz). Durante la operación normal, el 90 % de las variaciones de la frecuencia promedio en periodos de 10 minutos, deberán estar dentro del rango de (60 ± 1.65σ) Hz, donde σ es la desviación estándar de la frecuencia promedio en periodos de 10 minutos. El valor de "σ" será de 0,03 Hz.

Presenta los valores de tensión nominales para baja tensión eficaces en las redes de distribución.

Tabla 10. Valores eficaces de baja tensión

Sistema	Tensión	
	Entre líneas activas (Volt)	Entre líneas activas y neutro (Volt)
Monofásico bifilar[1]	-	120
Monofásico trifilar	240	120
Bifásico trifilar	208	120
Trifásico, 4 conductores[2]	208	120
Trifásico, 4 conductores[3]	480	277
Trifásico, 3 conductores[4]	240	-
Trifásico, 4 conductores[5]	240	120
Trifásico, 3 conductores[4]	480	-
Trifásico, 4 conductores[5]	480	240

Fuente: AR NT SUCAL (2015, p.6)

Además de los datos antes mencionados, para cada una de las tensiones de suministro establece valores umbrales, dentro de las categorías de intervalo normal y tolerable. Donde se presentan los máximos y mínimos de tensión permisibles, antes los cambios de carga y potencia en el sistema de distribución bajo condiciones normales de operación.

En el artículo 9 de esta norma, se establece que en cuando se detecte zonas dentro del rango tolerable y que su ajuste requiere una modificación menor a la red, no deberá durar más de 48 horas a partir del momento en que se detecta; si es requerida una modificación mayor la condición tolerable es permitida, siempre y cuando se tenga entendido por la empresa que debe actuar en un plazo no mayor a tres meses. Durante estos tres meses, los usuarios deberán de ser compensados.

Tabla 11. Intervalos normales y tolerables del valor de baja tensión del servicio

Sistema – V_s (Volt)	Intervalo			
	Normal (Volt)		Tolerable (Volt)	
	$V_{mín}$	$V_{máx}$	$V_{mín}$	$V_{máx}$
Monofásico bifilar 120	114	126	110	127
Monofásico trifilar 120/240	114/228	126/252	110/220	127/254
Bifásico trifilar 120/208	114/197	126/218	110/191	127/220
Trifásico 120/208, conexión estrella	114/197	126/218	110/191	127/220
Trifásico 277/480, conexión estrella	263/456	291/504	254/440	293/508
Trifásico 240, conexión delta	228	252	220	254
Trifásico 480, conexión delta	456	504	440	508

Fuente: AR NT SUCAL (2015, p.7)

Si se presenta desbalance entre los valores de tensión de las fases, la empresa de distribución deberá de garantizar que para cada siete días consecutivos, el 95% de los valores eficaces, calculados en 10 minutos, no debe exceder el 3% de desbalance, el cual se expresa de forma porcentual por medio de la siguiente fórmula:

$$D = \frac{100 * |\Delta máx|}{Vprom}$$

Donde;

D = porcentaje de desbalance (%)

|Δmáx| = valor absoluto de la mayor diferencia entre cualquiera de los valores de tensión fase a fase y el valor promedio de las tensiones fase a fase (V)

Vprom = tensión promedio (V)

Para el control de armónicas en la red se presentan valores mínimos de cumplimiento tanto para armónicos de tensión como para los armónicos de corriente. En el caso de las tensiones armónicas, el control se realiza mediante el estudio del la Distorción Armónica Total (THD) tensión, donde el 95% de los valores eficaces de tensiones armónicas no deben de sobrepasar el 5% del valor de tensión nominal (hasta la armónica de orden), durante un periodo de siete días consecutivos.

$$THD\ tensión = \sqrt{\sum_{h=2}^{35} (V_h)^2}$$

V_h = amplitud relativa de la tensión armónica de orden "h", en relación con la fundamental Vf, hasta la armónica individual número 35 (%)

En cuanto a corrientes armónicas, la empresa eléctrica deberá de velar porque los abonados con servicios trifásicos ajusten sus instalaciones, con el fin de que la distorsión armónica de corriente en el Punto de acople común (PCC) , se encuentre dentro de los valores establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 12.Valores límites de distorsión armónica de corriente para usuarios conectados a la red

LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE PARA USUARIOS CONECTADOS EN REDES GENERALES DE DISTRIBUCIÓN. (Tensión de 120 a 69000 Volt)						
I_{SC}/I_L	$h<11$	$11\leq h<17$	$17\leq h<23$	$23\leq h<35$	$35\leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1	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	1	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fuente: AR NT SUCAL (2015, 8)

Donde

h = orden de la armónica

ISC = corriente de cortocircuito en el PCC

IL= valor máximo de corriente demandado durante el periodo de medición

THD corriente = distorsión armónica total de corriente

TDD = distorsión total en corriente demandada

Este valor de TDD se calcula por medio de la ecuación que sigue:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{35}(i_h)^2}}{i_L}$$

Donde:

i_h = valor RMS de corrientes armónica individual de orden h (A)

i_L = valor RMS de la máxima corriente demandada (A)

Para el caso del fenómeno del parpadeo (flicker), de igual manera durante el 95% del tiempo, para cada periodo de una semana, el nivel de severidad debe ser inferior a 1, donde el cálculo de este se llevará a cabo mediante la fórmula que se muestra a continuación:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12}\frac{Psti^3}{12}}$$

Donde:

Psti = severidad de parpadeo de corta duración durante 10 minutos definido en IEEE 1453

Plt = severidad de larga duración calculada a partir de una secuencia de 12 valores de Pst en un intervalo de dos horas

En cuanto a las variaciones de tensión de corta duración y de origen transitorio, las cuales incluyen huecos y picos de tensión provocados por eventos naturales como caída de ramas de árboles, rayerías o acción de animales; o los provocados por cambios en la operación del sistema de potencia y flujo de carga, deben ser limitadas por parte de las empresas, en cuanto a variables de amplitud, frecuencia y duración, con la finalidad de establecer acciones correctivas. Para ello se establecen los siguientes parámetros:

Tabla 13. Variaciones de tensión de corta duración

Categoría	Valores no tolerables
Impulso	Impulsos con magnitud mayor al 200 % del voltaje nominal, V_n.
Picos de tensión	Picos mayores a 115% del voltaje nominal V_n de cualquier duración.
Huecos de tensión	. Huecos entre 0 y 50% del voltaje nominal V_n con de cualquier duración. . Huecos entre 50% y 70% del voltaje nominal V_n con una duración mayor a 12 ciclos (0,2 seg.). . Huecos entre 70% y 80% del voltaje nominal V_n con una duración superior a 30 ciclos (0,5 seg.).

Fuente: AR NT SUCAL (2015, p.11)

Como se observa, estos parámetros establecen que el método de verificación se debe realizar mediante dispositivos adecuados que aseguren la unión firme con los conductores del equipo y la instalación eléctrica del edificio. Además, se debe -al menos- registrar los valores establecidos por la siguiente tabla, según el tipo de servicio eléctrico y por un tiempo mínimo de medición de una semana.

Tabla 14. Parámetros por registrar según el tipo de conexión al servicio eléctrico

Tipo de servicio	Puntos de Medición	Parámetros	Variaciones rápidas	Tiempo de Prueba
Monofásico bifilar	Línea activa – Neutro	Tensión	- Huecos de tensión - Picos de tensión - Parpadeo	7 días naturales
Monofásico trifilar	Líneas activas – Neutro	Tensión	- Huecos de tensión - Picos de tensión - Parpadeo	
Trifásico estrella	Fases – Neutro Entre fases	Tensión, Desbalance de tensión.	- Huecos de tensión - Picos de tensión - Tensiones Armónicas - Parpadeo	
Trifásico delta	Fases - Neutro Entre fases	Tensión Desbalance de tensión.	- Huecos de tensión - Picos de tensión - Tensiones armónicas - Parpadeo	

Fuente: AR NT SUCAL (2015, p.12)

Se expresa, además en la norma, explícitamente, que la severidad del parpadeo se evaluará únicamente cuando exista denuncia expresa del abonado o sospecha por la empresa distribuidora de niveles fuera de los límites. Ahora bien, para las condiciones mínimas del equipo de medición, estas se basan en las condiciones establecidas por la norma IEC-61000-4-30 “Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro”, los cuales incluyen:

a) Lectura y registro de tensión y corriente en verdaderos valores eficaces (rms)
   Rangos
   - Frecuencia: 60±3 Hz
   - Tensión
   - Amperaje
   - Precisión

b) Capacidad de registro de eventos
   - Huecos de tensión
   - Picos de tensión
   - Sobre tensión
   - Baja tensión
   - Impulsos

c) Selección de magnitudes de umbral para la determinación de comienzo de eventos

d) Intervalos de registro: valores promedio para 10 minutos

e) Registro de valores (rms) máximo, promedio y mínimo por intervalo

f) Registro de fecha de eventos, hora de inicio y finalización, duración del evento

g) Registro de armónicas: hasta la componente de orden 35

Los valores umbrales para cada uno de los sistemas se encuentran establecidos en la tabla siguiente:

Tabla 15.Ajuste de valores umbrales de equipos para pruebas a baja tensión

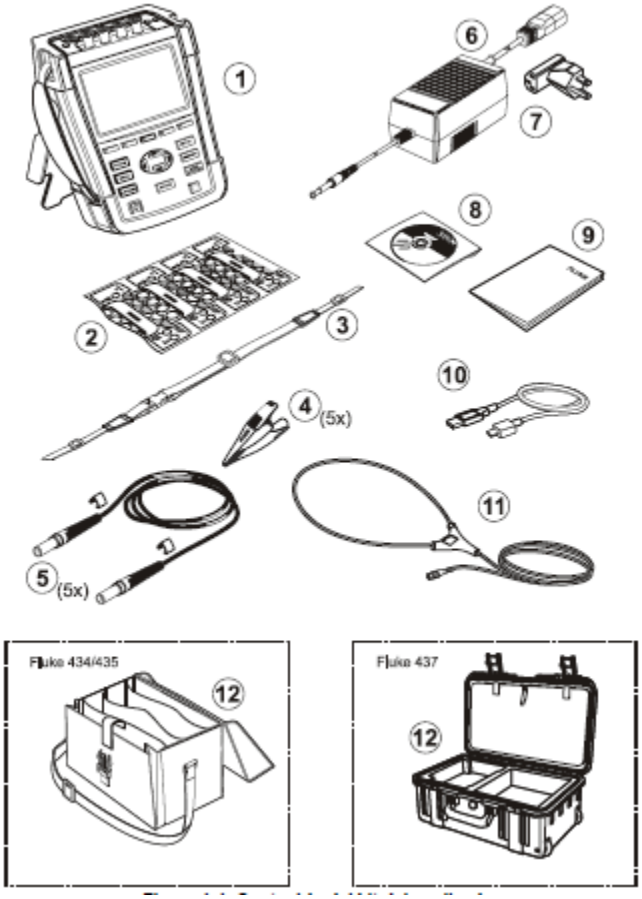
Categoría de Servicio	Categoría de Evento	Valores de Umbral (Volts rms)	Porcentaje de la Tensión Nominal
Monofásico bifilar	Hueco de tensión	104	87% de Vn
	Pico de tensión	138	115% de Vn
	Impulso	240	200% de Vn
Monofásico Trifilar	Hueco de tensión	104/209	87% de Vn
	Pico de tensión	138/276	115 % de Vn
	Impulso	240/480	200 % de Vn
Trifásico	Hueco de tensión	104/181Y - 209Δ	87% de Vn
	Pico de tensión	138/239Y - 276Δ	115% de Vn
	Impulso	240/416Y - 480Δ	200 % de Vn
	Tensiones Armónicas	3% de Vn	Para cada tensión armónica
		5% TDA	Armónicas hasta orden 35
	Desbalance	3%	Sin carga
	Corrientes armónicas	5% a 20 % TDD	Refiérase a lo indicado en el artículo 13.

Fuente: AR NT SUCAL (2015, p.13)

3.8) Sección 8 – Equipo de medición / Fluke 435-II

El equipo utilizado para realizar las mediciones de calidad de energía fue el Fluke 435-II, analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica. Los elementos que conforman el equipo son:

Figura 19.Componentes de equipo de medición



Fuente: Manual Fluke 435-II (2006,p.4)

1. Analizador de calidad de energía
2. Juego de etiquetas simbólicas
3. Correa
4. Pinzas de cocodrilo
5. Cables de prueba
6. Adaptador de red

7. Adaptadores de enchufe
8. Manual instrucciones
9. *CD-ROM* de manuales y software
10. Cable de interfaz *USB*
11. Sondas de corriente de CA de 6000A flexible
12. Maletín

Asimismo, los aspectos de supervisión de la calidad de energía, se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 16. Aspectos de supervisión de la calidad de energía por equipo Fluke 435-II

Parámetro	Gráficos de barras disponibles	Límites	Intervalo medio
Vrms	3, uno por cada fase	Probabilidad del 100%: límite superior e inferior Probabilidad del x%: límite superior e inferior	10 minutos
Armónicos	3, uno por cada fase	Probabilidad del 100%: límite superior Probabilidad del x%: límite superior	10 minutos
Parpadeo	3, uno por cada fase	Probabilidad del 100%: límite superior Probabilidad del x%: límite superior	2 horas
Caídas de tensión/Interrupciones/Cambios rápidos de tensión/Subidas de tensión	4, uno por cada parámetro que cubre las 3 fases	número permitido de eventos por semana	basado en rms de ½ ciclo
Desequilibrio	1, que cubre las 3 fases	Probabilidad del 100%: límite superior Probabilidad del x%: límite superior	10 minutos
Frecuencia	1, que cubre las 3 fases Medido en la entrada de tensión de referencia A/L1	* Probabilidad del 100%: límite superior e inferior Probabilidad del x%: límite superior e inferior	10 segundos
Transmisión de señales	6, una para cada fase y para la frecuencia 1 y 2	* Probabilidad del 100% límite superior: N/D Probabilidad del x%: límite superior: ajustable	3 segundos rms

Fuente: Manual Fluke 435-ll (2006, p.18)

4) Capítulo 4 - Análisis de resultados

A continuación, se muestra el análisis de los resultados obtenidos a partir del estudio de calidad de energía realizado en Laboratorios Stein, en Cartago, Costa Rica. El presente estudio se realizó con la finalidad de conocer el estado actual y comportamiento del sistema eléctrico, debido a que se han presentado problemas, principalmente por huecos de tensión, que llegan a sacar de operación algunas de las máquinas de la planta de producción, situación que genera pérdidas económicas considerables. A partir de este problema, se busca establecer una base de la calidad de energía a la que se debe aspirar. Por lo tanto, se presentarán, además, recomendaciones para mitigar los problemas que se encuentran durante las mediciones.

4.1) Metodología

Para llevar a cabo este estudio, se realizaron y analizaron monitores de parámetros de estado estable de las diferentes variables eléctricas, como lo son el perfil de tensión, perfil de corriente, la demanda de potencia activa reactiva y aparente, el factor de potencia y su afectación por el factor de distorsión, además de los valores de distorsión armónica de tensión, como de corriente. Todo lo anterior para cada una de las mediciones realizadas en los puntos seleccionados, según el tipo de carga instalada que poseen.

4.1.1) Procedimiento de medición

Para la realización de estas mediciones se establece el siguiente procedimiento:

- Coordinación de visita con el ingeniero y electricistas de Laboratorios Stein
- Preparación de herramienta necesaria (taladro, desatornilladores, puntas, multímetro, alicate, entre otras)
- Registro del equipo con empresa encargada de seguridad de la planta
- Instalación del equipo (se debe utilizar equipo de protección personal (EPP) adecuado)
- Configuración del equipo
- Cubrimiento de tablero durante el periodo de medición
- Retiro del equipo
- Análisis de datos

Figura 20. Equipo de protección personal utilizado durante el trabajo de campo

Fuente: Elaboración propia

4.1.2) Evaluación

Se incluyen los valores que no cumplen con la norma actual que rige la calidad en el suministro de energía en el país, la cual es la AR NT SUCAL 2015. De igual manera, se muestra el método de mitigación recomendado y considerado el más adecuado, para cada una de las perturbaciones encontradas.

4.1.3) Actualización de diagrama unifilar de la planta

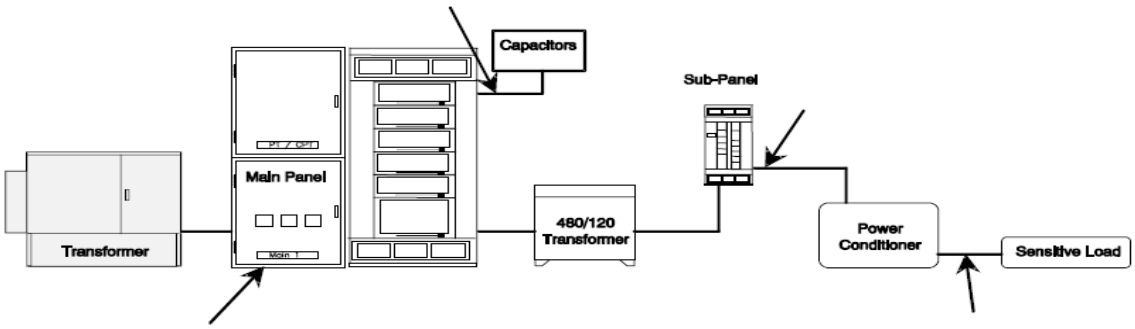
Primeramente, para la evaluación del sistema eléctrico, se realizó una actualización total del unifilar eléctrico de la planta, donde por medio de la apertura de tableros, seguimiento de canalizaciones, entre otros, se logró identificar las conexiones de cada una de las cargas instaladas actualmente. Además, se identificaron protecciones y calibres de los ramales de la instalación, tanto de los conductores por fase, como de neutro y conductores de tierra.

4.1.4) Selección de los puntos de medición

Al contar con el unifilar eléctrico, fue más sencillo realizar la selección de los puntos a escoger para implementar las mediciones de calidad de energía, según lo recomendado en IEEE Std 1159:

- Medición en subestación principal
- Medición en chiller
- Medición en tablero de área administrativa

Figura 21. Puntos de monitoreo de calidad de energía IEEE 1159



Fuente: IEEE Std 1159 (2009, p.44)

4.2) Resultados de las mediciones

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de cada medición realizada:

Tabla 17. Resumen medición en subestación principal

Descripción	**Valor**		
Tensión	A	Vmáx: 478,77 V	Vmín: 413,03 V
	B	Vmáx: 484,11 V	Vmín: 397,47 V
	C	Vmáx: 486,41 V	Vmín: 448,2 V
Corriente máxima	632,5 A		
Potencias promedios	Real: 350 kW		
	Reactiva: 100 kVAR		
	Aparente: 370 kVA		
FP	0,93		
Energía	44600 kWh semanal		
Frecuencia	60 Hz		
THD tensión	A: 1,40%		
	B: 1,50%		
	C: 1%		
TDD	A: 15%		
	B: 11%		
	C: 14%		
Desbalance	1,129%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18.Resumen medición en área administrativa

Descripción	**Valor**		
Tensión	A	Vmáx: 211,57 V	Vmín: 0 V
	B	Vmáx: 211,51 V	Vmín: 0 V
	C	Vmáx: 211,26 V	Vmín: 0 V
Corriente máxima	108,1 A		
Potencias promedios	Real: 15 kW		
	Reactiva: 3 kVAR		
	Aparente: 17 kVA		
FP	0,9		
Energía	336,5 kWh semanal		
Frecuencia	60 Hz		
THD tensión	A: 1,80%		
	B: 1,70%		
	C: 1,70%		
TDD	A: 7,5%		
	B: 7,5%		
	C: 20%		
	N: 44%		
Desbalance	0,99%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Resumen mediciones en chiller

Descripción	Valor		
Tensión	A	Vmáx: 479,60 V	Vmín: 412,36 V
	B	Vmáx: 483,16 V	Vmín: 400,70 V
	C	Vmáx: 485,74V	Vmín: 451,52 V
Corriente máxima	247,3 A		
Potencias promedios	Real: 85 kW		
	Reactiva: 32 kVAR		
	Aparente: 100 kVA		
FP	0,84		
Energía	4300 kWh semanal		
Frecuencia	60 Hz		
THD tensión	A: 1,50%		
	B: 1,50%		
	C: 1,75%		
TDD	A: 18%		
	B: 14%		
	C: 17%		
Desbalance	1,00%		

Fuente: Elaboración propia

4.3) Medición en subestación principal

4.3.1) Metodología de la medición

Para la realización de las mediciones se hace uso de un equipo de medición de calidad de energía 435-II, marca Fluke, con sensores de corriente de una capacidad de 3000 amperios. El equipo se conectó en subestación a la entrada de servicio del secundario del transformador principal de 1500 kVA TX-1 con una impedancia de 5.7559%, lo que generó una medición que abarca la totalidad de la carga conectada en la planta durante el periodo de medición.

Figura 22.Subestación eléctrica Laboratorios Stein

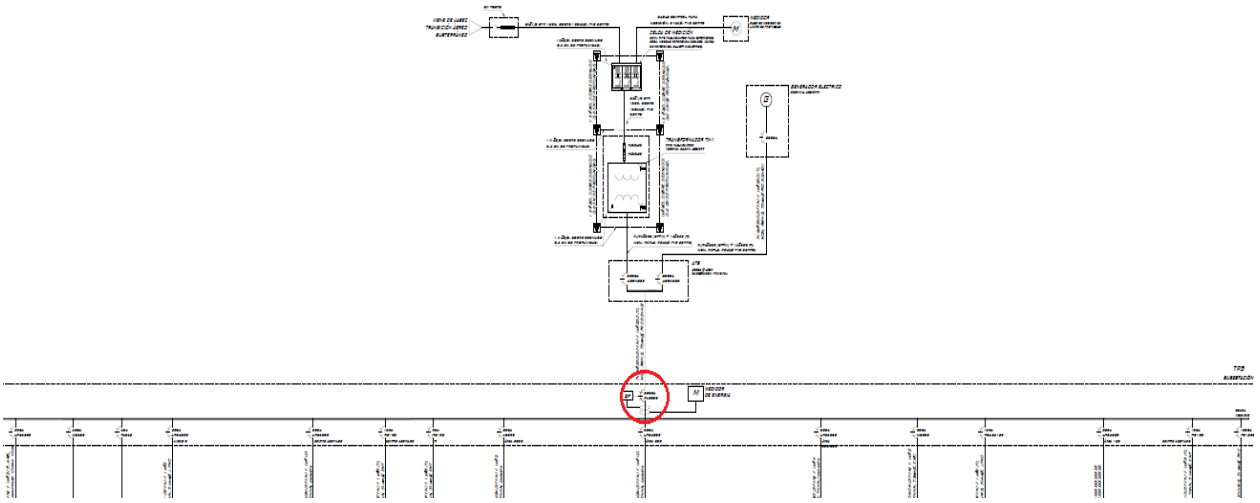
Fuente: Elaboración propia

El periodo de medición fue de 168 horas continuas, y se tomaron muestras durante cada minuto, de manera que se obtuvo un total de 10080 muestras registradas para cada una de las variables eléctricas establecidas. Las 10080 muestras registradas se almacenan en memoria y se procesan para obtener los perfiles de operación de cada parámetro eléctrico.

De estos parámetros eléctricos se obtienen los valores máximos, mínimos y promedios para establecer los límites de operación del sistema eléctrico, para después compararlos con lo que recomiendan los estándares internacionales. Además, se programó el equipo para detectar eventos de tipo transitorio en voltaje con variaciones por encima del 20% de voltaje pico, esto con la finalidad de evaluar si los arranques de cargas internas impactan en el voltaje de suministro o en su defecto, registrar los eventos que son generados externamente y son reflejados hacia este nodo.

4.3.2) Punto de medición

Figura 23. Ubicación del primer punto de medición en el secundario de TX-1, a la entrada de subestación



Fuente: Elaboración propia

Lista de cargas ubicadas, vistas durante la medición:

- Chiller 100 toneladas. 225 kW
- Compresor de 37 kW
- Bomba del sistema de supresión de incendios
- Tablero área de oficinas
- Tablero área de montacargas
- Tablero área de IT
- Tablero casa de máquinas
- Tableros de iluminación
- Tableros de distribución

Esta medición a nivel de subestación se realizó del 23 al 30 de marzo de 2018, fechas durante las cuales se pudo establecer que el sistema eléctrico de la instalación se alimenta por medio de una conexión trifásica a partir del secundario transformador de pedestal, con tres conductores referentes a las fases y la conexión a la malla de tierra, mientras que el tablero principal se alimenta mediante cuatro *sets* de conductores calibre 350 Kcmil RWH-2 (3F+N) y 250 Kcmil RWH-2 (T).

Figura 24.Barras de subestación donde se colocó equipo de medición

Fuente: Elaboración propia

4.3.3) Perfil de tensión

La primera gráfica ubicada en el Anexo 1.1, presenta los valores registrados de tensión para cada una de las fases. Como se observa en dicho anexo, la curva de cada una de las tres es constante la mayoría del tiempo; sin embargo, se registraron valores de tensión máximos y mínimos. En la fase A se obtuvo un valor de tensión mínimo de 413,03 V, y un máximo de 478,77 V; para la fase B se registró un mínimo de 397,47 V y un máximo de 484,11 V; mientras que para la fase C hubo un mínimo de 448,2 V y un máximo de 486,41 V. A partir de estos valores, se obtuvo un valor mínimo global de 397,47 V con una duración de 1 minuto, y un valor máximo de 486,41. En la **Tabla 11**, perteneciente a la AR NT SUCAL 2015 se presentan los valores límites, los cuales una vez registrados caen dentro del rango tolerable, donde el límite menor es 440 V y el limite mayor es 508 V.

Se debe destacar el hecho de que la base del estudio de calidad de energía en Laboratorios Stein se debe a la caída de tensión recurrente. Al registrarse las mediciones en este punto -la entrada del servicio-, se puede deducir que corresponde a un problema del lado de distribución. JASEC fue notificado del problema y realizó un cambio en una de las líneas previo a la medición, la cual no se encontraba correctamente conectada, razón por la cual se

creaba una falla constante entre esta y la tierra. Luego de la intervención de JASEC, la tensión siguió mostrando valores menores a los normales establecidos en la norma; no obstante, por tratarse de valores dentro del rango tolerable y haberse notificado a la empresa distribuidora, esta cuenta con un plazo de tres meses para solucionar el problema actual, debido a que no es una falla menor. Durante este periodo, Laboratorios Stein debe ser compensado económicamente por medio de la siguiente ecuación:

$$MCEU = 2 * ENS * FCE * CENS(colones)$$

Donde:

MCEU: monto a compensar

ENS: energía mensual suministrada en condiciones deficientes

CENS: costo de la energía no suministrada determinado por la ARESEP

FCE: factor de compensación económica

Estos valores mencionados anteriormente deben de ser solicitados a la compañía de distribución

Figura 25.Medición fija de tensión a la entrada de servicio

Fuente: Elaboración propia

Al conversar con el ingeniero a cargo, se menciona que apenas el nivel de tensión de una de las líneas cae por debajo de los 460 V, se empiezan a generar los problemas, principalmente en el área de producción, esto debido a que la tensión mínima de los equipos instalados es del valor anteriormente mencionado, así pues, apenas se apruebe el estudio, se presentará a JASEC nuevamente para que propongan una solución al caso.

4.3.4) Mitigación de variaciones de tensión

Internamente, el problema puede ser manejado; sin embargo, requiere de una inversión de capital alto, cercana a los $400000 valor estimado de la UPS. Los altos mandos de la compañía están dispuestos a llevar a cabo la inversión, puesto que desean trabajar con los más altos estándares de calidad, lo que -por supuesto- incluye la energía con la que trabajan.

Mediante la instalación de una UPS en el principal, se pueden corregir las variaciones de tensión mediante la función estabilizadora que ejecuta para hacer que los valores de tensión se mantengan siempre estables, además de que servirá como sistema de alimentación ininterrumpido mientras entra en funcionamiento la planta de emergencia o mientras se restablece el flujo de corriente eléctrica, para brindar tensión y corriente de buena calidad. Se decide proponer la instalación de una UPS en este punto, puesto que es la entrada del servicio donde se presentan la mayoría de los eventos por variaciones en el nivel de tensión.

4.3.4.1) Selección de UPS

La selección de la UPS se realizó mediante las recomendaciones de una de las empresas distribuidoras más conocidas a nivel mundial, además de ser conocida por Laboratorios Stein puesto que desde antes poseían una aguas abajo para un sistema de tomacorrientes con respaldo. Según APC de Schneider Electric,

Los valores a tomar en consideración fueron los siguientes:

- Carga total del sistema: 495 kVA (se obtiene de la medición)
- Tensión de funcionamiento: 480/277 V
- Potencia entra en caso de ampliaciones: 10%
- Tiempo de autonomía: 20 min
- Solución redundante: no
- Equipo auto-soportado a ubicar en la subestación
- Tensión de la instalación: 480/277 V

Todo lo anterior da como resultado una UPS Galaxy VX 500kVA, distribuida en Costa Rica y a la cual se le pueden agregar módulos de baterías de 250 kVA para aumentar su potencia.

Figura 26.UPS Galaxy VX 500kVA, 480V

Fuente: APC by Schneider Electric (s.f.)

4.3.5) Perfil de corriente

En cuanto al perfil de corriente, presentado en el Anexo 1.2, es preciso decir que fue obtenido mediante el registro de datos, mediante los cuales se puede observar el comportamiento totalmente repetitivo de la onda, en los que se reflejan los picos de demanda para los días entre semana, momentos de trabajo normal de la planta, así como la disminución de esta para los días sábado y domingo. El valor máximo de corriente registrado es de 632,5 A en la fase B del sistema y sucedió a las 15:18 p.m. del 26 de marzo del año en curso.

4.3.6) Potencia real, reactiva, aparente y factor de potencia

El perfil de la demanda de potencia real se encuentra en el Anexo 1.3 y como se observa en este, posee el mismo comportamiento que el de corriente, puesto que es directamente proporcional a este y al valor de tensión, el cual dio un promedio cercano a los 350 kW durante el periodo de operación normal, con un pico de demanda máxima de 458,6 kW y un valor mínimo de 191,1 kW. Para el caso de la potencia reactiva consumida, como se observa en el Anexo 1.4, se tiene un valor promedio estimado de 100 kVAR, con un valor máximo de 198,3 kVAR y mínimo de 60,9 kVAR. Además, se registró la potencia aparente

con un valor máximo de 495 kVA y mínimo de 206,4 kVA, como se muestra en el Anexo 1.5.

Con el análisis de los valores anteriores se puede obtener el valor de factor de potencia cos(Φ), el cual según la medición realizada se encuentra siempre por arriba del valor mínimo de 0,9 establecido por la ARESEP. En el Anexo 1.6 se muestra claramente que este posee un valor promedio de 0,93, por lo que no existen problemas por bajo factor de potencia, y no debe de aparecer penalización por este en el cobro de la compañía distribuidora. El F.P. es el factor de potencia que incluye el factor de distorsión debido a las cargas no lineales sigue siendo mayor a 0,9 durante todo el periodo de medición. Ver Anexo 1.7.

4.3.7) Energía

El consumo de energía total estimado por la instalación para la semana de medición fue de 44600 kWh, lo que representa un consumo mensual de energía cercano a los 178400 kWh.

4.3.8) Frecuencia

La frecuencia del sistema siempre se encuentra en 60 Hz, con una variación menor a los ±0,03.

4.3.9) Análisis armónico

4.3.9.1) Distorsión armónica de tensión

Otro de los parámetros de energía a tomar en cuenta durante la medición, es el de los armónicos; para hacerlo, primeramente se presenta la distorsión armónica de tensión en el Anexo 1.10 y su respectiva curva en el Anexo 1.11. A partir de ellos, se tiene el porcentaje de THD de tensión total, así como el componente individual en el espectro de frecuencias para cada una de las fases, donde las armónicas de 5to y 7mo orden son las más representativas; sin embargo, ninguna de estas supera el 1% y siempre están por debajo del 5% recomendado en el artículo 12 de la AR NT SUCAL 2015, pese a ello, el perfil de distorsión armónica en tensión no presenta valores que superen el máximo recomendado.

4.3.9.2) Distorsión armónica de corriente

Para el análisis de la distorsión armónica de corriente, se tomó el valor del TDD que hace referencia a la distorsión total de demanda, para la cual se requiere un proceso un poco más complejo, puesto que se requiere conocer el THD de corriente, así como la corriente de cortocircuito en el punto de acople y la corriente máxima demandada por el sistema.

La corriente máxima de cortocircuito en el punto de acople fue suministrada por el departamento de Proceso Planificar y Desarrollar la Red de JASEC, donde se tiene que el aporte para una falla trifásica es de 1900 A y 1600 A para una falla monofásica de fase a tierra. Debido a esta información, se toman los 1900 A como I_{SC} y 632,5 A como I_L. Al realizar la relación, se obtiene el siguiente valor:

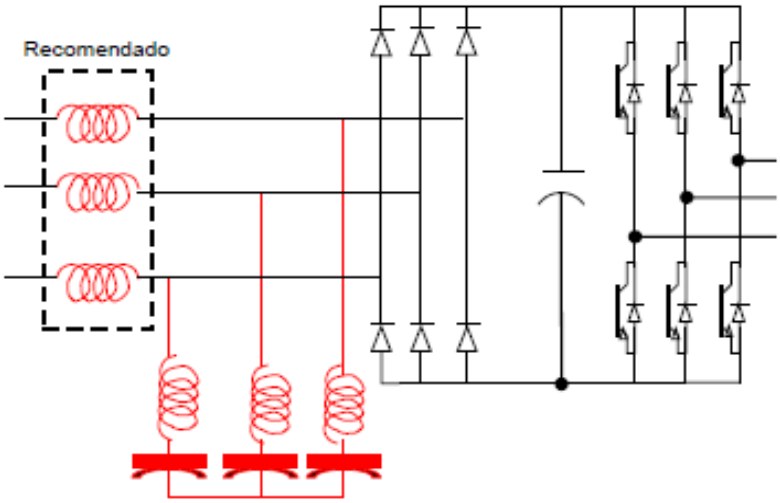
$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{1900}{632{,}5} = 3{,}01$$

En la **Tabla 12**, se indica que para valores menores a 20, el valor de TDD debe ser menor a cinco, así como los valores de THD de corriente hasta el orden 11 debe ser menor a 4%. Con base en ello y según lo que se observa en los Anexos 1.14, 1.15 y 1.16, se evidencian problemas de armónicos principalmente por aporte de las armónicas de 5to y la 7mo orden y que se generan principalmente por rectificadores de seis pulsos. La forma de onda característica de este tipo de armónicas se puede ver en el Anexo 1.22.

4.3.10) Mitigación de armónicos

Para mitigar este elevado contenido armónico que llega a tener valores de TDD de 14% se proponer la instalación de un filtro sintonizado aguas abajo del transformador, como un sistema centralizado de filtrado.

Figura 27.Representación de filtro sintonizado



Fuente: Dranetz (2018)

Se recomienda este tipo de filtro puesto que además de reducir las armónicas, corrigen el factor de potencia, en caso de ser necesario; además, se conectan en paralelo con el sistema o líneas y se puede instalar en cargas individuales, tableros de distribución o, como en este caso, en la subestación principal. Ahora bien, para la selección del filtro se necesita especificar cuatro variables: tensión, frecuencia de sintonizado, capacitancia e inductancia.

4.3.10.1) Diseño del filtro

1. Primeramente, se debe de obtener el valor de potencia real de máxima demanda. Para este caso fue de 460 kW y la tensión de trabajo 480 V.
2. Seguidamente, se obtiene el valor del factor de potencia de desplazamiento inicial, el cual fue de 0,92.
3. Luego, se específica a qué valor de factor de potencia de desplazamiento se quiere llegar. En este caso el valor deseado es de 0,98.
4. Después, se obtienen los ángulos de cada uno de estos factores.

$$\emptyset_{inicial} = cos^{-1}(0{,}92) = 23{,}07°$$

$$\emptyset_{final} = cos^{-1}(0{,}98) = 11{,}48°$$

5. A continuación, se calcula el valor de kVAR:

$$kVAR = kW(tan(\emptyset_{inicial}) - tan(\emptyset_{final}))$$

$$kVAR = 460\ (tan(23{,}011) - tan(11{,}48))$$

$$kVAR = 101{,}2$$

6. A partir de este valor, se calcula la capacitancia de los condensadores:

$$kVAR = 2\pi f C V^2$$

$$C = \frac{101{,}2}{2\pi(60)(480^2)}$$

$$C = 1165\ \mu F$$

7. Seguidamente, se busca la frecuencia de sintonización, la cual será un poco menor a la frecuencia de la armónica a la cual se desea empezar a filtrar.

$$f_{sintonizado} = 5(60)(0{,}94)$$

$$f_{sintonizado} = 282\ Hz$$

8. Finalmente, se obtiene el valor de la inductancia:

$$2\pi f_{sintonizado} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f_{sintonizado}}\right)^2}{C}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 {f_{sintonizado}}^2 C}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2(282^2)(1165x10^{-6})}$$

$$L = 0{,}273\ mH$$

4.3.11) Desbalance entre fases

El desbalance entre fases para esta medición fue siempre menor al 3% mínimo que indica la norma AR NT SUCAL 2015 en el artículo 11. Estos valores, incluso como se muestra en el Anexo 1.17, durante el 95% del tiempo, el valor de desbalance obtenido fue de un 1,56%; sin embargo, es importante destacar que se presentaron algunos valores mayores al 3%.

4.3.12) Curva ITIC-CBEMA

La curva ITIC-CBEMA fue establecida para evaluar las posibles consecuencias que tienen las variaciones de tensión en el sistema, con relación a los equipos electrónicamente sensibles . Dicha curva se presenta en el Anexo 1.19 y presenta tres zonas: la zona superior derecha, que no se encuentra incluida en el embudo y que, por tanto, se considera como zona de interrupción y daño a los equipos; la zona derecha inferior que no incluye el embudo y hace referencia a la zona de interrupción y no daño; lo demás que se encuentra incluido en el embudo, hace referencia a la zona de funcionamiento normal de los equipos. En esta se registran los eventos que ocurrieron durante el periodo de medición. Como se puede observar en el anexo, se registró un evento de posible interrupción sin daño a los equipos electrónicamente sensibles, el cual tuvo una duración cercana a los 10 ciclos o 0,167 segundos y una tensión del 30% de la tensión nominal.

4.3.13) Registro de sag

El grafico mostrado en el Anexo 1.20 hace referencia a un evento registrado que cae dentro de la clasificación de sag, el cual tuvo una duración de 962 milisegundos, con una tensión RMS de 91,2 V, tensión de línea a neutro, lo que representa una caída cercana al 33% de la tensión y que se presentó a las 8:12 a.m., el día 24 de marzo. En el Anexo 1.21 se representa claramente el hueco de tensión generado.

Asimismo, al presentarse una disminución de la corriente al momento del sag, se indica que este fue generado por la fuente y no por equipos dentro del sistema eléctrico de Laboratorios Stein. Se pueden observar además transitorios oscilatorios de baja frecuencia, para lo cual se deben utilizar equipo clases C para contrarrestar sus efectos en este punto de la medición.

4.4) Medición en TX-06 área administrativa

4.4.1) Metodología de la medición

La segunda medición de calidad de energía se realizó en el secundario del transformador TX-06, encargado de alimentar el área administrativa de Laboratorios Stein. Al igual que, para la medición anterior, se hace uso de un equipo de medición de calidad de energía 435-II, marca Fluke, con sensores de corriente de una capacidad de 3000 amperios. Este punto de medición se seleccionó por el tipo de cargas que se encuentran conectadas a este ramal, las cuales corresponden principalmente a equipo de iluminación, equipos de cómputo, impresoras y sistema de climatización. Al respecto, según informes de la CNFL, el 20,8% de consumo energético nacional se debe a equipo de oficina.

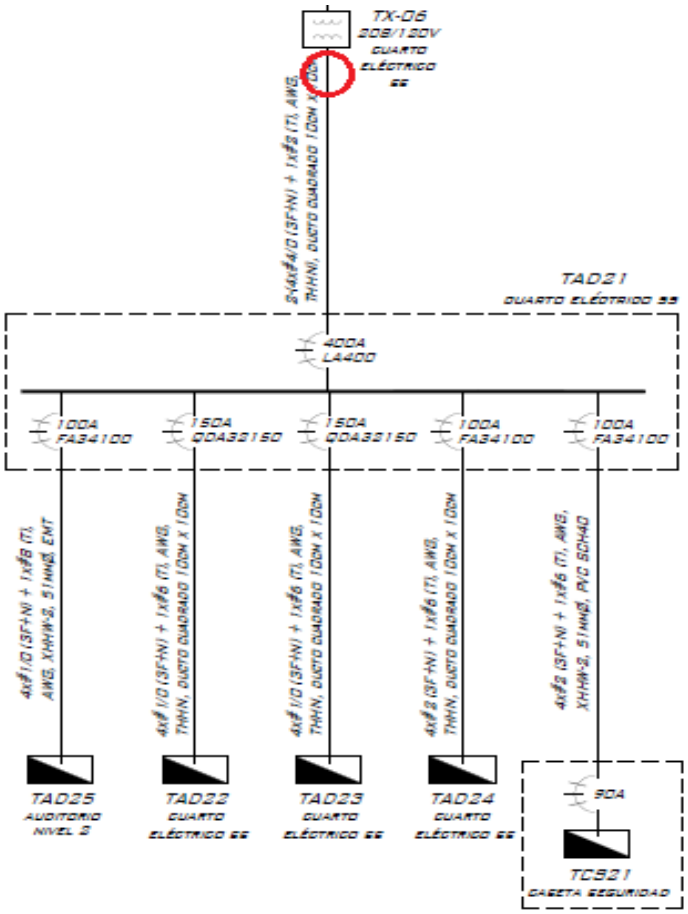
Estos equipos en su mayoría son electrónicamente sensibles y de vital importancia para la operación de la empresa, ya que en este punto es donde se manejan los datos, planillas, entre otros tipos de información delicada. Por esta razón se debe buscar que estos equipos no se vean afectados por malos parámetros de calidad de energía dentro de la instalación eléctrica. Además, gran parte de estos equipos funcionan mediante la operación de rectificadores de pulsos, que en grandes cantidades pueden generar daño progresivo en los equipos, principalmente por distorsión armónica.

Así las cosas, para llevar a cabo la medición, el equipo se conectó en el secundario del transformador seco de distribución TX-06, con relación de transformación de 480/277 V en el primario, y a 208/120 V en el secundario, debido a las cargas conectadas, lo que resulta en una medición que abarca la totalidad de la carga conectada en el área administrativa, como se mencionó anteriormente.

El periodo de medición fue de 168 horas continuas, tomando muestras durante cada minuto, de donde se obtuvo un total de 10080 muestras registradas para cada una de las variables eléctricas establecidas. Las 10080 muestras registradas se almacenan en memoria y se procesan para obtener los perfiles de operación de cada parámetro eléctrico. De estos parámetros eléctricos se obtienen los valores máximos, mínimos y promedios para establecer los límites de operación del sistema eléctrico y son comparados con lo que recomiendan los estándares internacionales.

4.4.2) Punto de medición

Figura 28. Ubicación de segundo punto de medición en unifilar eléctrico, en el secundario del transformador TX-06 de área de oficinas



Fuente: Elaboración propia

Figura 29.TX-06 Área administrativa, se muestran donas de corriente y conectores para registro de tensión

Fuente: Elaboración propia

4.4.3) Perfil de tensión

Esta medición se realizó durante la semana del 28 de abril al 4 de mayo de 2018, para un sistema con tensión nominal 208/120 V, conectado en estrella. Dentro de los valores de tensión registrados en este punto, se puede observar que se mantienen constantes durante la mayoría del periodo de medición con un valor máximo de 211,57 V y mínimo de 0 V para la fase A; además de un valor máximo de 211,51 V y mínimo de 0 V para la fase B, mientras que para la fase C se obtuvieron valores de máximo de 211,26 V y mínimo de 0 V.

Estos valores mínimos registrados de 0 V corresponden a dos interrupciones totales de la corriente que alimenta esta área, la cuales sucedieron el 28 de abril a las 7:00 a.m. y el 1 de mayo a la 6:35 a.m. respectivamente; ambos eventos durante días no laborales. Los valores de tensión máximos y mínimos normales para esta topología se encuentran en la **Tabla 11**, en la que se indica que para un sistema 208/120 V en estrella, se requiere de mínimo 197 V y máximo 218 V, por lo que los valores de tensión siempre se encuentran dentro de los valores normales enmarcados en distribución, excepto por las interrupciones que fueron eventos aislados; la primera con una duración mayor a los 10 minutos y la segunda de 1 minuto.

4.4.4) Perfil de corriente

En el Anexo 2- 2 de este estudio, se muestra el valor de la corriente máxima registrada, la cual fue de 108,1 A en la fase A, al mediodía debido al funcionamiento de la mayoría de las cargas de aire. El perfil de corriente registrado es repetitivo y característico para cada uno de los días laborales.

4.4.5) Potencia real, reactiva, aparente y factor de potencia

De la gráfica de corriente y la de tensión obtenidas, se registra el valor de demanda de potencia real por parte de esta área del sistema, debido a que son directamente proporcionales. Su valor máximo es de 31,5 kW, y se registró a las 12:00 p.m. como se observa en el Anexo 2- 3. De la misma manera, se obtuvo el valor máximo de energía reactiva demandada por el sistema, el cual fue de 14,85 kVAR, con una potencia aparente cercana a los 32,1 kVA, como se muestra en los Anexo 2- 4 y 2.5 respectivamente.

Con la relación en el triángulo de potencia, se obtienen los valores de factor de potencia de desplazamiento en este punto, el cual se encuentra siempre por arriba de 0,9 en máxima demanda. Por lo anterior no es necesario corregir el factor de potencia en este punto. El factor de potencia por dispersión se muestra en el Anexo 2- 7, donde el valor decrece con respecto al de desplazamiento; sin embargo en algunas ocasiones se encuentra por debajo del 0,9, cuando la demanda de potencia es menor.

4.4.6) Energía

En términos de energía, se midió un consumo semanal cercano a los kWh, lo que dio como resultado un estimado mensual de 5384 kWh, total que representa un 3% de consumo total de la planta. La frecuencia en este punto presenta un valor promedio de 59,993 Hz, resultado que lo ubica dentro del límite establecido de 60±0.03 Hz en artículo 6 de la AR NT SUCAL 2015, para el 90% de las variaciones durante un periodo de 10 minutos, como se puede observar en el Anexo 2- 9.

4.4.7) Análisis armónico

4.4.7.1) Distorsión armónica de tensión

En este punto, la distorsión armónica de tensión es siempre menor al 3% recomendado, donde el valor de THD es cercano al 1,8 en las tres fases, con gran aporte principalmente de las armónicas de 5to y 11mo orden. El espectro de frecuencia y el perfil de THD de tensión registrado se muestran en los Anexo 2- 10 y 11.

4.4.7.2) Distorsión armónica de corriente

En el Anexo 2- 12 se muestra el espectro de frecuencia referente a la distorsión armónica total corriente, donde el valor de THD alcanza valores elevados en todas las fases, mayormente por aporte de la tercera armónica, por lo cual se tiene efecto por parte de las armónicas conocidas como armónicas “triples”.

Este tipo de armónicas, como se mencionó anteriormente, se produce principalmente por cargas monofásicas, tal cual está presente en esta medición, y se da bajo condiciones balanceadas de operación en cargas monofásicas no lineales. El neutro común de los tres circuitos monofásicos es portador de armónicos triples de secuencia cero, los cuales son aditivos en el conductor neutro.

Bajo condiciones de desbalance, el neutro común lleva corrientes comprendidas por las corrientes de secuencia positiva procedentes del desbalance del sistema, las corrientes de secuencia negativa procedentes del desbalance del sistema, y las corrientes aditivas de secuencia cero procedentes de los armónicos triples. Un conductor neutro común para tres circuitos ramales monofásicos, puede fácilmente sobrecargarse cuando alimenta cargas no lineales balanceadas o desbalanceadas.

En el diseño de las instalaciones se acostumbra a que el dimensionamiento del calibre del conductor neutro sea menor al calibre seleccionado para los conductores de fase; sin embargo, hoy en día y con la adición de gran cantidad de cargas no lineales en los sistemas eléctricos, como el caso actual, es recomendable que en el diseño se tenga al menos el mismo calibre para el conductor neutro, que para las fases. En este caso se recomienda realizar una medición de resistencia del conductor neutro actual para comprobar su estado y el estado de

su aislamiento por el constante estrés al que ha sido sometido por el tipo de armónicas que se registraron.

Las corrientes excesivas en el conductor neutro provocan caídas de voltajes mayores que los normales entre el conductor neutro y tierra en las tomas de 120 volts. Esto puede desestabilizar la operación del equipamiento electrónico sensible, tales como computadoras, que pueden requerir de un receptáculo de tierra aislado.

4.4.8) Mitigación de armónicos

Al tener un transformador estrella – estrella como conexión del sistema, se dice que dicho sistema es aislado y que, por tanto, las armónicas encontradas fluyen por la tierra, por lo cual no afectan aguas arriba en la instalación eléctrica; sin embargo, las cargas conectadas en el transformador, sí se verán afectadas por estas. En este caso, el transformador que se tiene no posee factor K, por lo cual puede cambiar por uno que sí lo sea; por ejemplo, un factor K-20 según lo recomendado en la **Tabla 7**. Factores K recomendados por aplicación.

4.4.1) Desbalance entre fases

El desbalance entre fases se encuentra por debajo del valor mínimo de 3%. Como se observa en el Anexo 2- 15, este es de 1,36% durante el 95% de las mediciones realizadas en un periodo de 10 minutos.

4.4.2) Parpadeo

El análisis de parpadeo en esta área es de importancia, puesto que es un área de oficina donde las personas trabajadores y colaboradoras deben estar en *confort* con su entorno, elemento que se ve afectado por el parpadeo. Para este análisis se tienen las mediciones del parpadeo en el Anexo 2- 16. Allí se leen los valores del parpadeo obtenidos para cada una de las fases, ya que como se mencionó, estos eventos son asimétricos, de manera que su comportamiento es diferente. De estos datos, el valor del 95% de estos debe de ser menor al 1%; en el caso de la fase A, se mantuvo en 0,434%; en la fase B se obtuvo un valor de 0,544%, y en la fase C un 0,446%, por lo que se concluye que no hay problemas por parpadeo, esto según el artículo 14 de la norma AR NT SUCAL 2015.

4.4.3) Curva ITIC-CBEMA

El análisis de la curva ITIC-CBEMA es mucho más representativa, debido a que en este punto de medición la mayoría de las cargas provienen de equipos de cómputo, principalmente de escritorio, o sea, no cuentan con una fuente de respaldo que puedan interrumpir su funcionamiento, lo que resulta en posible pérdida de información y daños de datos. El Anexo 2- 17 presenta la curva ITIC-CBEMA obtenida en la medición, y representa todos los eventos registrados.

En total fueron 38 eventos, de los cuales dos fueron interrupciones de tensión, otros dos sags y tuvieron una duración mayor a los 10 ciclos. Como se observa en la gráfica de la curva, estas interrupciones se encuentran en la región de interrupción sin daños a los equipos, los cuales resultan en interrupciones de los equipos. El primer sag se presenta a un 50% de la tensión nominal, lo cual es un nivel de tensión línea de 104 V, mientras que el siguiente fue una disminución de la tensión a aproximadamente un 12,5% de la tensión nominal de línea. Como se aprecia en la **Tabla 8**. Rangos de tolerancia de algunos equipos según IEEE Std 1346-1998, para los equipos de cómputo el rango inferior es del 50% de la tensión nominal durante 70 milisegundos, por lo cual ambos eventos registrados entran en la categoría fuera de tolerancia. Se recomienda, entonces, que todos estos computadores se encuentren conectados a los circuitos de UPS existentes, ya que aparte de dar respaldo a esta, mantiene los niveles de tensión constantes. En la visita al lugar, se constató que algunos se encuentran conectados a estos y otros no, por lo cual se pueden reorganizar las conexiones y priorizar los equipos críticos.

4.4.4) Registros de sag e interrupciones

Los Anexo 2- 18, 2-19 y 2-21 presentan en la gráfica de la forma de onda la interrupción sucedida el 28 de abril de 2018 en fase C, además del sag presente en las otras dos fases y el cómo este afecta los niveles de corriente presentes en el sistema, de forma que aumentan a valores mayores como respuesta del sistema.

Finalmente, en el Anexo 2- 23 se presenta la forma de onda de corriente registrada para esta medición, en la cual se puede observar la distorsión armónica característica de rectificadores de cuatro pulsos, característicos de cargas monofásicas, causantes de que las ordenadas de 3er y 5to orden sean las más representativas en este caso.

4.5) Medición en chiller

4.5.1) Metodología de la medición

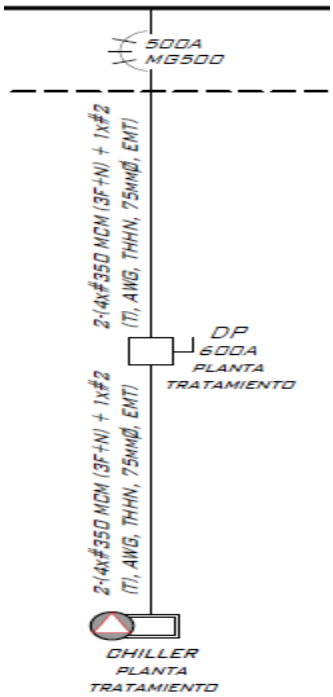
La tercera medición se realizó en el ramal que alimenta la carga de chiller, debido a que esta es una de las cargas más representativas en cuanto a carga de la instalación eléctrica del Laboratorios Stein. Si bien es cierto la demanda nominal del chiller en datos de placa es de 225 kW, la potencia real máxima demandada fue de 161 kW, según la medición realizada

Esta medición se hizo mediante el mismo equipo Fluke 435-II, durante el periodo equivalente a una semana, lo cual son 168 horas de medición, tomando un total de 10080 datos de registro de las diferentes variables eléctricas necesarias en un estudio de calidad de energía, y se realizó durante la semana del 4 al 11 de mayo de 2018.

4.5.2) Punto de medición

El punto de medición descrito se realizó en la subestación, en el ramal que alimenta el chiller, tal como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Figura 30.Punto de medición tresen chiller



Fuente: Elaboración propia

Figura 31.Donas de medición de corriente conectados en el ramal de chiller en subestación

Fuente: Elaboración propia

4.5.3) Perfil de tensión

En el Anexo 3-1 se observan las gráficas de tensión para cada una de las tres líneas que alimentan el chiller. Estas mantuvieron un valor bastante constante y cercano a los 480 V; sin embargo, se registraron los valores mínimos y máximos para ser evaluados según lo establece la Tabla 11. En la fase A se obtuvo un valor mínimo 412,36 V y máximo de 479,6 V. El valor mínimo está, a su vez, por debajo del mínimo establecido de 440 V establecido. En la fase B se registró un valor mínimo de 400, 7 V y máximo de 483,16 V, lo que de nuevo arroja que el valor mínimo se encuentra por debajo del mínimo tolerable por la norma. Finalmente, en la fase C los valores mínimos y máximos fueron de 451,52 V y 485,74 V respectivamente. El valor mínimo bajo, pero dentro del rango tolerable.

4.5.4) Mitigación variaciones de tensión

Como se ha venido mencionando, el problema principal de caídas de tensión en la alimentación del sistema por parte de compañía distribuidora es notable; razón por la cual se debe notificar a esta para que tome las acciones necesarias. Ahora, como se propuso en la medición realizada en el principal, se propone una UPS de 500 kVA que soporte toda la carga conectada, y que se realice la corrección de las variaciones de tensión a la entrada del servicio, para de esta manera no depender de la corrección de compañía.

4.5.5) Perfil de corriente

En el Anexo 3.2, por su parte, se muestran los valores de corriente registrados de igual manera para las tres fases del ramal alimentador, donde se registró una corriente máxima de aproximadamente 247,3 A en la fase C, a la 1:00 p.m. del día 6 de mayo de 2018, luego de una desconexión del chiller para un mantenimiento correctivo. El valor promedio de corriente demandada por este es de aproximadamente 155 A.

4.5.6) Potencia real, reactiva, aparente y factor de potencia

El perfil de la demanda real por parte del chiller se encuentra en el Anexo 3.3, y en este se puede observar el mismo perfil que la carga, donde la demanda máxima se da en horarios cercanos al mediodía que es cuando las temperaturas obligan a que el sistema de climatización trabaje más arduamente. El pico de potencia real es de 161 kW, cuyo promedio se encuentra en valores cercanos a los 95 kW. La demanda de potencia reactiva para este sistema se puede observar en el Anexo 3.4 donde se necesitan cerca de 30 kVAR por los elementos para su magnetización. Además, se registra una potencia aparente de 113 kVA para estos casos. Lo anterior conlleva a un factor de potencia de desplazamiento de 0,94 en demanda máxima, sin tomar en cuenta el factor de distorsión, el cual en este caso llega a obtener valores en demanda máxima de 0,85. Dichos valores se observan en los Anexos 3-6 y 3-7.

4.5.7) Energía

El consumo de energía semanal por parte del chiller es de 4300 kWh, lo cual representa por mes un estimado de 17200 kWh, que representa 10% de la instalación, y lo convierte en una de las cargas individuales más importantes. De igual manera, como se observa en el Anexo 3-8, la frecuencia registrada se mantiene en todo momento dentro de los parámetros de valor establecidos: su variación no puede ser mayor al ±0,03 el 95% del tiempo de las mediciones tomadas.

4.5.8) Análisis armónico

4.5.8.1) Distorsión armónica de tensión

Seguidamente, se presenta el análisis de armónicas de este punto; para ello, es preciso anotar que valores de distorsión armónica total de tensión se mantienen en todo momento menor al 5% recomendado en AR NT SUCAL 2015.

4.5.8.2) Distorsión armónica de corriente

Se registraron valores de THD de corriente altos, como se observa en el Anexo 3-11, al aplicar la división a la sumatoria mediante el valor máximo de corriente, se tiene que el TDD para cada una de las fases, sigue siendo mayor a 15%, cuando este valor debe estar por debajo de 4%. Al observar el espectro se muestra que las ordenadas de mayor contribución son la 5ta y la 7ma, normal de una carga trifásica.

4.5.9) Mitigación de armónicos

Para la mitigación de armónicos en el análisis de la medición en el principal, se propuso un filtro sintonizado en la subestación como solución centralizada, para que elimine de la 5ta armónica en adelante, por lo cual las armónicas provenientes de este sistema estarían siendo filtradas por este.

4.5.10) Desbalance entre fases

El desbalance entre fases es de igual manera menor al 3% recomendado, pues la mayoría de las mediciones presentan un desbalance del 1,44% para estas. Por su parte, el análisis de parpadeo en este punto no es de interés, puesto que son pocas las personas que se encuentran constantemente en este, además de que la medición no presentó valores mayores al 1% en ninguna de las fases durante el 95% de las mediciones, como se establece en el artículo 14 de la norma AR NT SUCAL 2015.

4.5.11) Curva ITIC-CBEMA

En la presentación de la curva ITIC-CBEMA en el Anexo 3-14, se presentan únicamente tres eventos, de los cuales solo uno de estos se encuentra en la región de interrupción, pero no daño de los equipos electrónicamente sensibles con una tensión fase neutro de un 50%, con un valor de 138,5 V, el cual puede afectar los componentes de control

del sistema de enfriamiento del chiller. Además, se presentan registros de sags y armónicos manifiestos en las formas de onda de tensión y corriente respectivamente durante la medición de este punto.

4.6) Puesta a tierra

El análisis del sistema de puesta a tierra se llevó a cabo mediante la evaluación visual de la existencia de los conductores de puesta a tierra y sus calibres, así como del correcto aterrizamiento de carcazas de equipos. Como lo denomina la IEEE, la puesta a tierra es una conexión intencional o accidental, por medio de la cual un circuito o equipo eléctrico, se conecta a la tierra o cuerpo conductor relativamente grande que equivale a esta.

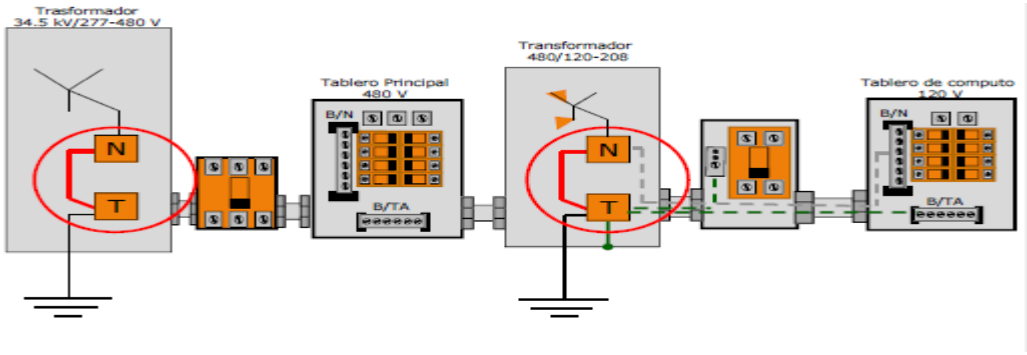
El Código Eléctrico Nacional, en el artículo 250, hace referencia al requisito de un sistema de puesta a tierra en las instalaciones eléctricas. En el tema que concierne a calidad de energía, se busca que un sistema de puesta a tierra garantice la operación de las protecciones y dispositivos de sobre corriente durante una falla a tierra, que puedan afectar los equipos eléctricos dentro de la instalación y que además ayude a disipar las corrientes referentes a fenómenos atmosféricos que puedan afectar la red de la empresa.

4.6.1) Evaluación de calibres y conexiones de tierra

El análisis de los calibres de puesta a tierra se llevó a cabo con base en lo recomendado por el NEC y expuesto en la Tabla 250.122 – Calibre mínimo de conductores de puesta a tierra de equipos para puesta a tierra de canalizaciones y equipos, donde la mayoría de estos cumplen con lo establecido; sin embargo, se encuentran algunos que deben de ser analizados y reemplazados. Estos se señalaron en el unifilar de análisis de conductores de puesta a tierra, en el Anexo 5, será fin de que fueran analizados con el ingeniero a cargo.

Además, se verificó el artículo 250.30 del NEC, el cual trata sobre el aterrizamiento separado de sistemas de corriente alterna derivados, en el que se especifica que para estos puntos debe existir una conexión física entre el neutro y la tierra llamada popularmente “bonding” y que se encuentre entre el X0 y la tierra en los trasformadores secos del sistema, mediante la medición de tensión entre estos dos puntos siendo de 0 V.

Figura 32. Ejemplo de conexión de puesta a tierra

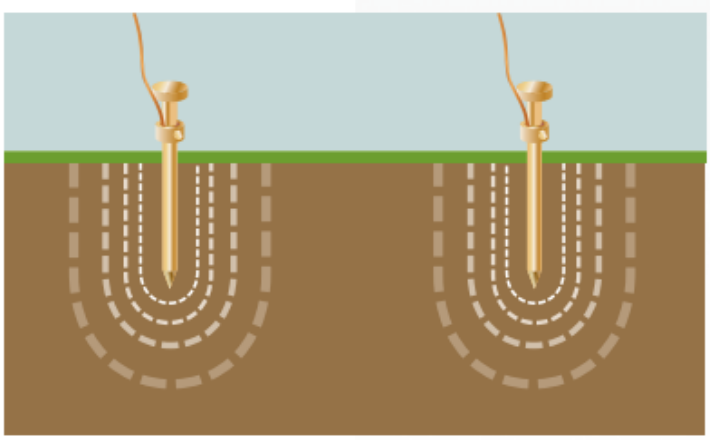


Fuente: Handbook NEC (2008)

4.6.2) Medición de la malla de tierras

La medición de la malla a tierra de la planta se realizó con el equipo Fluke 1625 Earth / Ground Tester. Los sistemas de puesta a tierra simples constan de únicamente un electrodo de puesta a tierra; sin embargo, los sistemas más complejos como el existente en Laboratorios Stein, constan de varias varillas de puesta a tierra interconectadas entre sí, formando una malla o red. Estos sistemas aumentan drásticamente la cantidad de contacto del sistema con la tierra circundante, lo que disminuye el valor de esta resistencia. En este tipo de diseño, las varillas de puesta a tierra enterradas se conectan en paralelo, con un espaciado de al menos la distancia de hundimiento de la varilla para que sus esferas de influencia no se superpongan. A continuación, se ofrece un ejemplo:

Figura 33. Esferas de influencia de los electrodos de puesta a tierra



Fuente: Fluke (s.f.)

El sistema de electrodos de puesta a tierra de Laboratorios Stein se conforma de cuatro electrodos de cobre interconectados entre sí, con unión al sistema en el X0 del trasformador de pedestal principal de la planta.

Figura 34. Interconexión de la malla con el sistema de puesta a tierra

Fuente: Elaboración propia

Con esto en cuenta, el método de medición utilizado fue la medición sin picas, debido a la imposibilidad que presenta el terreno de insertarlas en la tierra. El uso de las dos pinzas sucede porque una de estas es una pinza que induce una tensión en el conductor de tierra, mientras que la segunda pinza mide la corriente correspondiente resultante del bucle de tierra.

Al realizarse esta medición, se debe tomar en cuenta que en un sistema de tierras en una instalación TN-S como el que se tiene, en donde el conductor de neutro N y el de protección PE están unidos solamente en el punto de anclaje a tierra del sistema eléctrico, y de este punto en adelante viajan independientes por la instalación, la medición que se obtiene es en realidad un lazo que incluye las resistencia de los electrodos, conductor de tierra, el borne principal de tierra, el conductor de protección de la instalación y la conexión de tierra a neutro de la instalación, lo cual influye en que se puedan obtener valores de resistencia

bajos. Otro factor que influye si se obtienen valores bajos de resistencia es debido a la interacción con otros electrodos cercanos, tuberías de agua enterrada, entre otros.

Por ello, si se obtiene un valor sumamente elevado, se concluye que existe una conexión abierta o incorrecta entre dos o más elementos del sistema de puesta a tierra. En nuestro caso, la medición obtuvo un valor de 0,112 Ω en tres mediciones realizadas, valor menor a los 25 Ω que se recomienda en IEEE Std 80 para baja tensión. El valor es bajo debido a los factores anteriormente mencionados. Se recomienda realizar una medición en cada uno de los electrodos individuales para comprobar este valor.

Figura 35. Valor de medición de resistencia de puesta a tierra

Fuente: Elaboración propia

4.7) Costo económico por mala calidad de energía

En Costa Rica, los estudios de calidad de energía son muy poco usuales, y pocas empresas cuentan con el equipo adecuado para hacerlo o bien, no contratan el servicio por el costo que este representa; no obstante, si se realiza un análisis más profundo dentro de la actividad de mantenimiento y evaluación dentro de la empresa, dicho costo se puede justificar fácilmente.

La principal razón de estos estudios es evitar una mala operación, falla o interrupción que ponga en grave riesgo una vida humana, además el costo por paros de producción, reemplazo de equipo, mano de obra, entre otros necesarios para corregir cuando se presenta una falla. En IEEE Std 446, se presenta un modelo de especificación de costos para eventos que incluyan una mala calidad de energía. Este modelo se propone en Laboratorios Stein para llevar un control y poder justificar las inversiones a realizar, para corregir los problemas por calidad de energía.

Tabla 20. Control de costos por mala calidad de energía

Número de empleados afectados		Empleados
Salario base por hora de empleados afectados		$/hora
Salario tiempo extra de los empleados afectados		$
Duración de la interrupción en horas por evento		hora(s)
Unidades de desperdicio debido a la interrupción		unidades
Costo por unidad de desperdicio por evento		$/unidad desperdiciada
Tiempo de arranque		hora(s)
Empleados involucrados en el arranque		Empleados
Unidades de desperdicio en el arranque		Unidades/desperdiciadas
Costo de mano de obra de trabajadores afectados		$
Costo de desperdicio de materia prima		$
Costo del arranque		$
Costo total de la interrupción de producción		$
Costo del equipo dañado		$
Costo para reestablecer el servicio de energía		$
Costo total por el evento		$

Fuente: IEEE Std 446 (1998, p.8)

5) Capítulo 5 – Conclusiones y Recomendaciones

Con la investigación realizada en las diferentes fuentes bibliográficas, tanto normas nacionales, como internacionales, literatura y recomendaciones de fabricantes, se obtiene un conocimiento pleno del tema de calidad de energía, que permite obtener los criterios necesarios para la evaluación, comparación y discusión de los resultados obtenidos del estudio de calidad de energía realizado en la empresa Laboratorios Stein en Cartago, Costa Rica del cual se obtienen las siguientes conclusiones.

- Mediante la instalación del equipo de medición de calidad de energía y evaluación visual de elementos en los tres puntos de medición seleccionados según importancia, se logró obtener una caracterización clara de la calidad de la energía con la que se trabaja en Laboratorios Stein, con base a los límites establecidos por la norma AR NT SUCAL 2015 de ARESEP, como de las recomendaciones de IEEE con respecto a los diferentes eventos.
- Se registró en todas las mediciones un evidente problema relacionado con los valores de tensión suministrados por parte de la compañía distribuidora, en este caso JASEC, donde se registran valores de tensión para todas las mediciones que estuvieron por debajo de incluso el valor mínimo del rango tolerable establecido por la ARESEP, además de los diferentes sags registrados, lo que confirma las mediciones realizada anteriormente. Ante esto, se realizó el correspondiente reclamo a JASEC para la corrección de la situación en un plazo de tres meses.
- Se obtuvo el contenido armónico de corriente dentro de las mediciones para las tres mediciones, puesto que en todos los casos se obtuvo un valor de TDD alto, principalmente por aporte de armónicas de 5to y 7mo orden proveniente de rectificadores de seis pulsos, característicos de equipo electrónico de potencia como variadores de frecuencia utilizados en producción.
- Se propuso para los problemas descritos su correspondiente método de mitigación: la instalación de una UPS a la entrada del servicio vería anticipadamente las variaciones en los niveles de tensión provenientes del sistema de distribución, lo que mantendría constantes los valores de tensión. Otra propuesta es la instalación de un filtro sintonizado como método centralizado de mitigación de armónicas, además de que

realizara una acción compensadora de factor de potencia que la lleve a un valor deseado de 0,98, a fin de ayudar con la eficiencia energética de funcionamiento de los equipos. Además, se propone la instalación de dispositivos de supresión de transitorios, aunque no se hayan registrado estos eventos, a nivel de tableros de distribución de cargas electrónicamente sensibles, según ANSI/IEEE C62.41, pues deben ser categoría B para estas localizaciones y categoría A para las cargas puntuales de computadoras, cámaras de seguridad, entre otras.

- Para cada uno de los puntos de medición, se registraron los fenómenos y eventos relacionados con el tema de calidad de energía, y se mostró para cada uno de estos los parámetros de cumplimiento mínimos que deben existir, por lo cual se toma como base para la evaluación de los estudios de calidad de energía de Energética Soluciones y Consultoría IAC.

Recomendaciones

- Realizar un estudio actualizado de cortocircuito y de arco eléctrico, con el fin de que en caso de falla se protejan lo equipos de la mejor manera posible.
- Llevar control del costo de la mala calidad de energía, mediante la tabla propuesta, de manera que sea fácil de justificar las inversiones para mejorar los aspectos de calidad de energía que se encuentran afectando.
- Realizar una medición separada del sistema de puesta a tierra.

6) Referencias bibliográficas

ARESEP. (2015). Supervisión de la calidad del suministro eléctrico en baja y media tensión. San José: ARESEP.

Barguil, L. G. (2016). Calidad de la Energía Eléctrica. San José: Universidad de Costa Rica.

CNFL (s.f.). Tensiones transitorias Boletín informativo. San José, Costa Rica.

Fluke Corporation (2008). Fluke 435 User's Manual. Three Phase Power Quality Analyzer. Holanda

IEEE. (1992). IEEE 519 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. New York: IEEE.

IEEE. (2009). IEEE 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York: IEEE.

IEEE. (1998). IEEE 1346 Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment. New York: IEEE.

IEEE. (2005). IEEE 1100 Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. New York: IEEE.

IEEE. (1995). IEEE 466 Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. New York: IEEE.

IEEE. (2015). IEEE 1453 Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installations on Power Systems. New York: IEEE.

Conrad, L. Litte, K. and Grigg, C. (1991), "Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault-Clearing Voltage Dips", IEEE Trans. on Industry Applications. New York.

McGranaghan, M. (s.f.) Active Filter Design and Specification for Control of Harmonics in Industrial and Commercial Facilities. Knoxville, Tennessee

Melhorn, C, McGranaghan, M (s.f.) Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements. Knoxville, Tennessee.

National Fire Protection Association. (2008). National Electrical Code. Minnesotta: International Codes and Standards Organization.

Pacheco, L. Bernardo, J. Mercado, V. (2015) Influencia De Los Sistemas De Puesta A Tierra En La Calidad De La Energía Eléctrica. Universidad del Oriente, Venezuela.

Richard, P. (s.f.) Power Quality Starts at the Load. New Jersey, Estados Unidos.

Richard, P (1998) SAGs and SWELLs. New Jersey, Estados Unidos.

Sabin, D. McGranaghan, M (s.f.) A Systems Approach to Power Quality Monitoring for Performance Assessment. Knoxville, Tennessee

Schneider Electric. (2004). Cuaderno técnico 199 La Calidad de la Energía Eléctrica. Colombia: Schneider Electric.

Tellez, E. (s.f.) Programa De Ahorro De Energía, Calidad De La Energía, AP&C. Bellavista, Colombia.

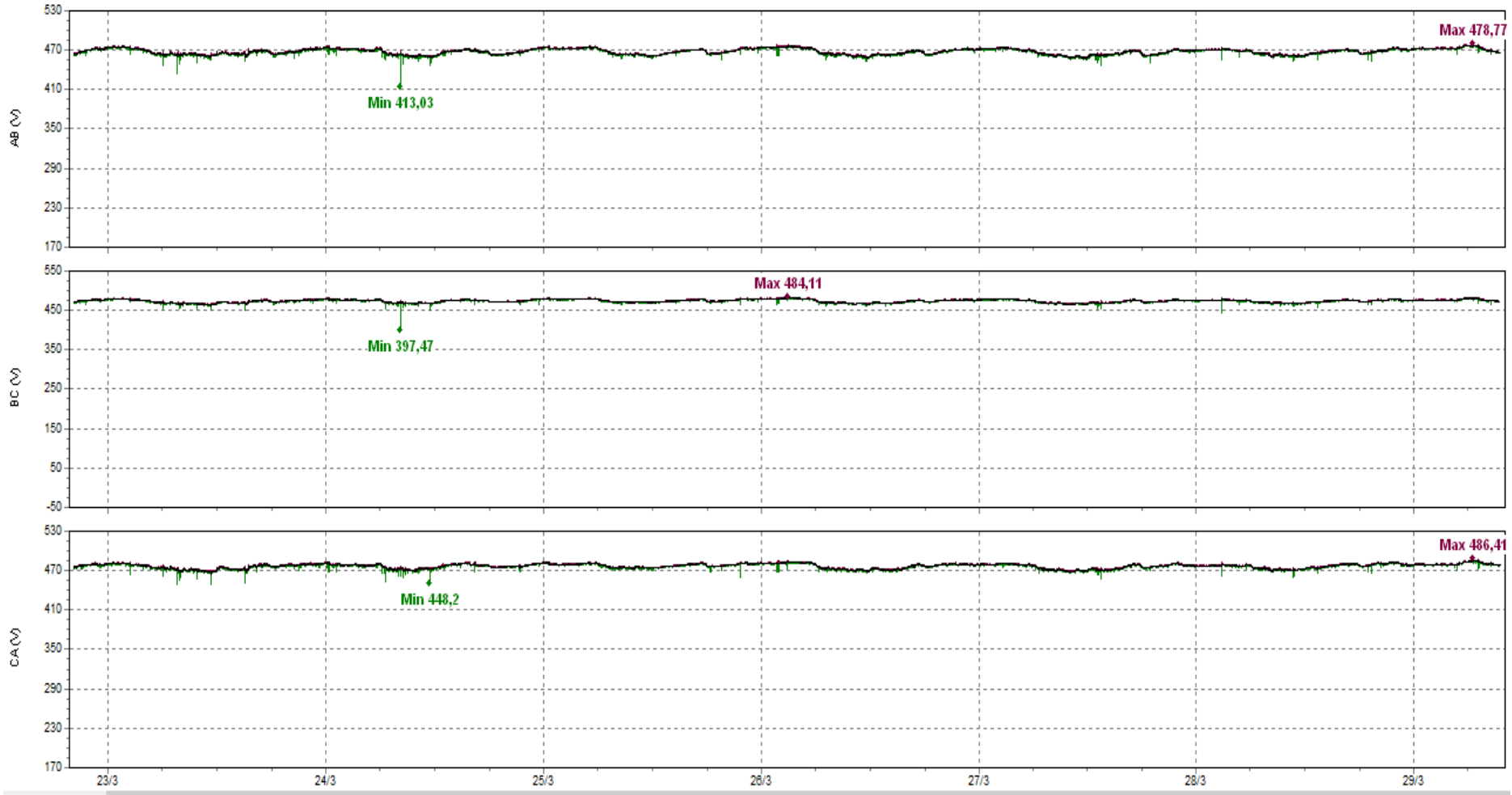
Turan Gonen. “Electrical Power Distribution System Engineering”. Mc. Graw Hill Inc.

7) Anexos 1

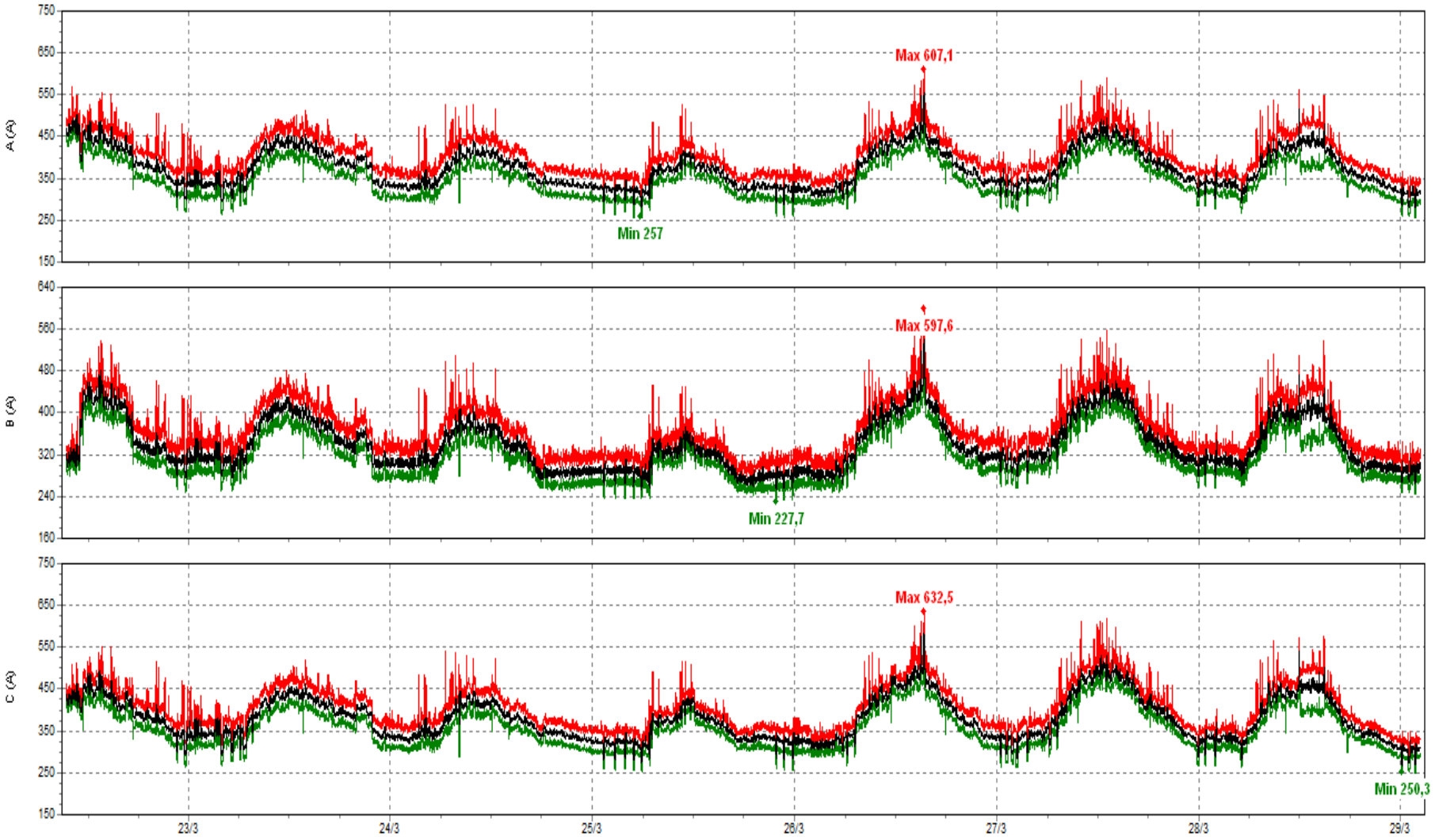
Mediciones calidad de energía en el PPL

Cartago, 2018

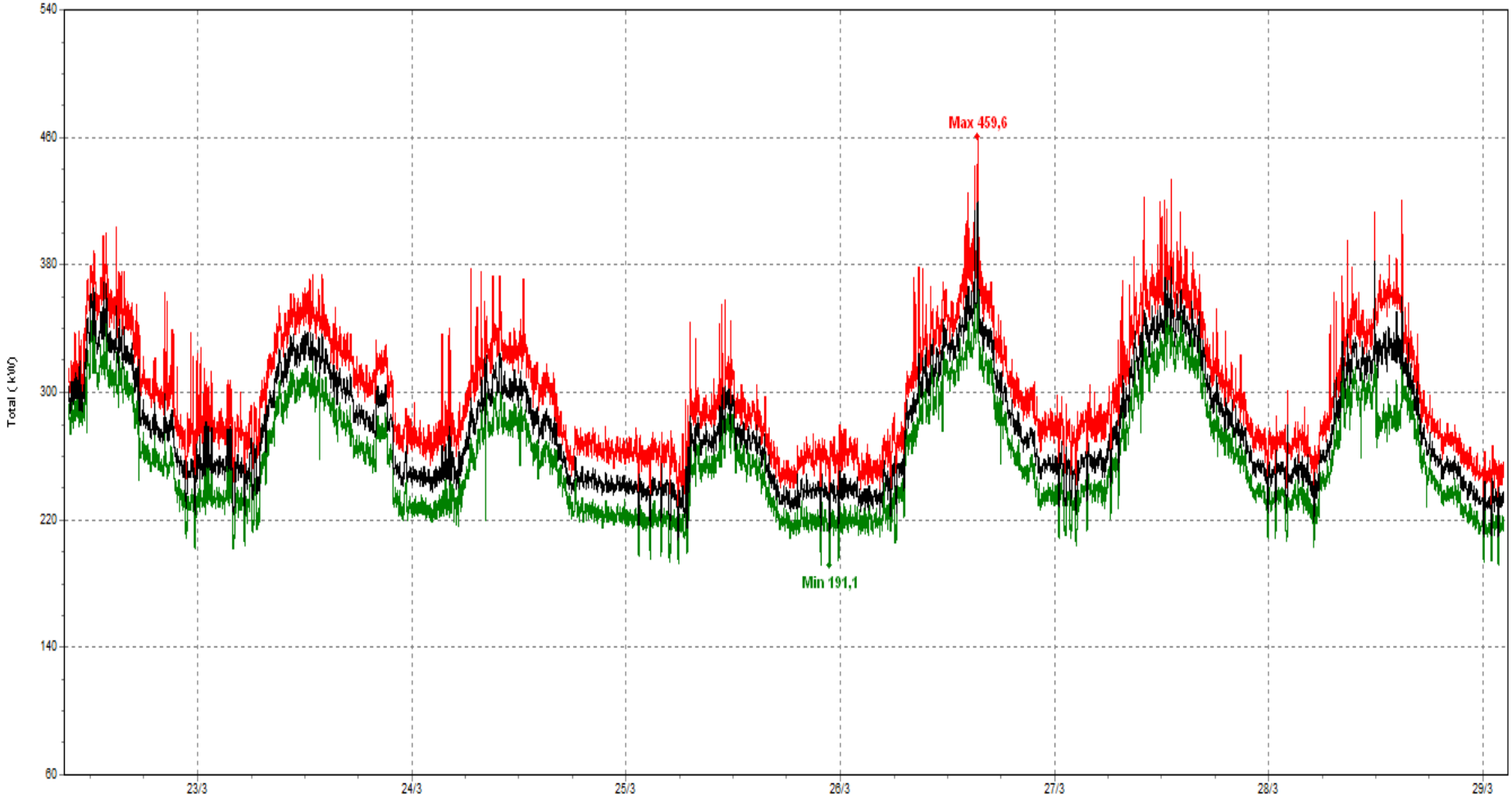
Anexo 1-1. Valores de tensión de las tres fases



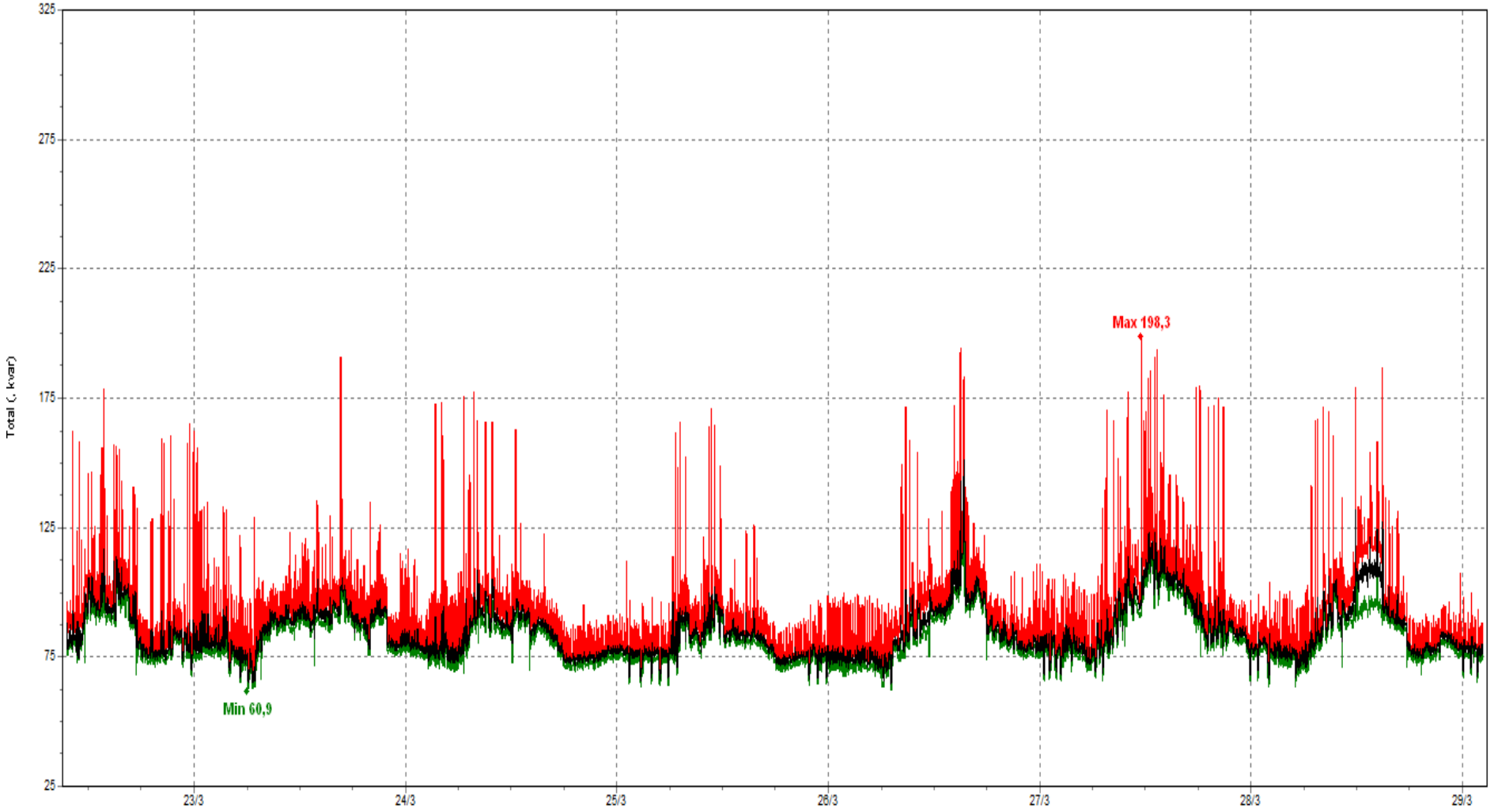
Anexo 1-2. Valores de corriente registrados para las tres fases



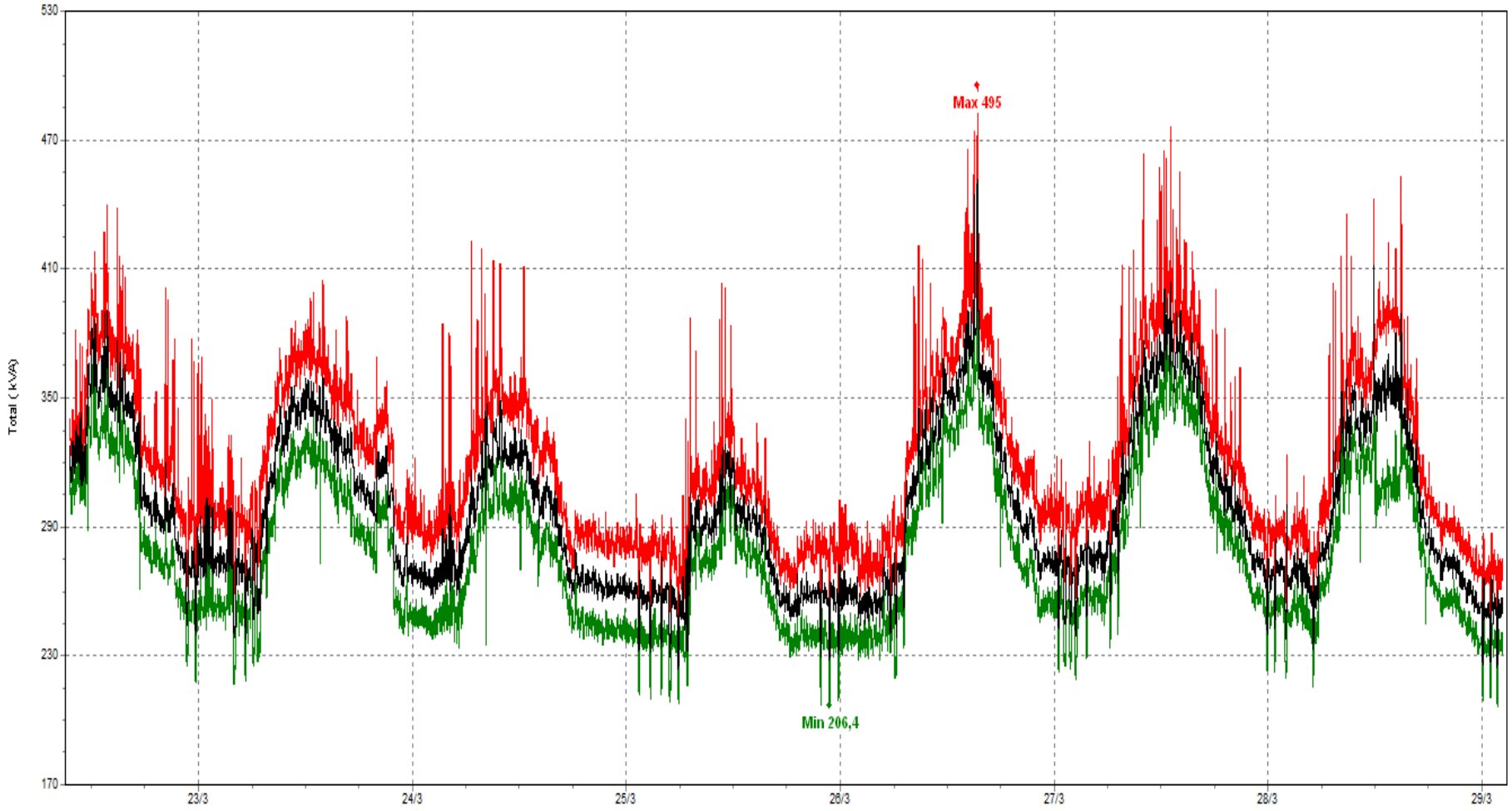
Anexo 1-3. Potencia real registrada



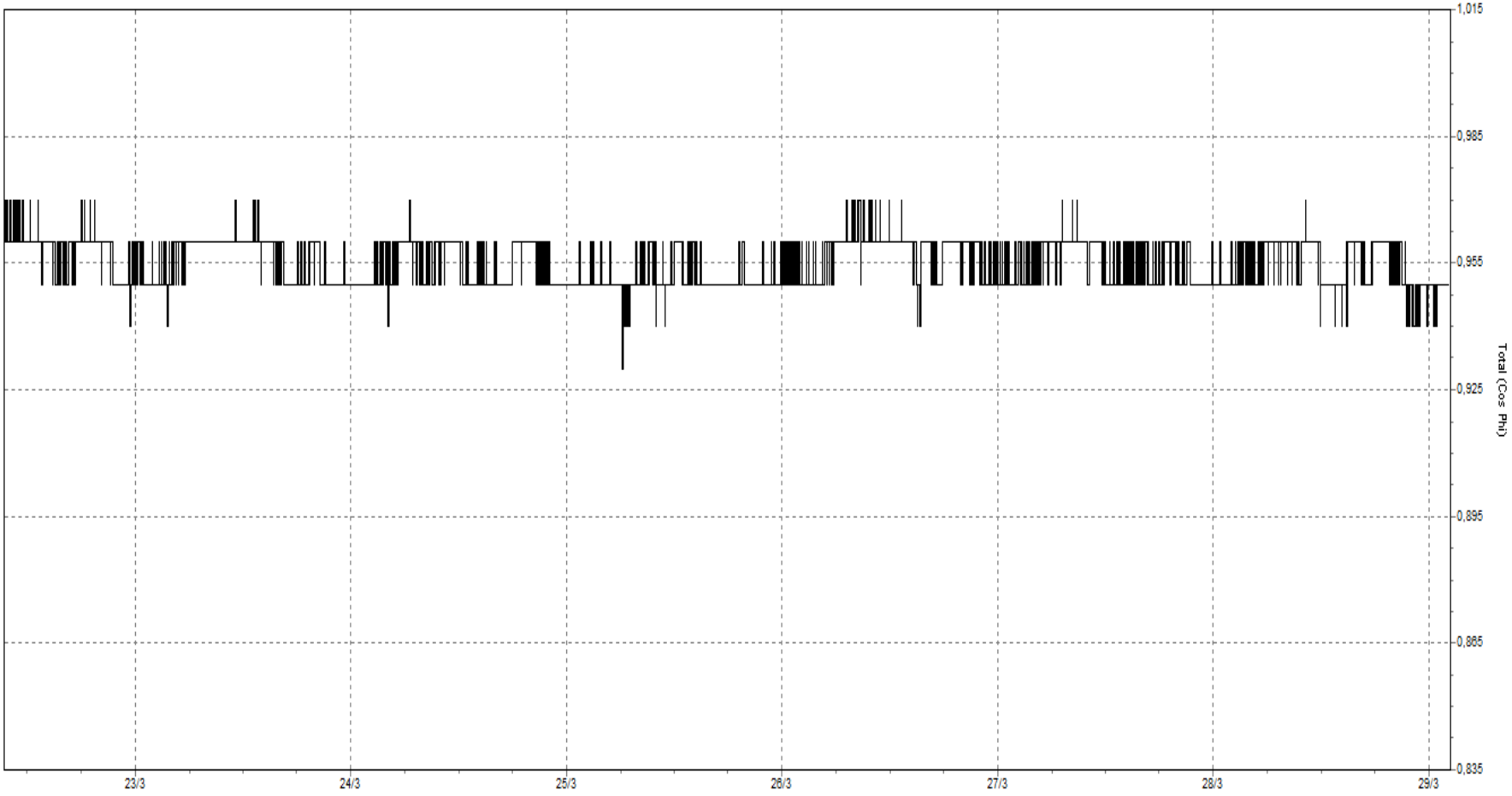
Anexo 1-4. Potencia reactiva



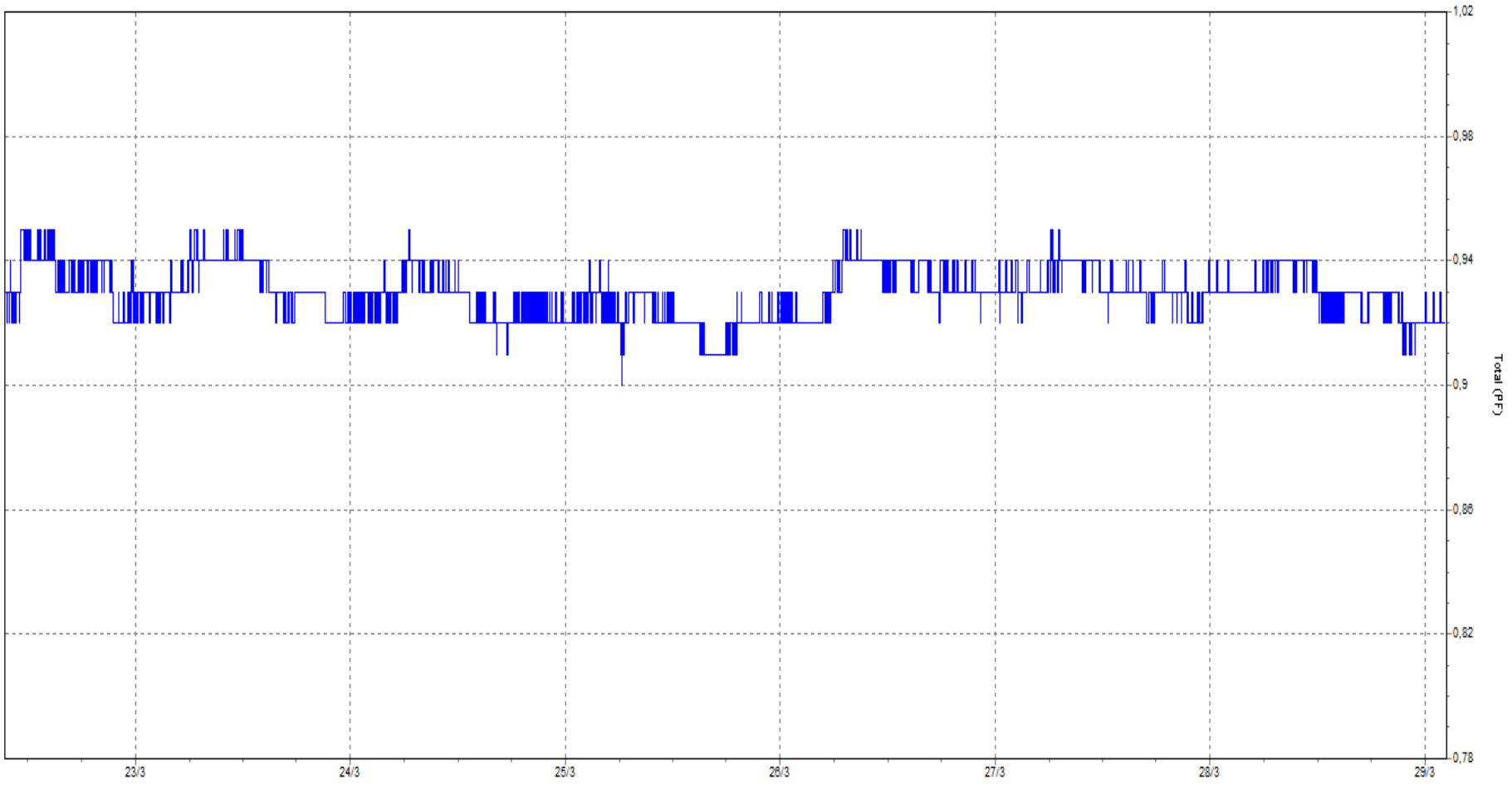
Anexo 1-5. Potencia aparente



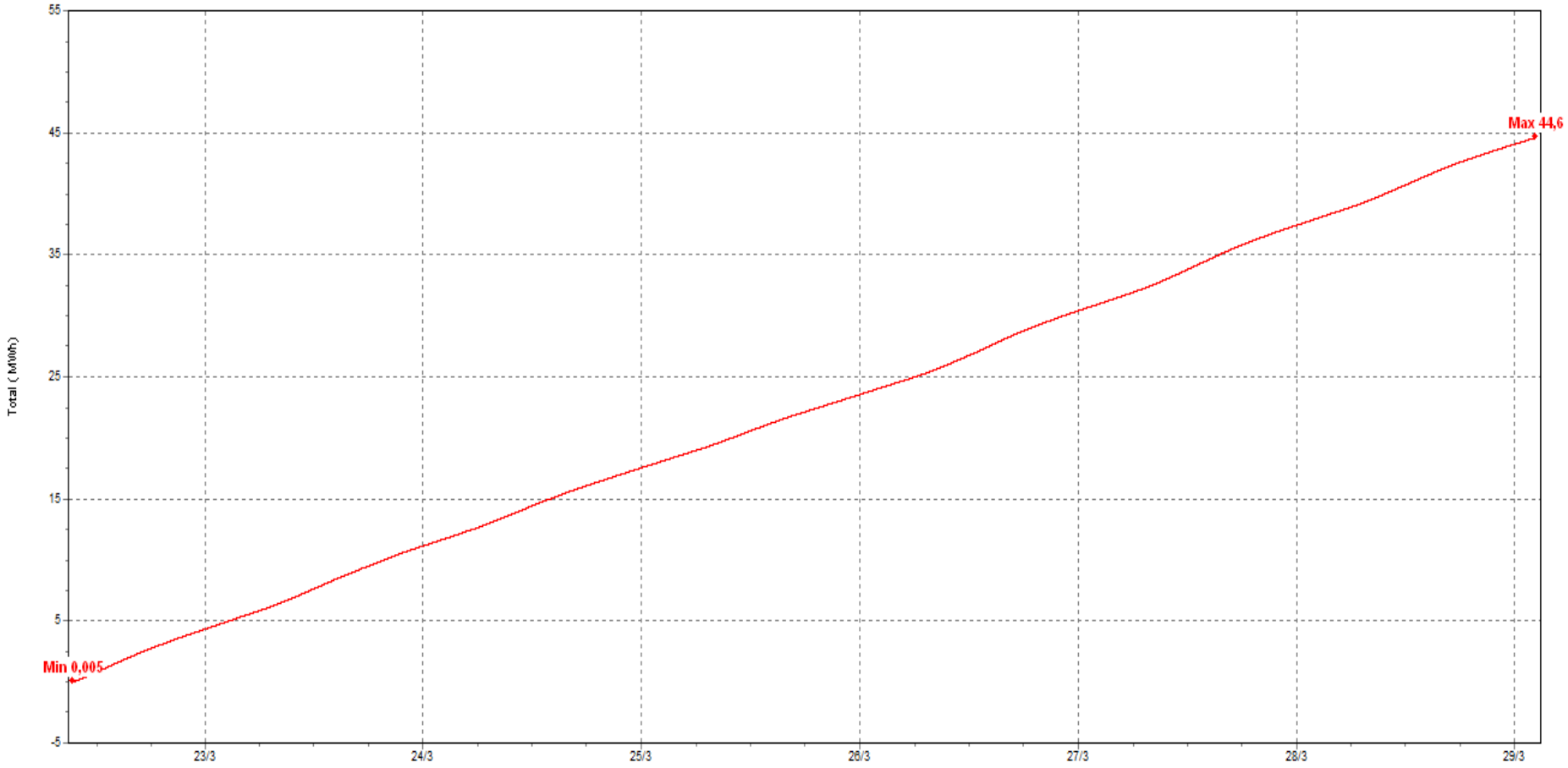
Anexo 1-6. Factor de potencia de desplazamiento



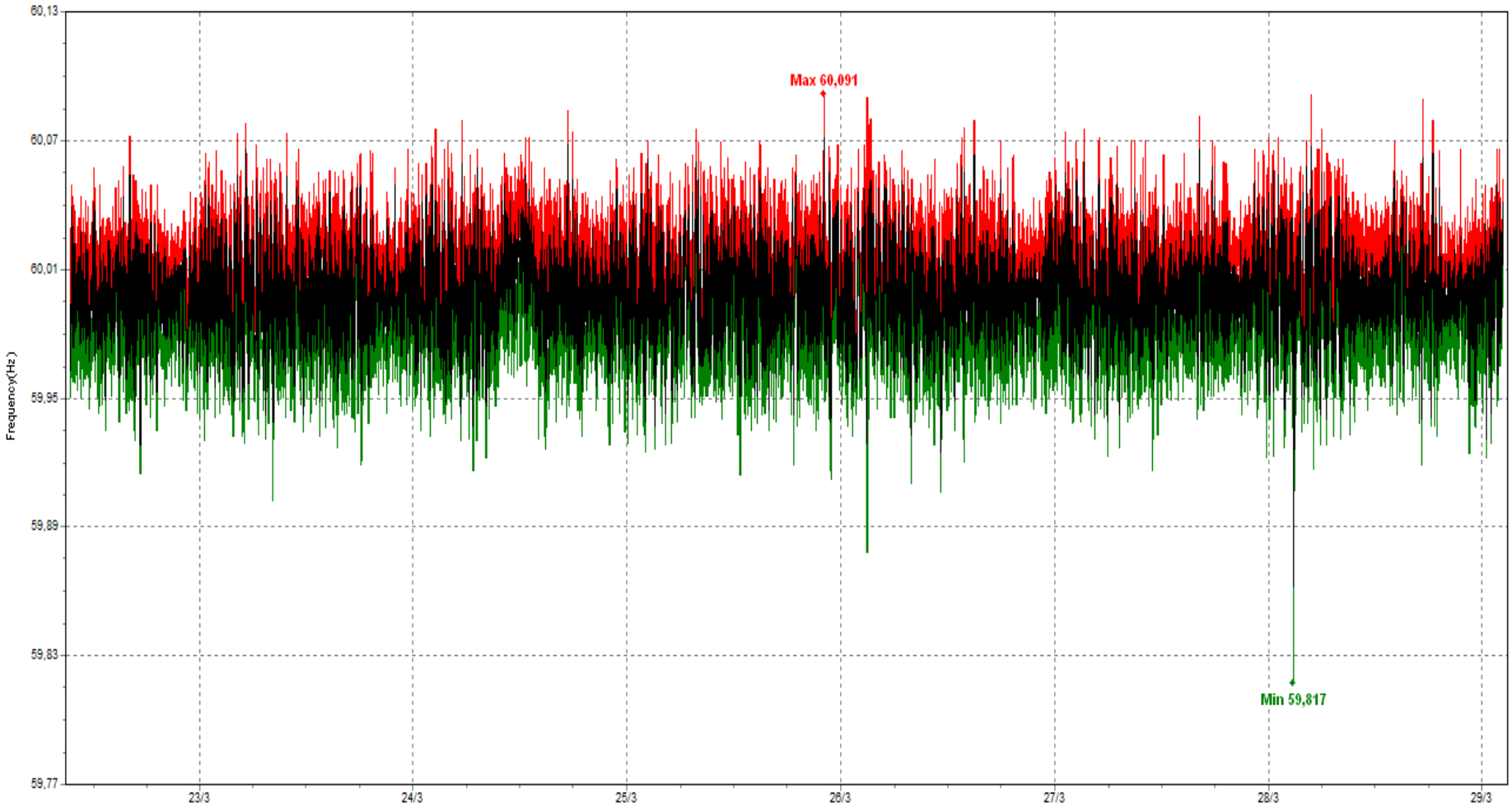
Anexo 1-7. Factor de potencia con factor de distorsión



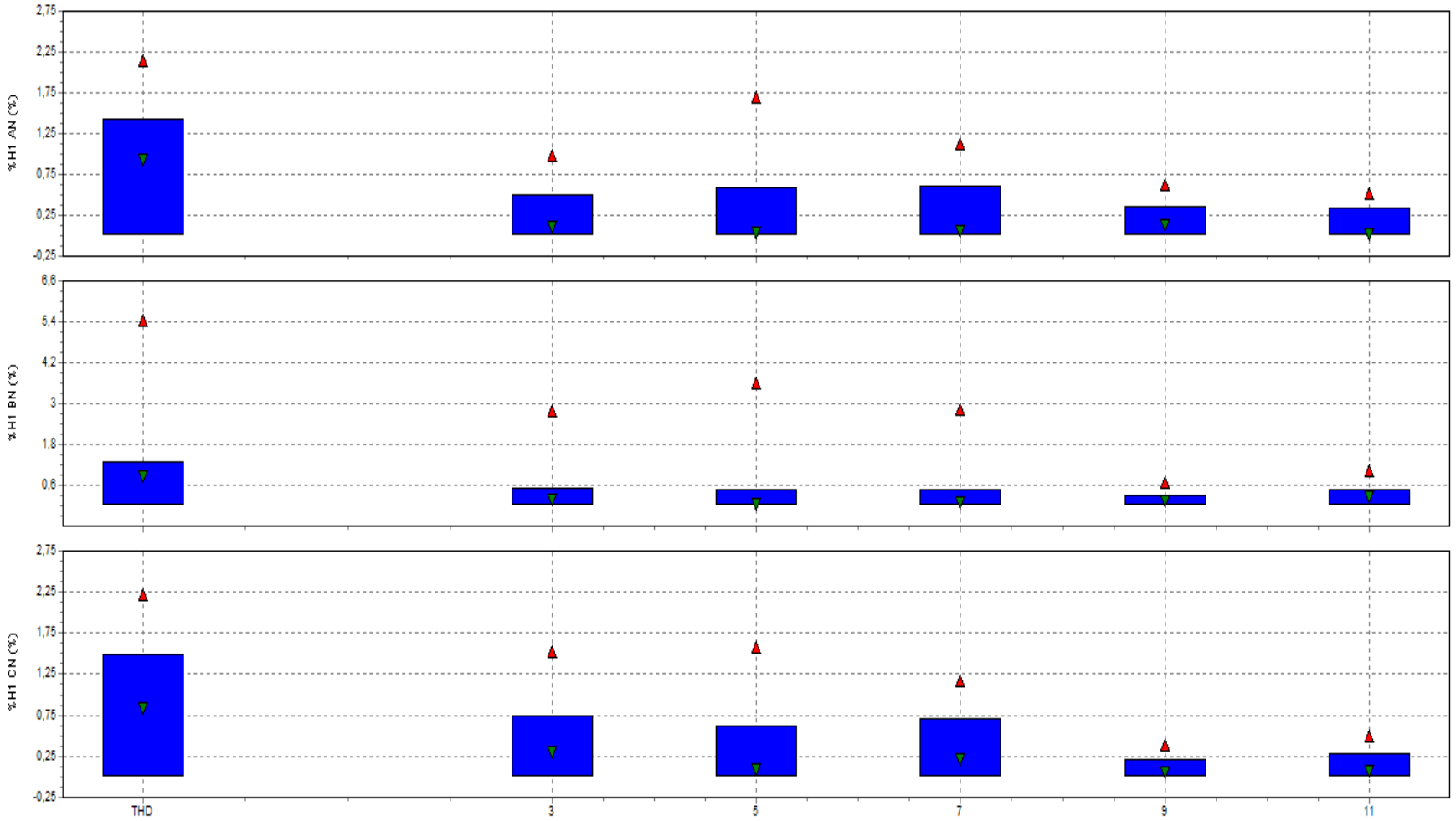
Anexo 1-8. Energía consumida durante el periodo de medición



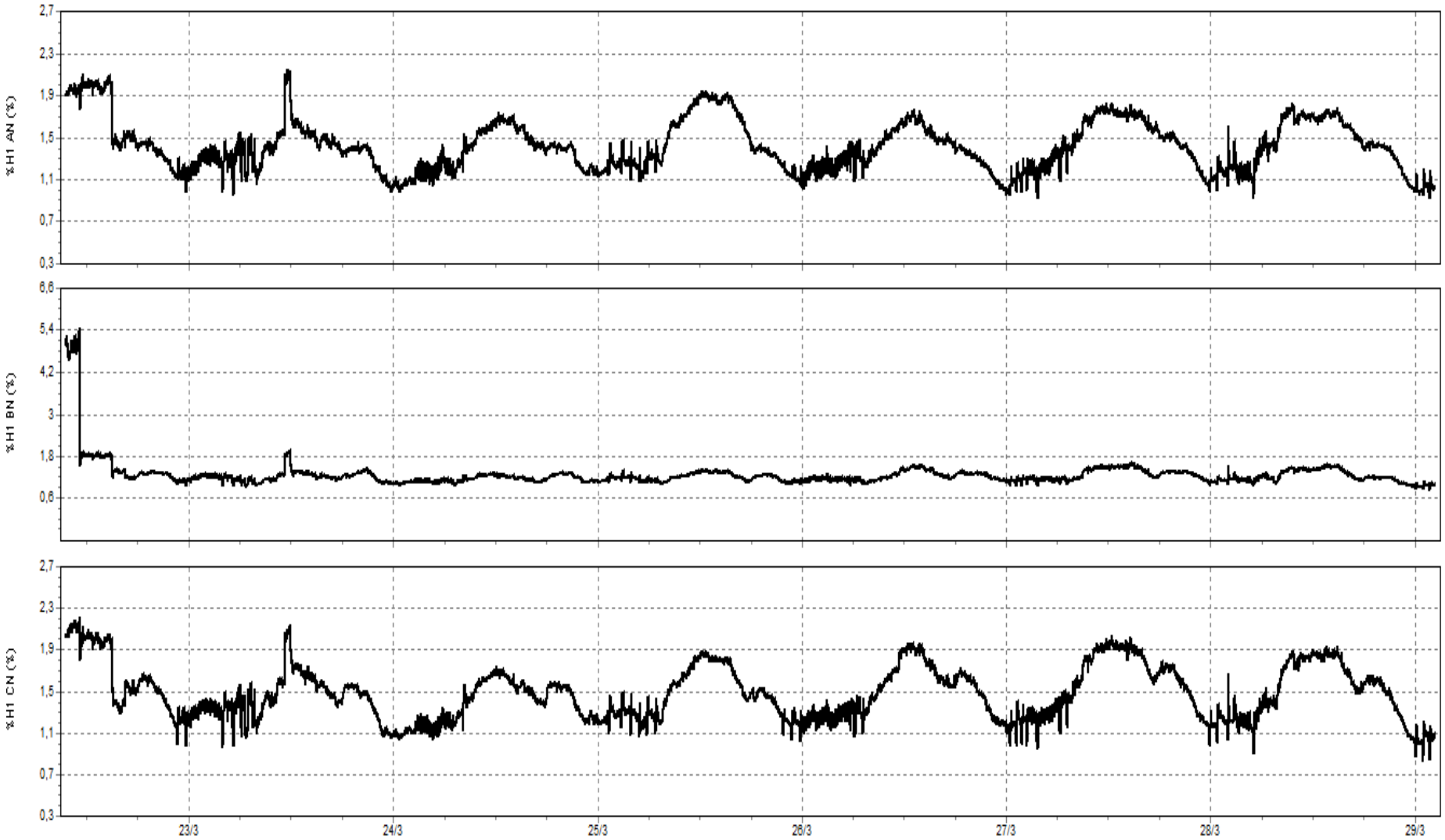
Anexo 1-9. Frecuencia



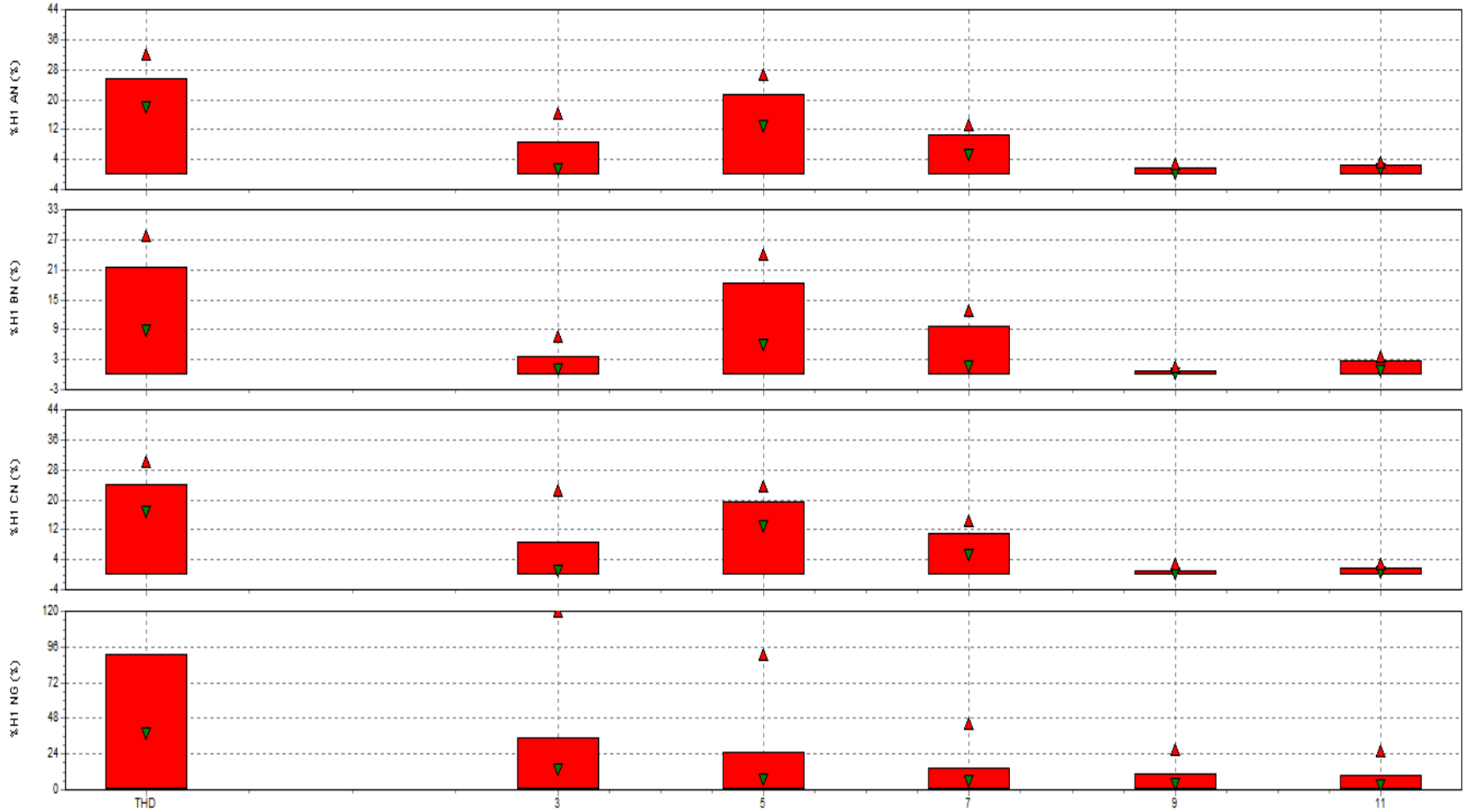
Anexo 1-10. Distorsión armónica de tensión



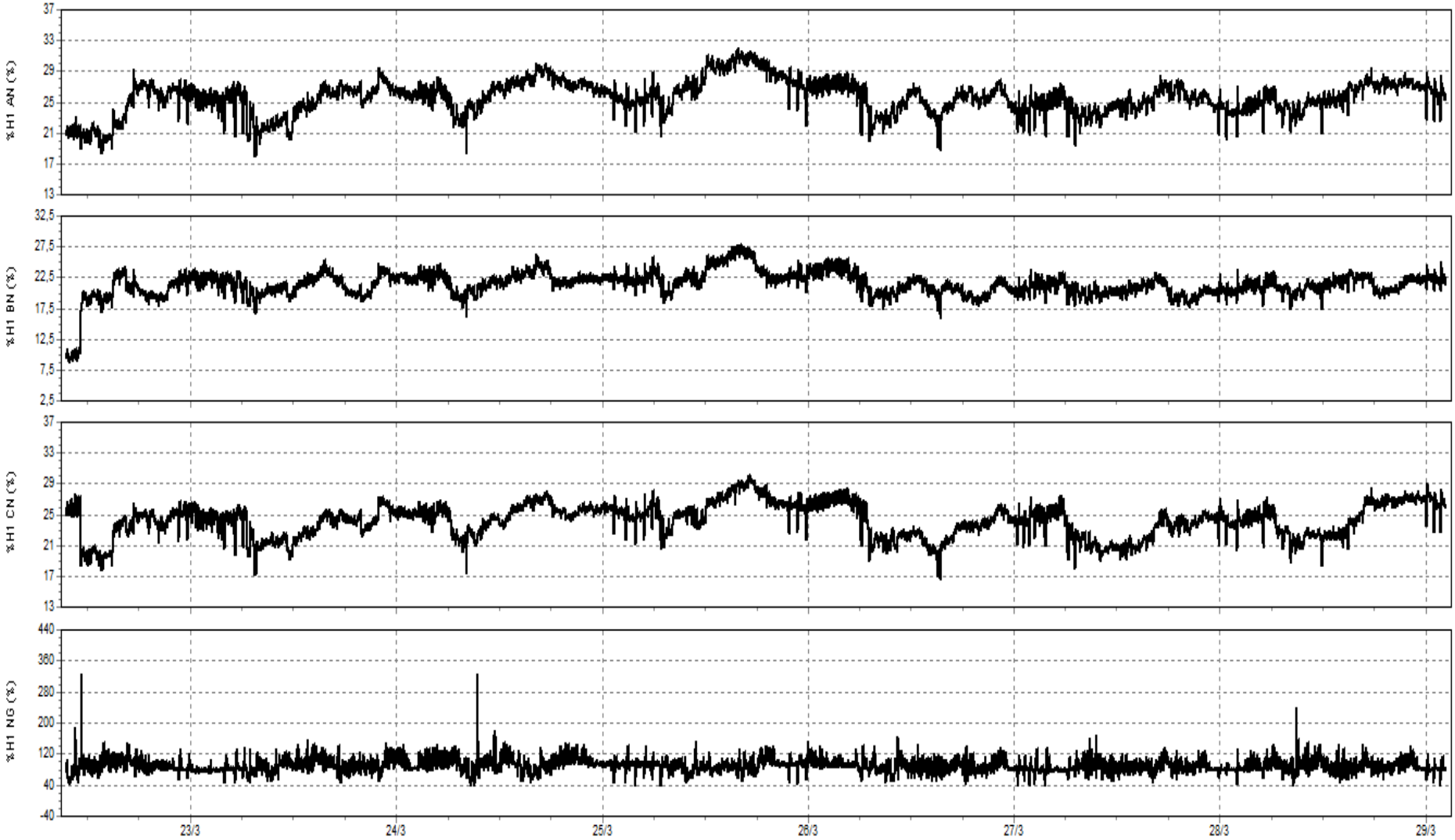
Anexo 1-11. Perfil de distorsión armónica de tensión



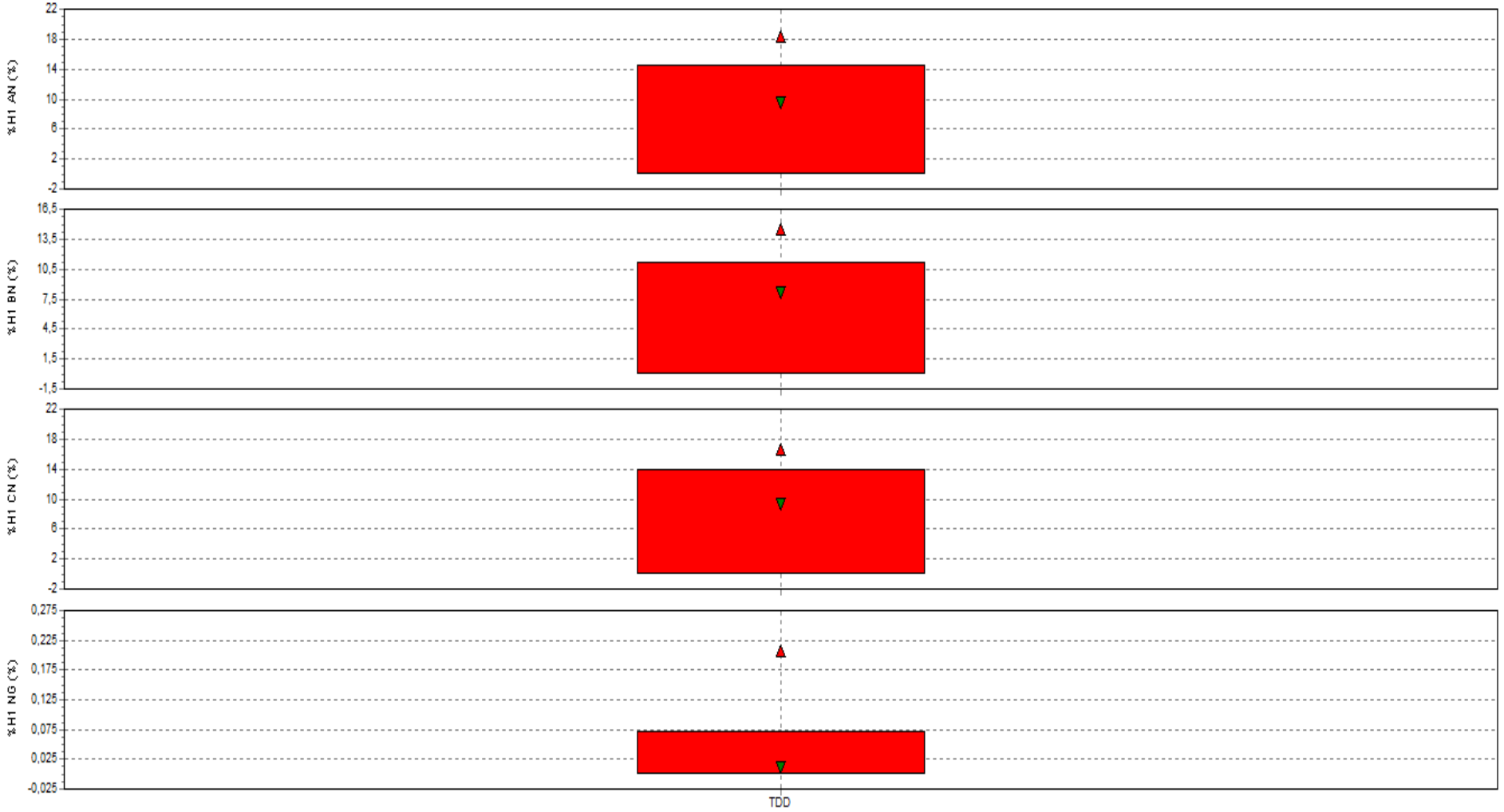
Anexo 1-12. Distorsión armónica de corriente



Anexo 1-13. Perfil de distorsión armónica de corriente



Anexo 1-14. TDD



Anexo 1-15. Desbalance entre fases

Summary

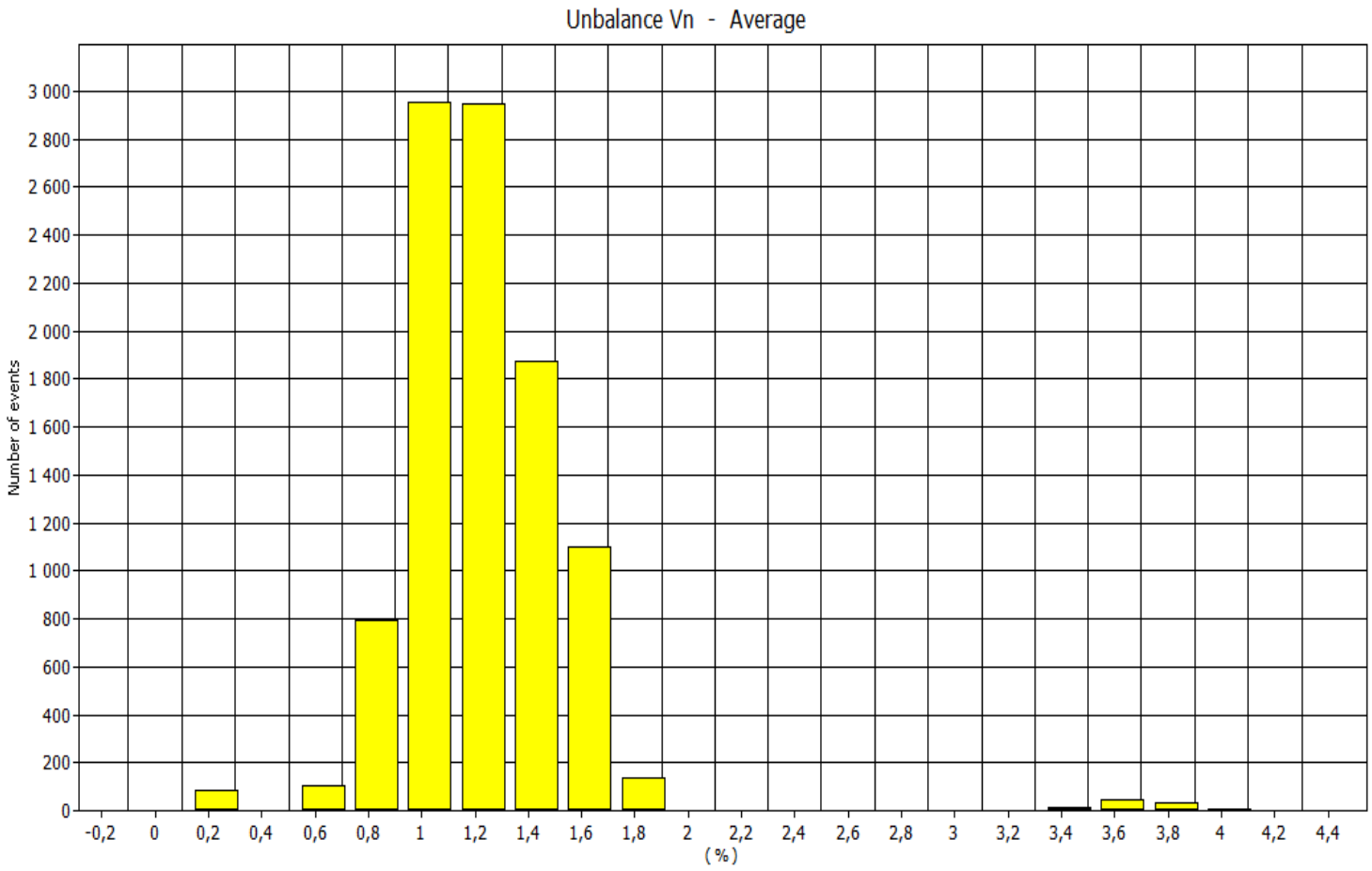
From	22/3/2018 09:31:43
To	29/3/2018 09:30:43
Maximum value	3,99 %
At	22/3/2018 10:48:43
Minimum value	0,03 %
At	22/3/2018 15:58:43
μ (Avg)	1,12954 %
s	0,353011 %
5% percentile	0,77 %
95% percentile	1,56 %
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0 %

Upper extreme values

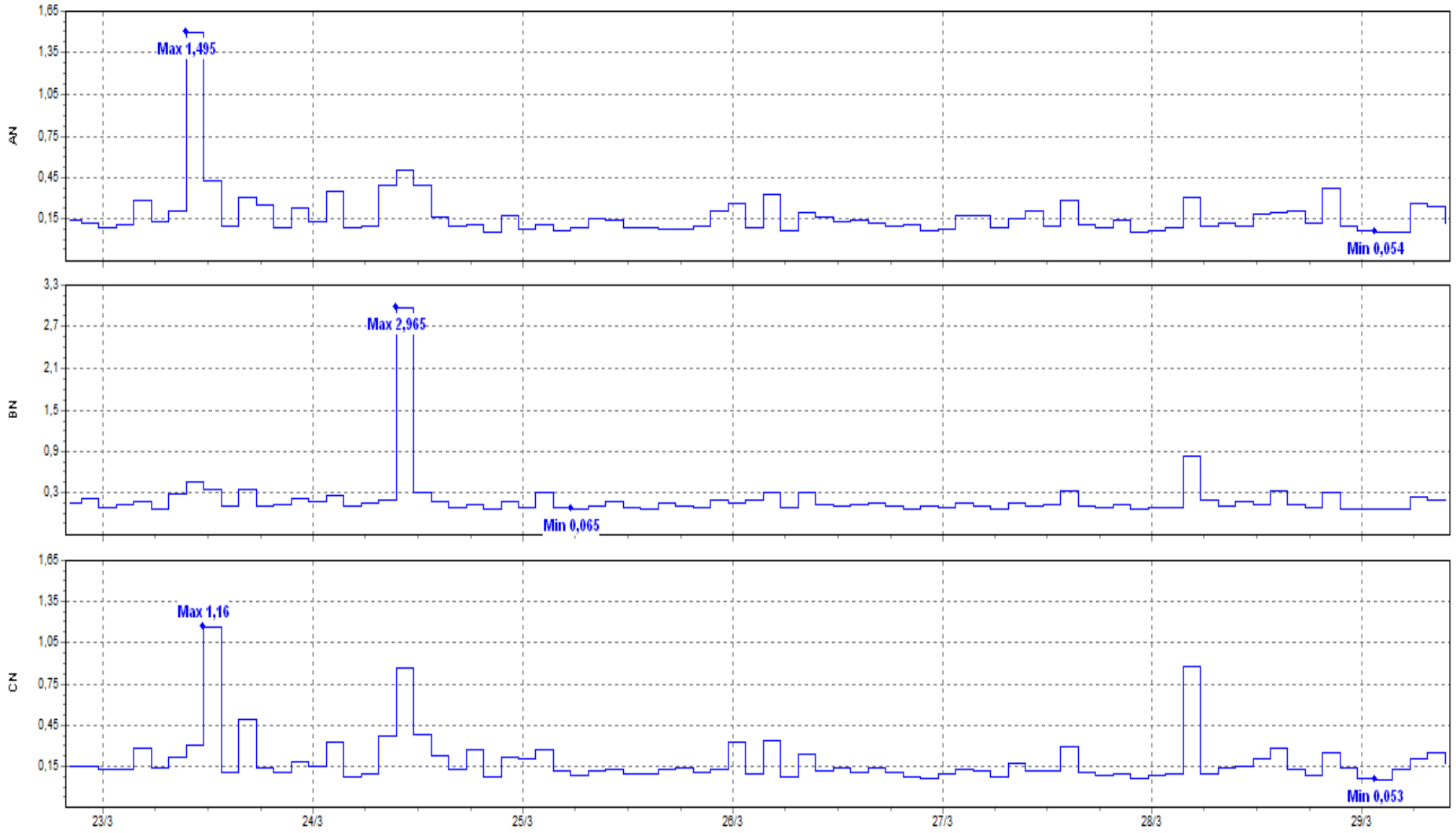
Date / Time	Value
22/3/2018 10:48:43	3,99
22/3/2018 10:47:43	3,96
22/3/2018 10:32:43	3,92
22/3/2018 10:33:43	3,9
22/3/2018 10:22:43	3,89

Lower extreme values

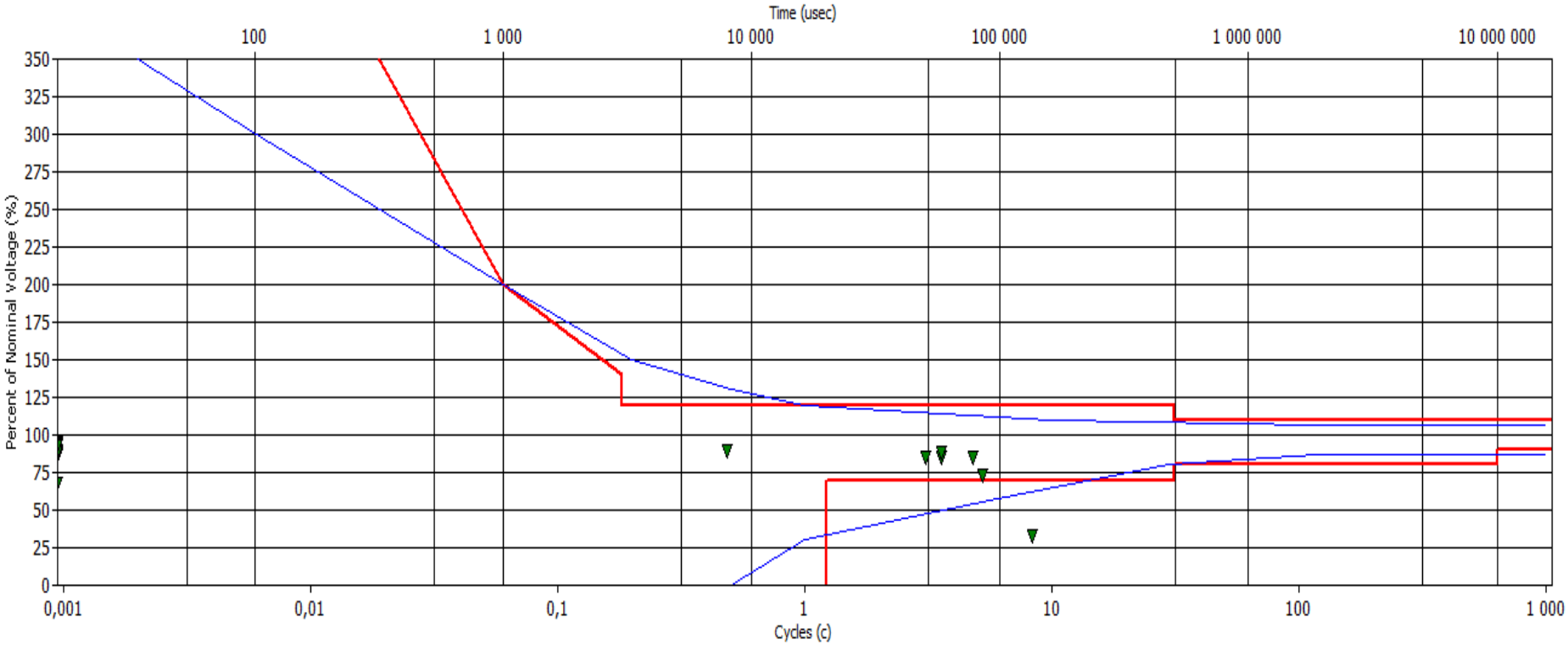
Date / Time	Value
22/3/2018 15:58:43	0,03
22/3/2018 16:25:43	0,04
22/3/2018 16:03:43	0,04
22/3/2018 16:08:43	0,05
22/3/2018 15:57:43	0,05



Anexo 1-16. Flicker



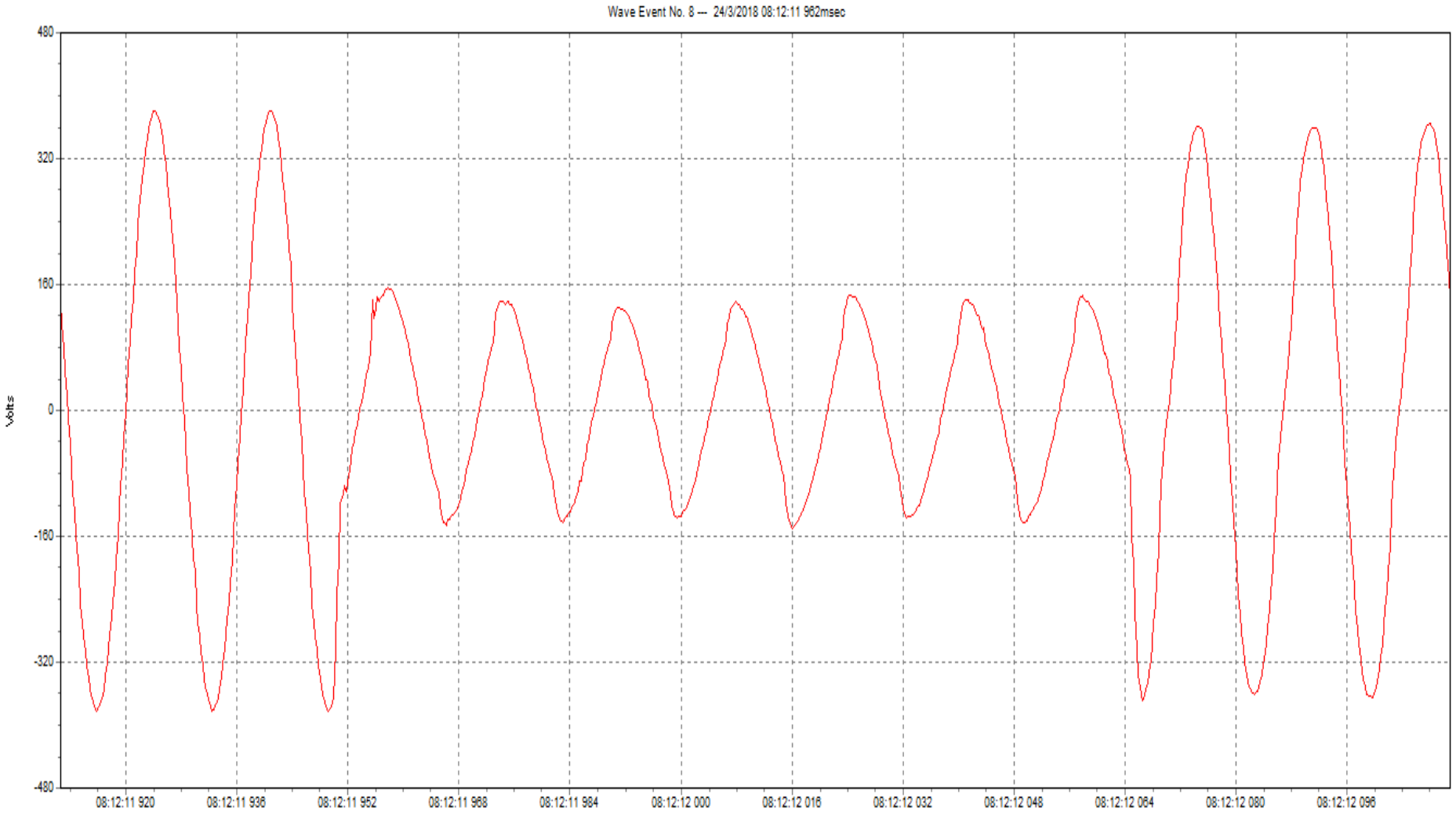
Anexo 1-17. Curva CBEMA



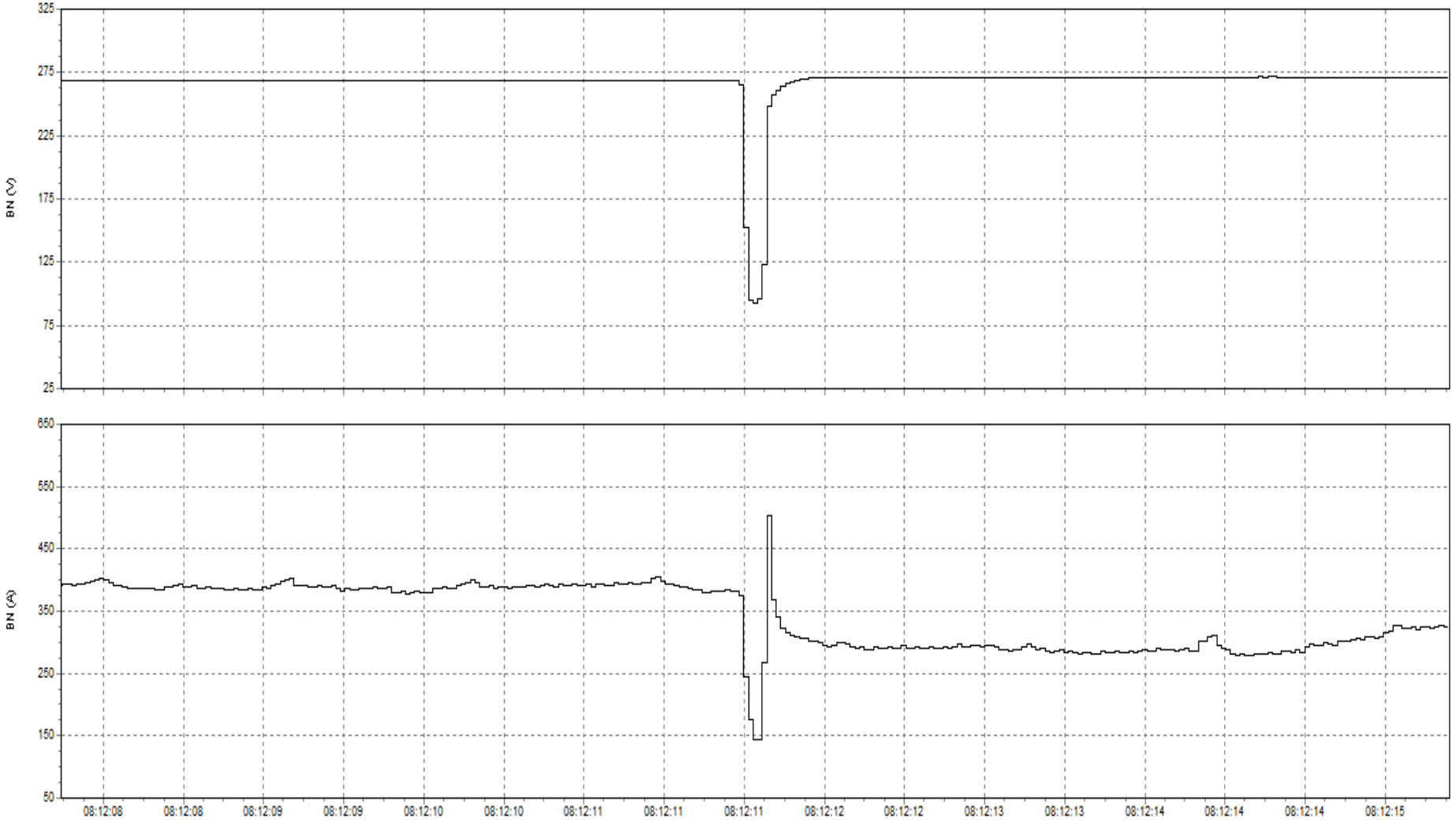
Residual voltage u[%]				Duration t[ms]			
	t < 10	10 <= t <= 200	200 < t <= 500	500 < t <= 1000	1000 < t <= 5000	5000 < t <= 60000	60000 < t
90 > u >= 80	9	4	0	0	0	0	0
80 > u >= 70	0	1	0	0	0	0	0
70 > u >= 40	1	0	0	0	0	0	0
40 > u >= 5	0	1	0	0	0	0	0
5 > u	0	0	0	0	0	0	0

Swell voltage u[%]			Duration t[ms]		
	t < 10	10 <= t <= 500	500 < t <= 5000	5000 < t <= 60000	60000 < t
u >= 120	0	0	0	0	0
120 > u > 110	0	0	0	0	0

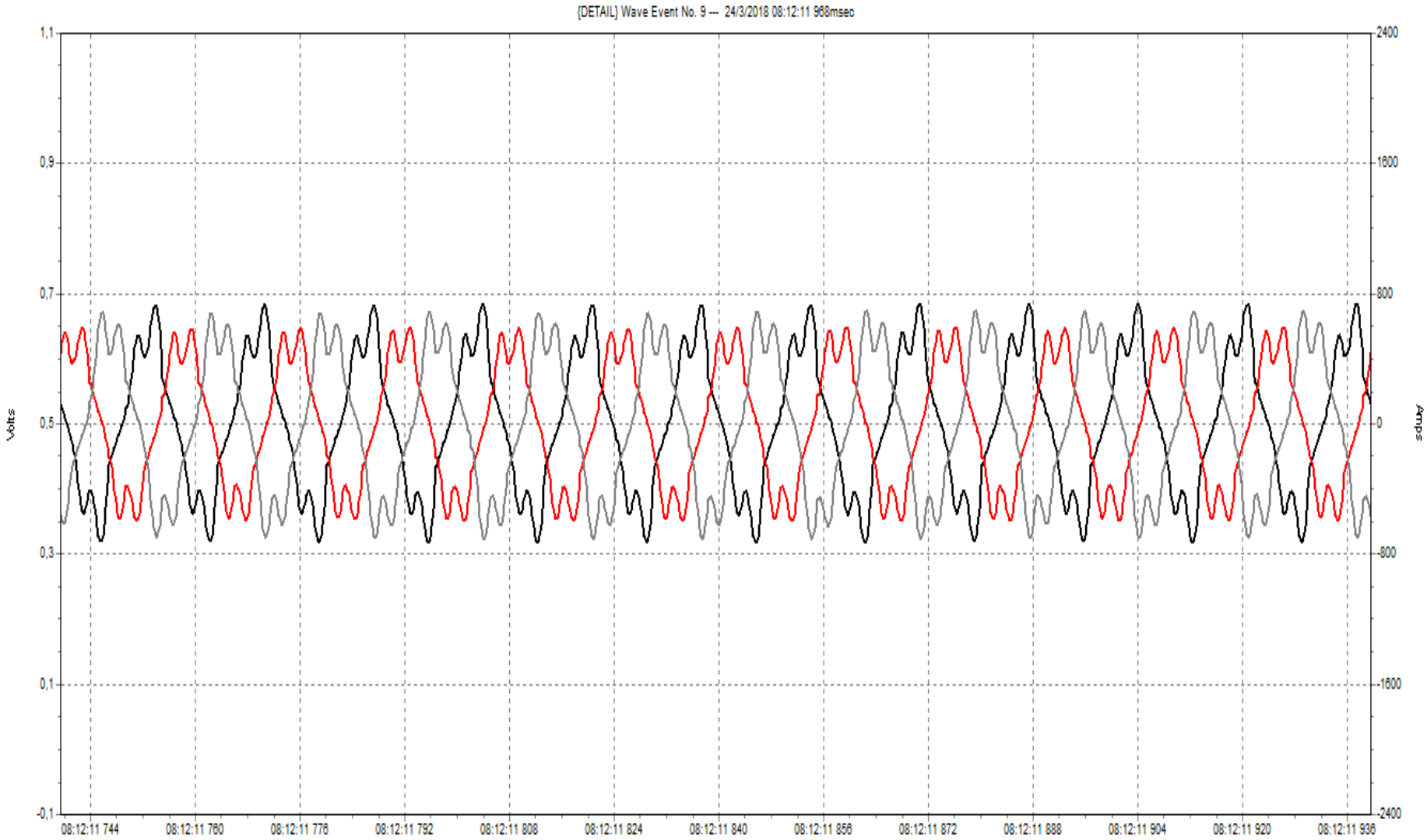
Anexo 1-18. Sag registrado



Anexo 1-19. Comportamiento de sag registrado



Anexo 1-20. Armónicas presentes en onda de corriente

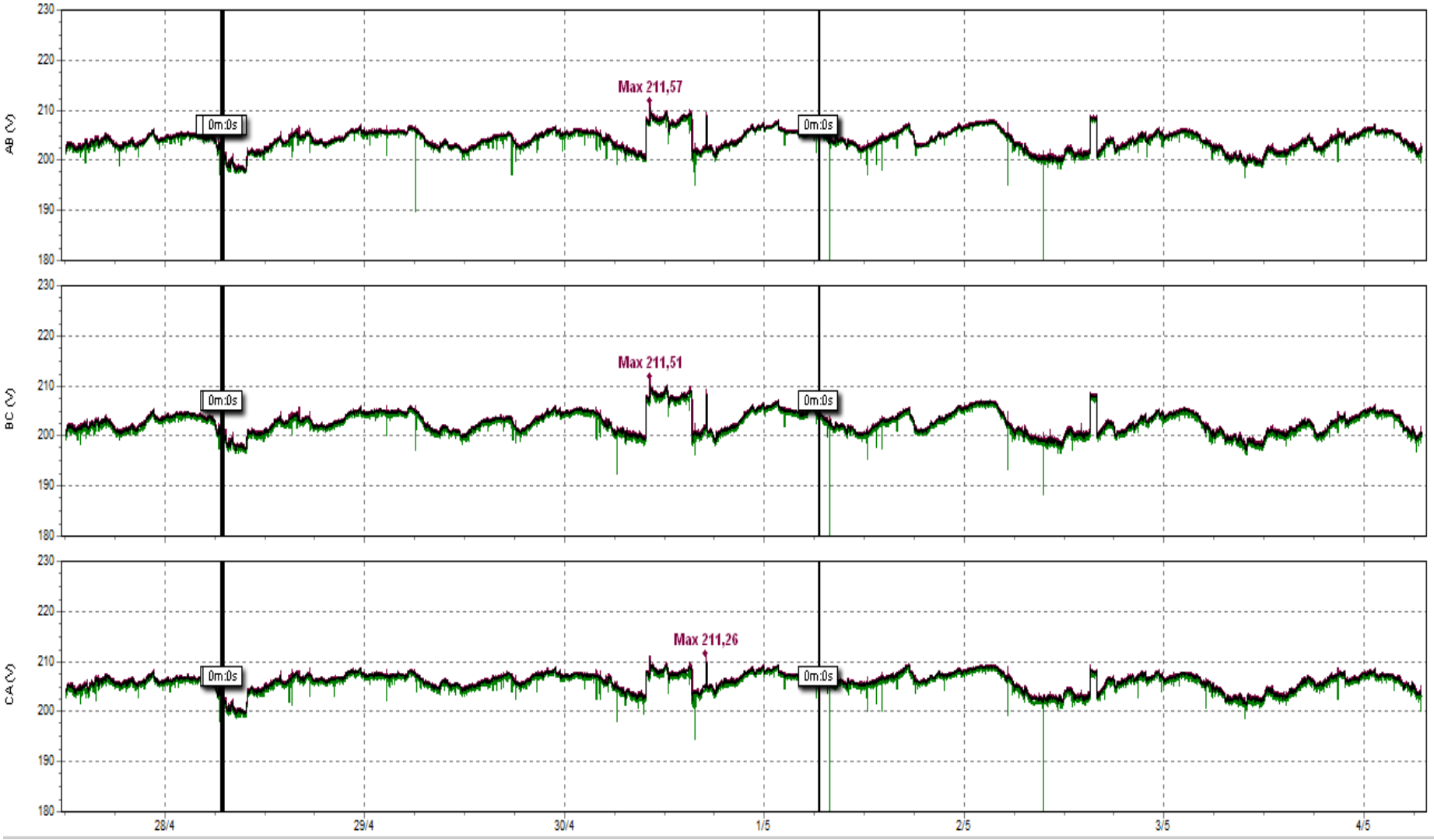


8) Anexos 2

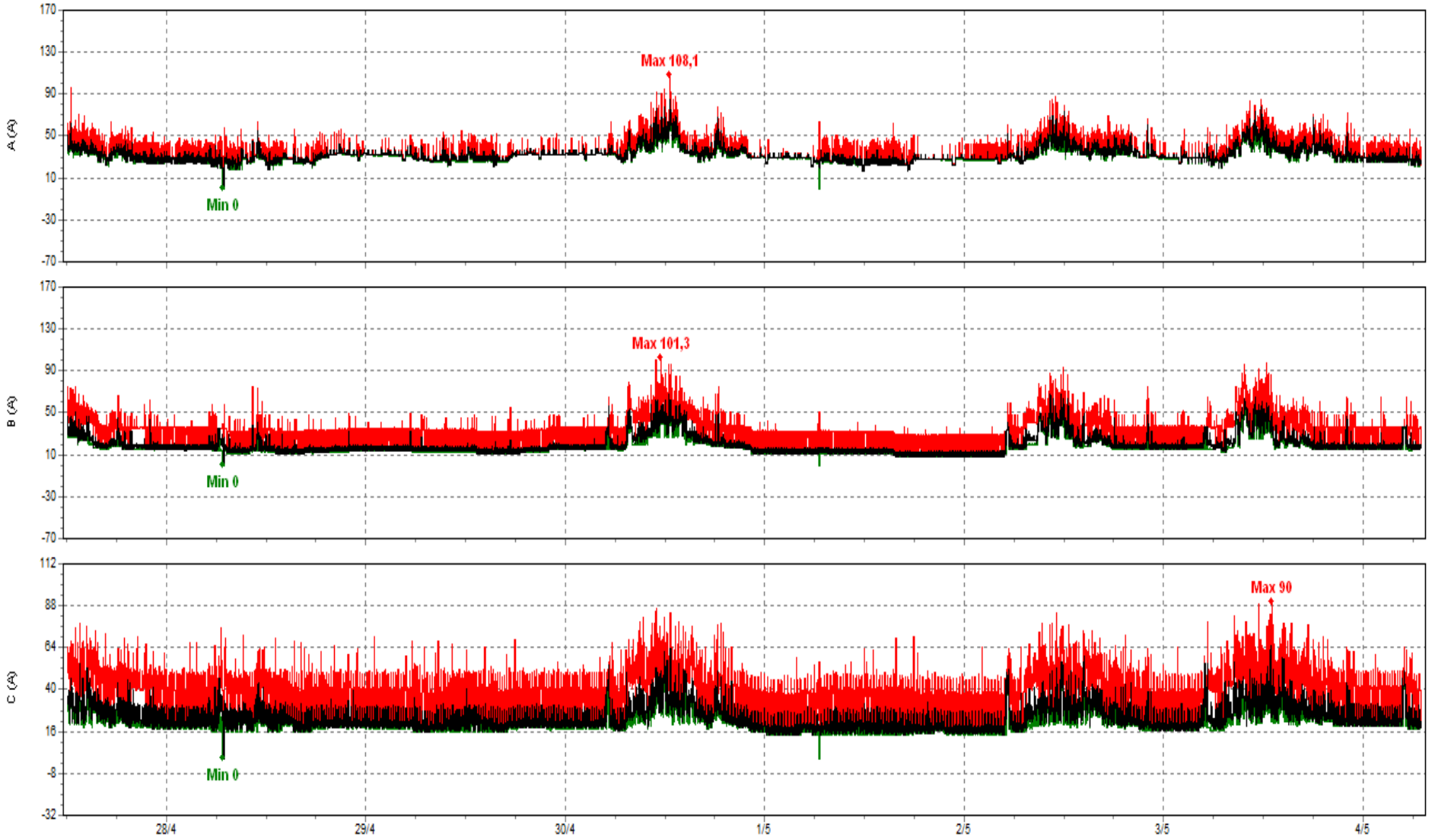
Mediciones calidad de energía en el PPL

Cartago, 2018

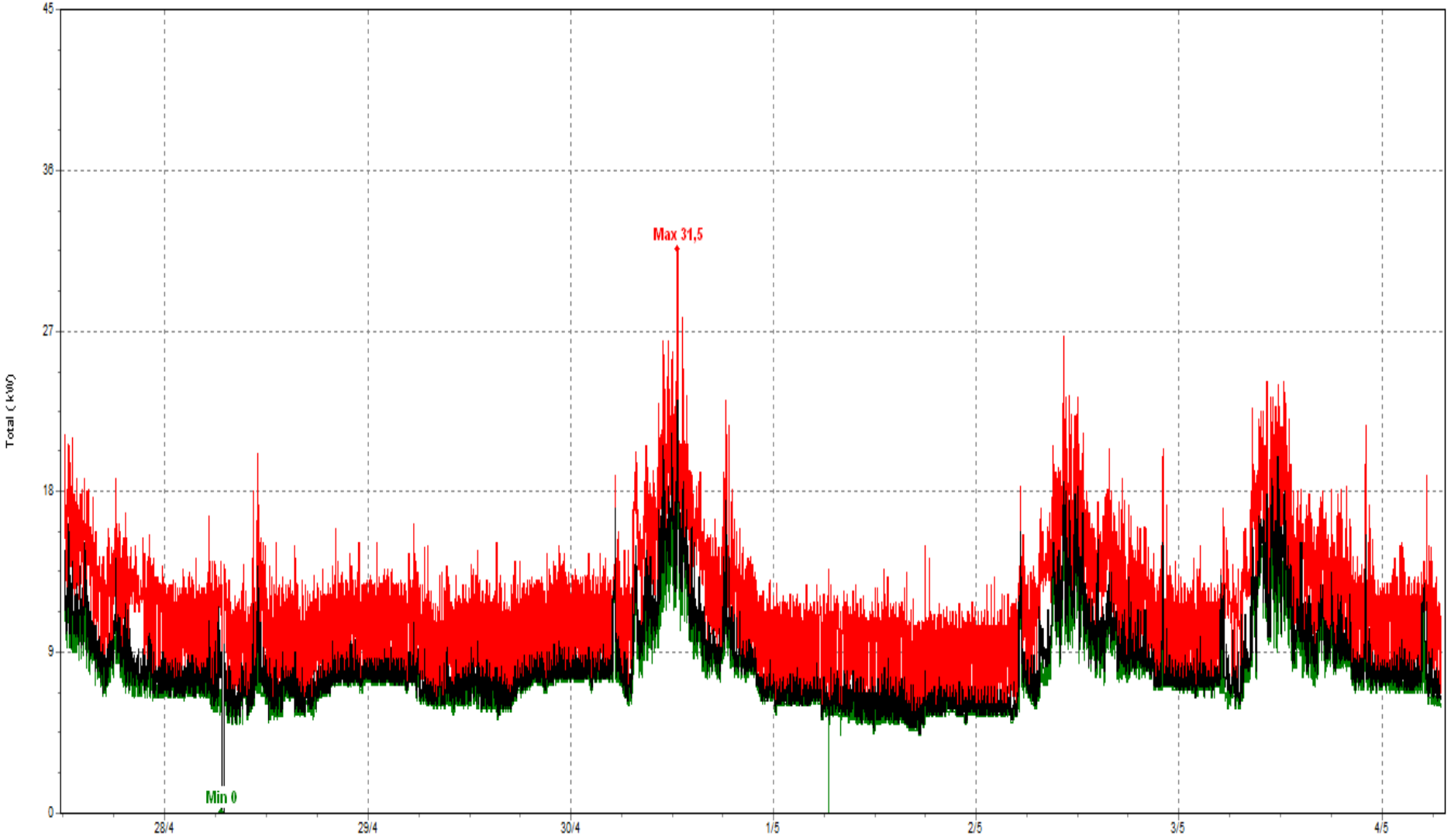
Anexo 2- 1. Valores de tensión registrados para las tres fases



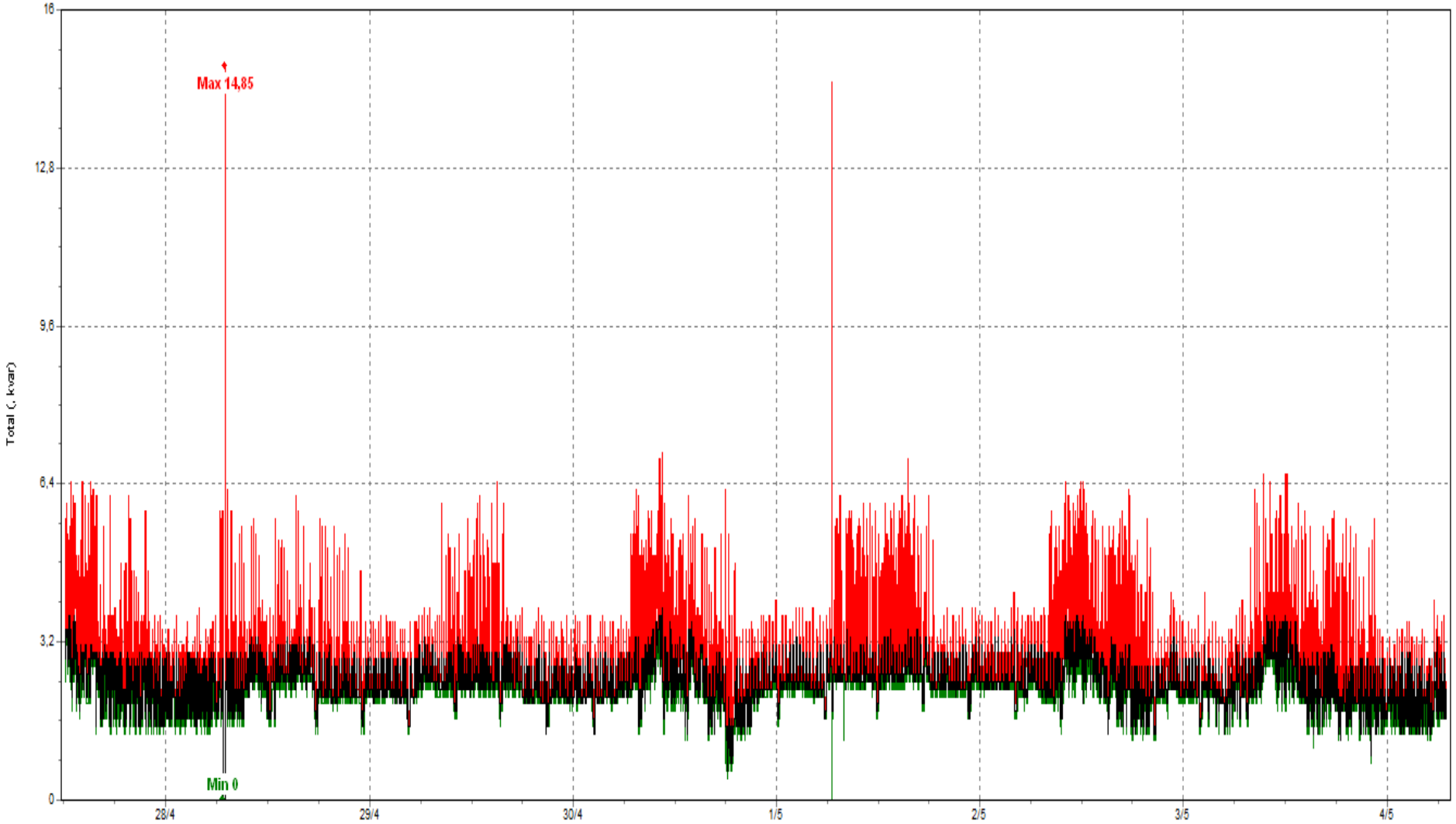
Anexo 2- 2.Valores de corriente registrados para las tres fases



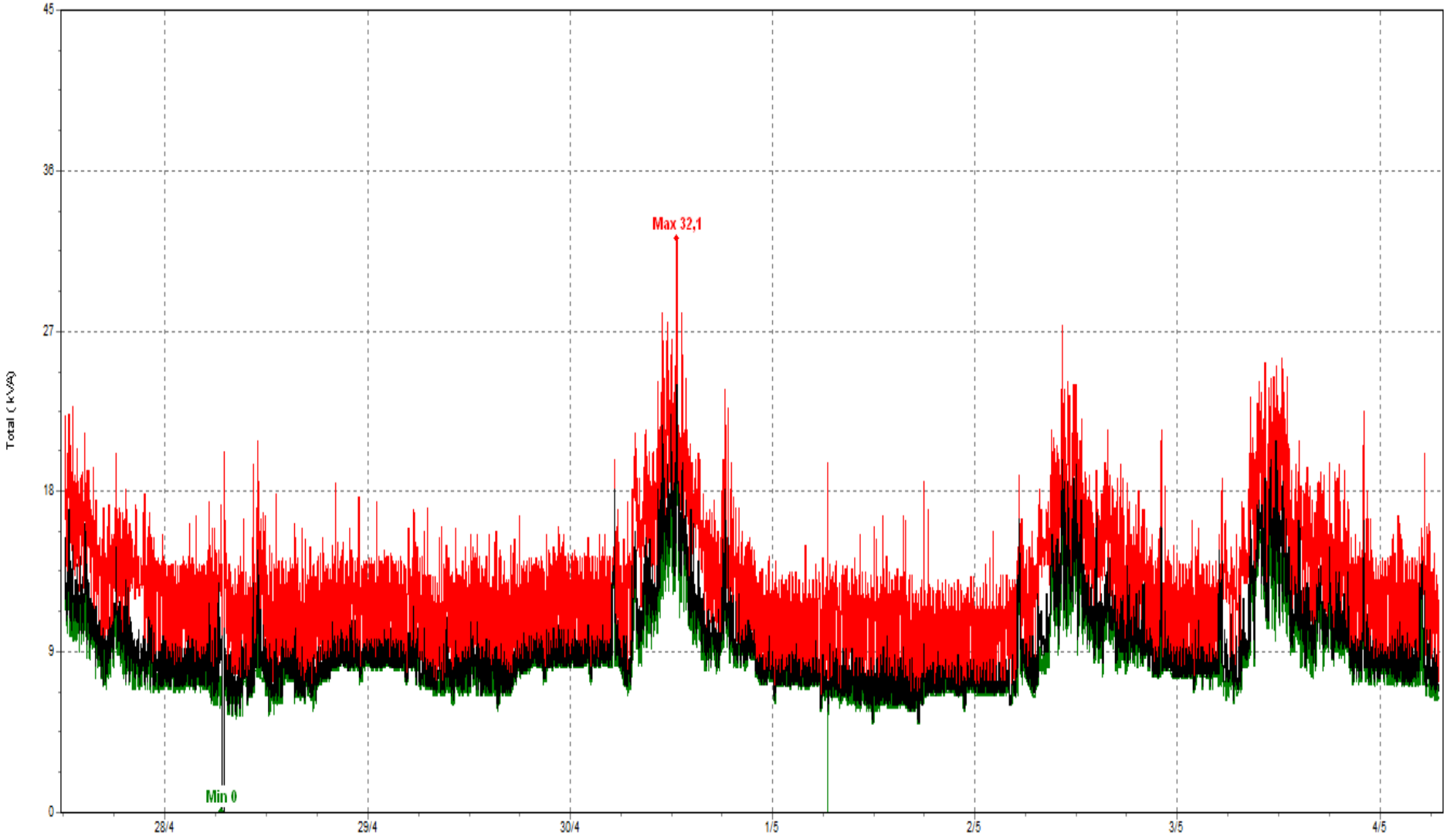
Anexo 2- 3. Potencia real registrada



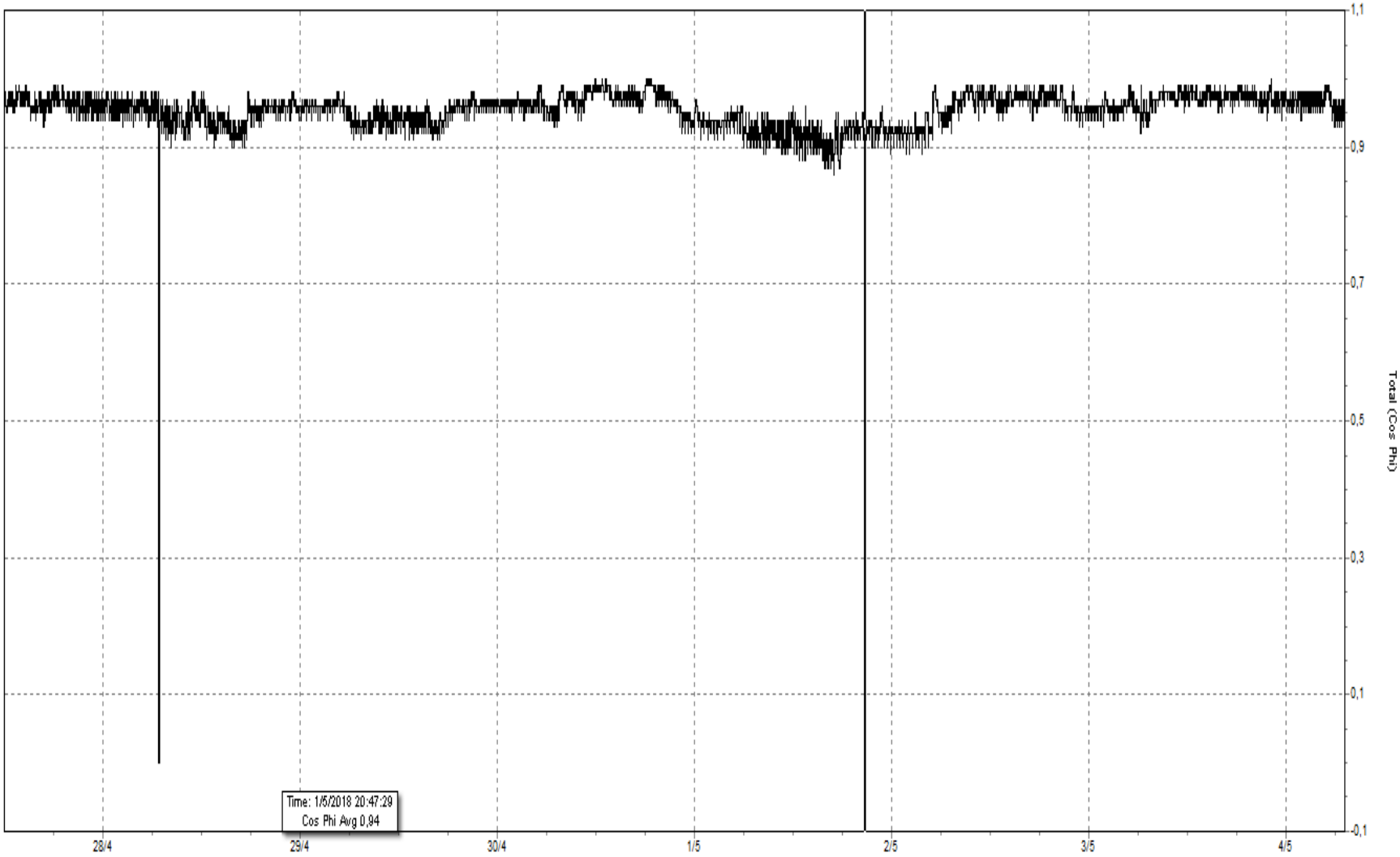
Anexo 2- 4. Potencia reactiva



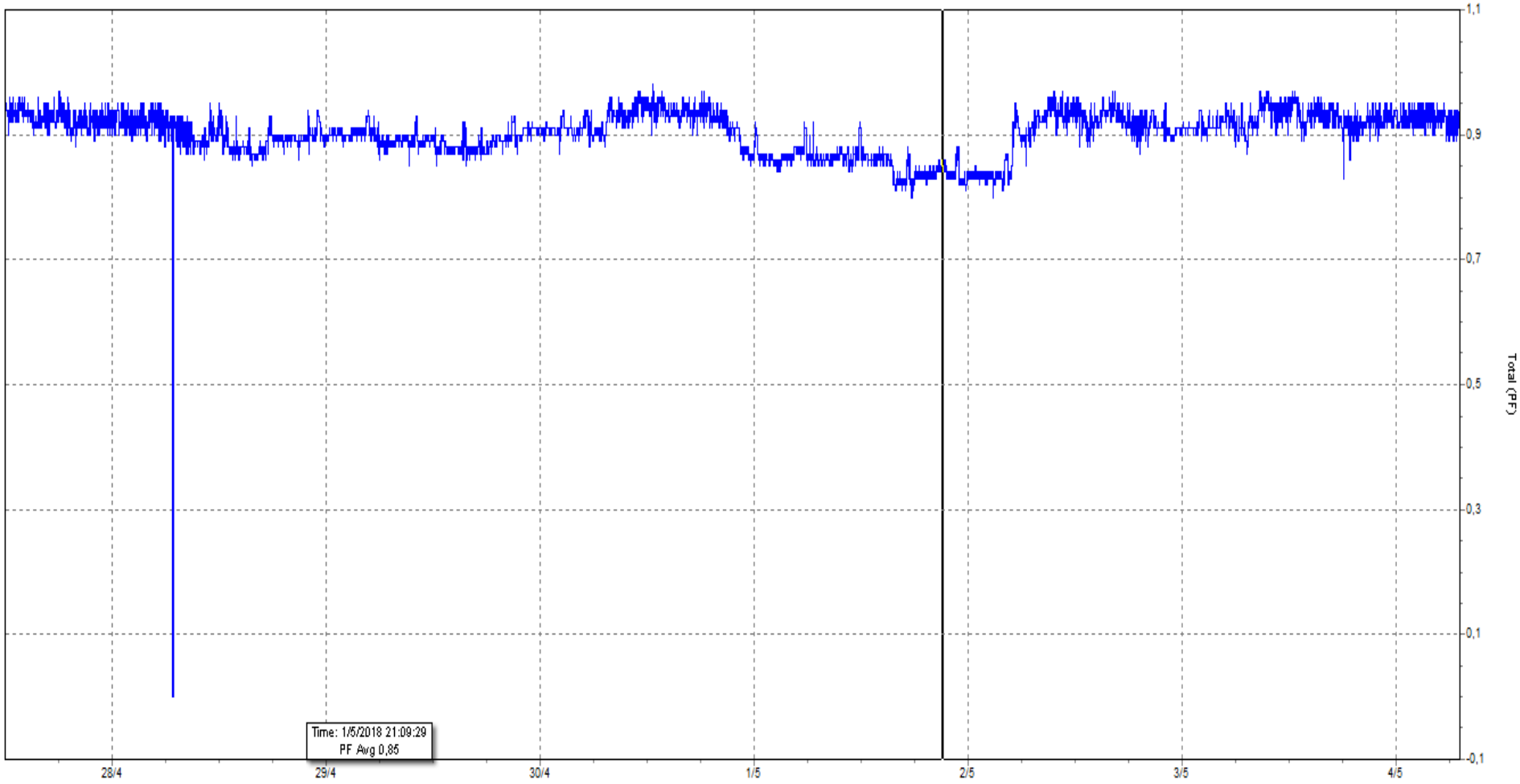
Anexo 2- 5. Potencia aparente



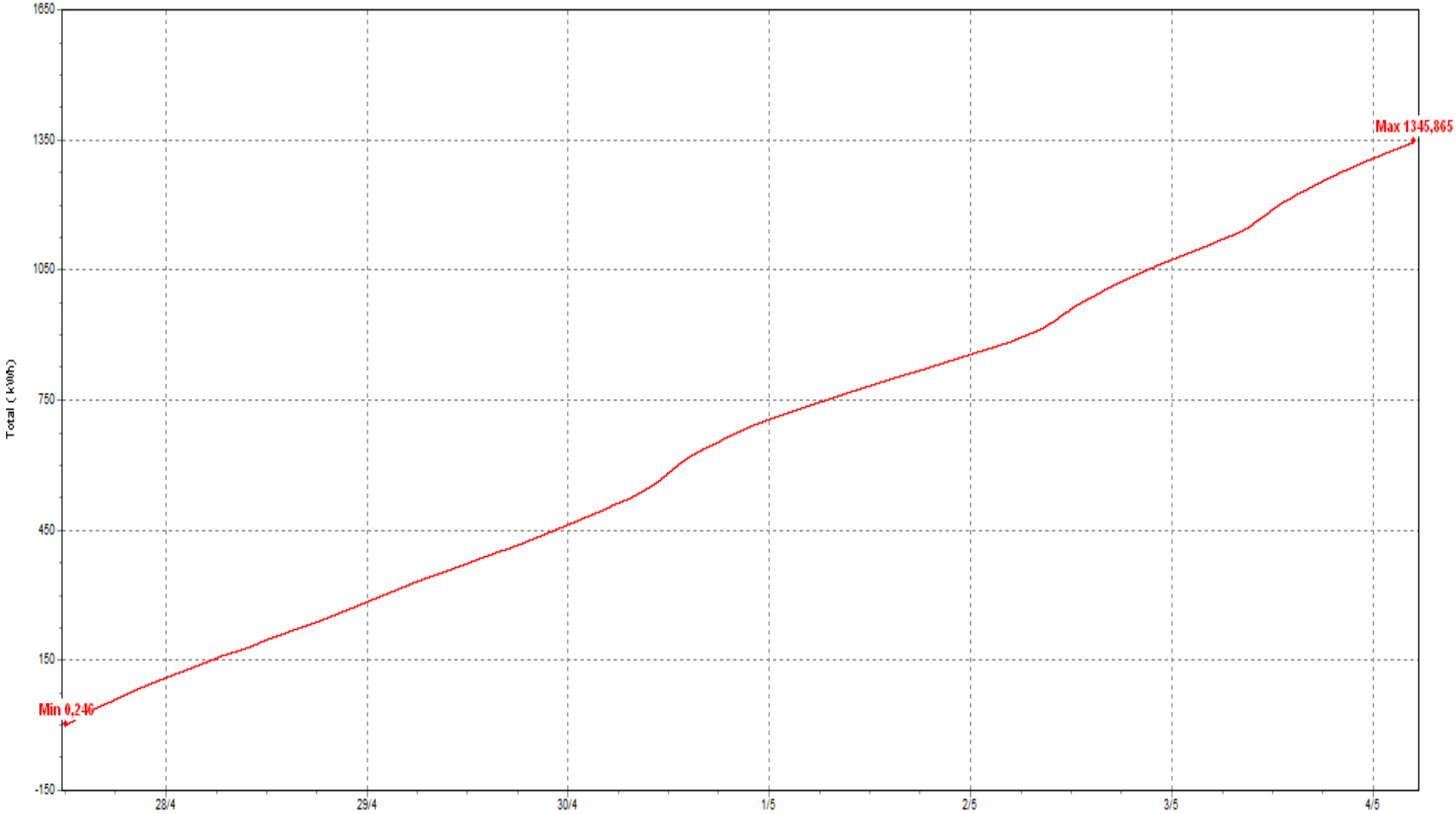
Anexo 2- 6. Factor de potencia de desplazamiento



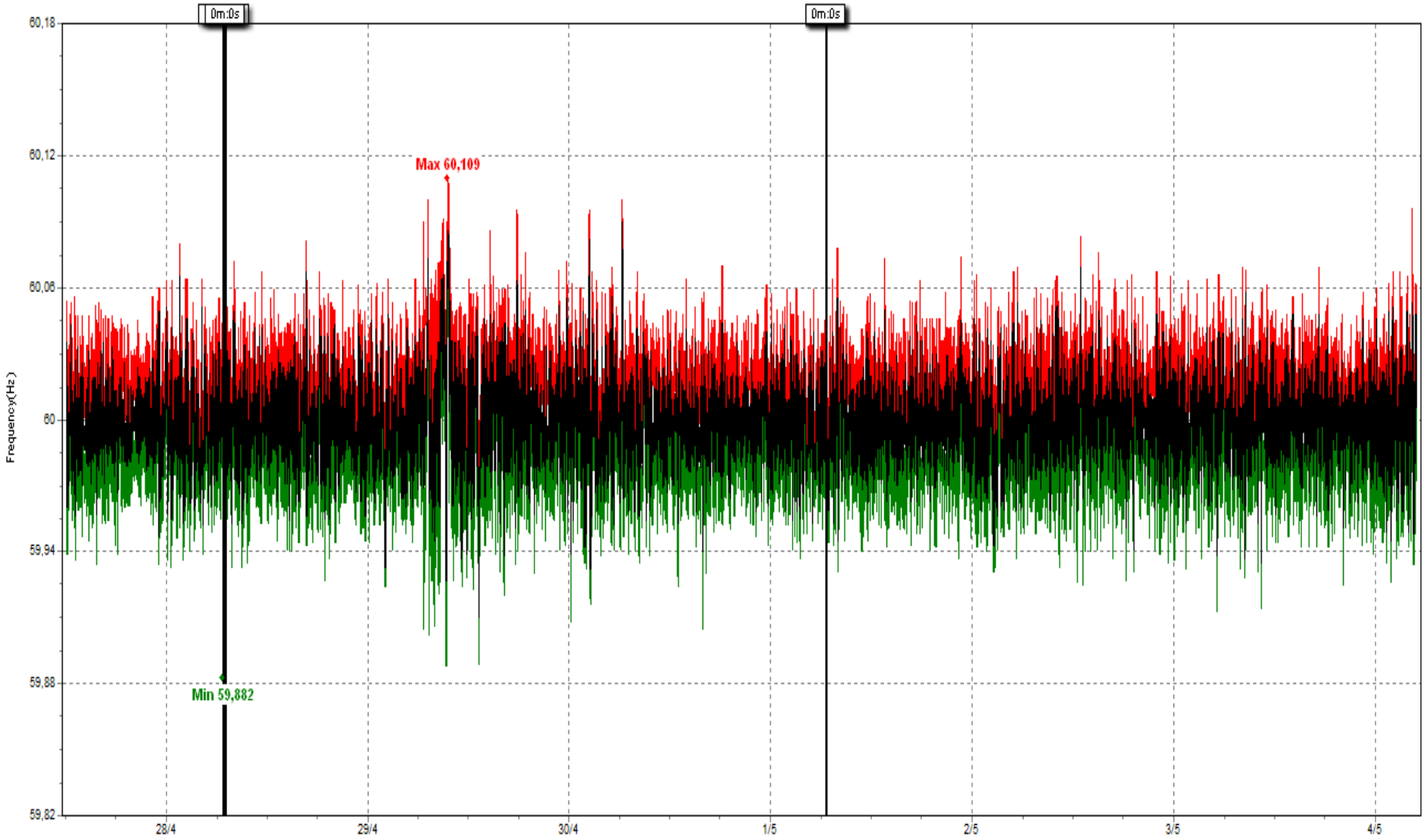
Anexo 2- 7. Factor de potencia con factor de distorsión



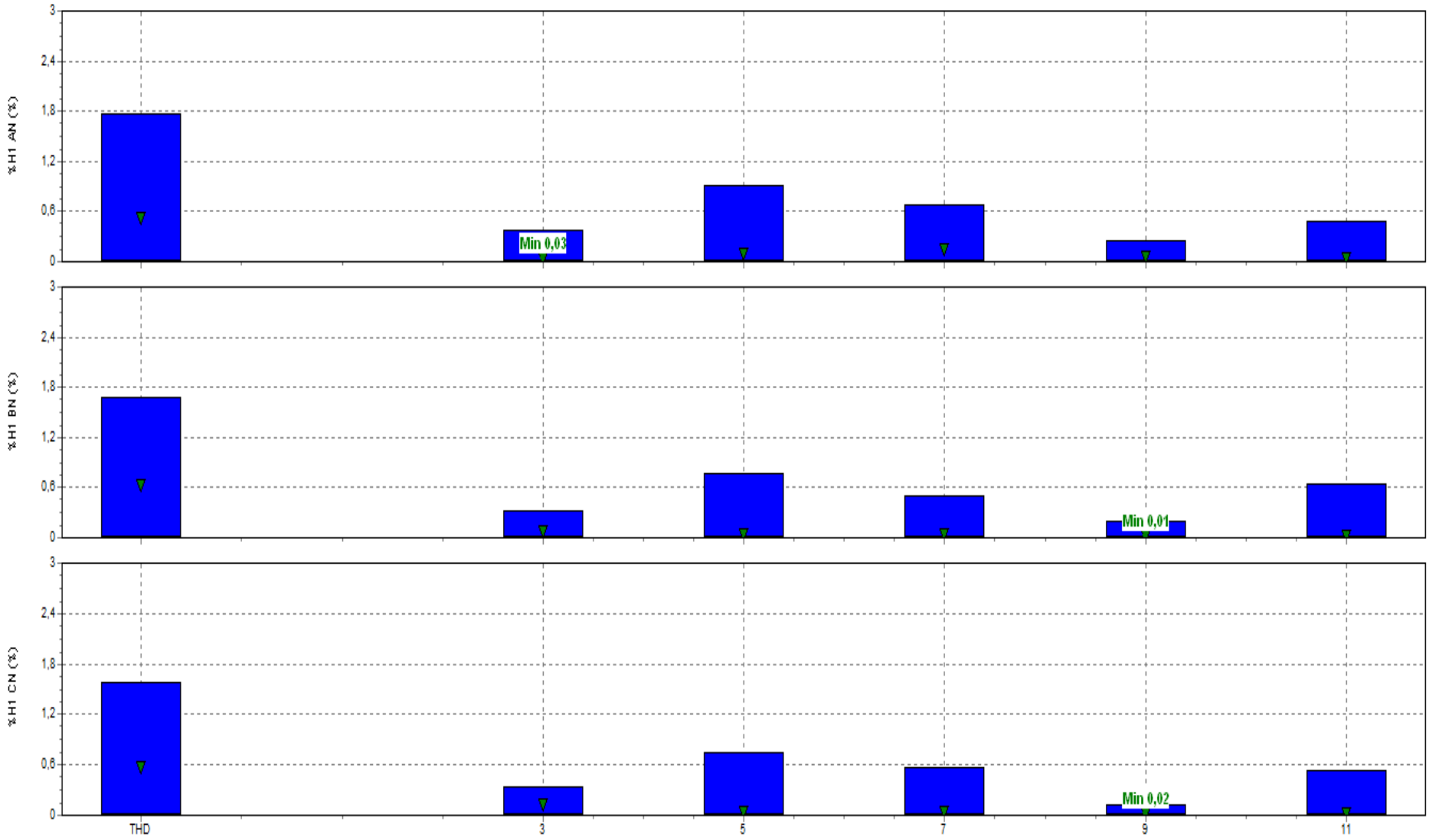
Anexo 2- 8. Energía consumida durante el periodo de medición



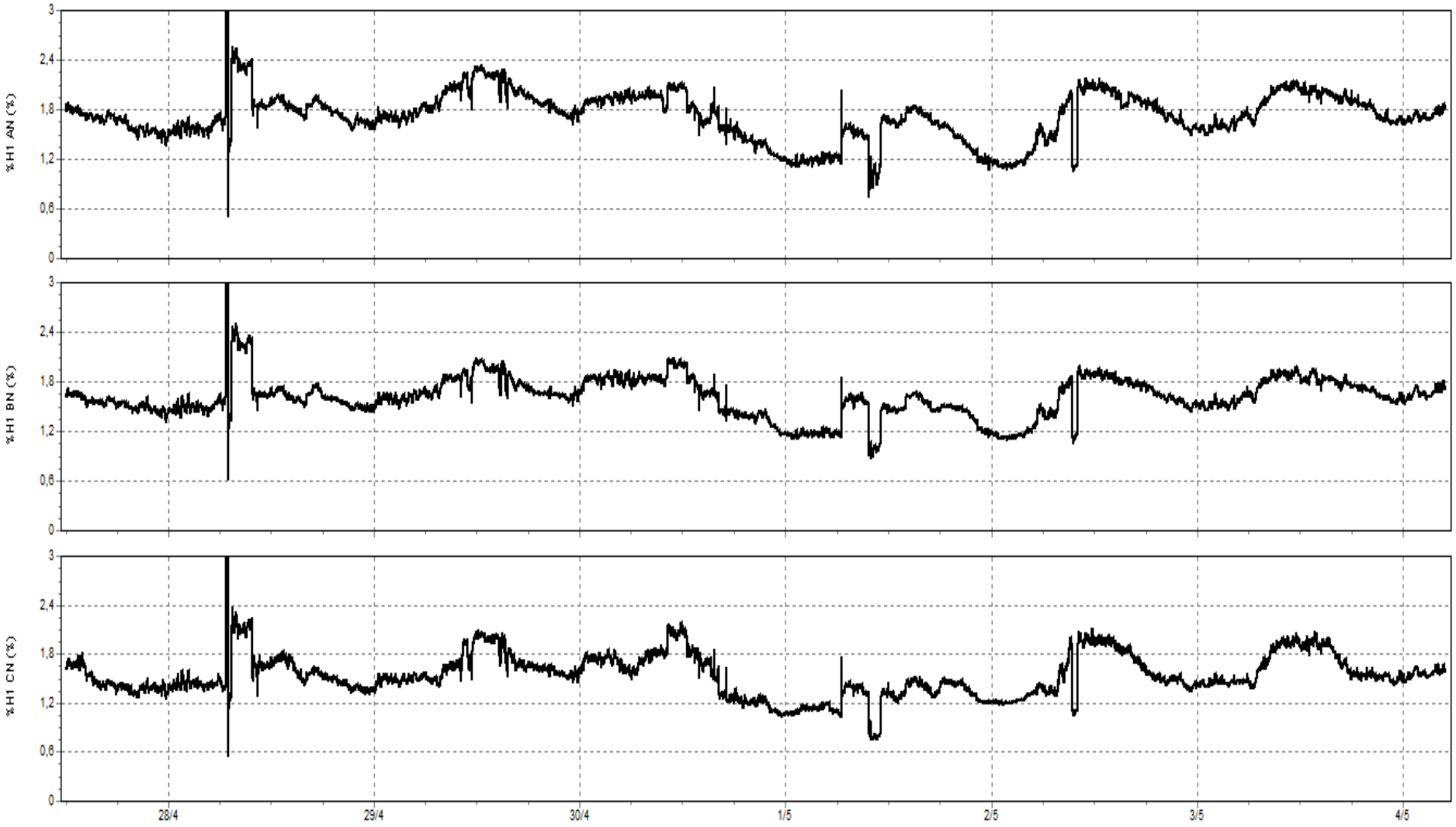
Anexo 2- 9. Frecuencia



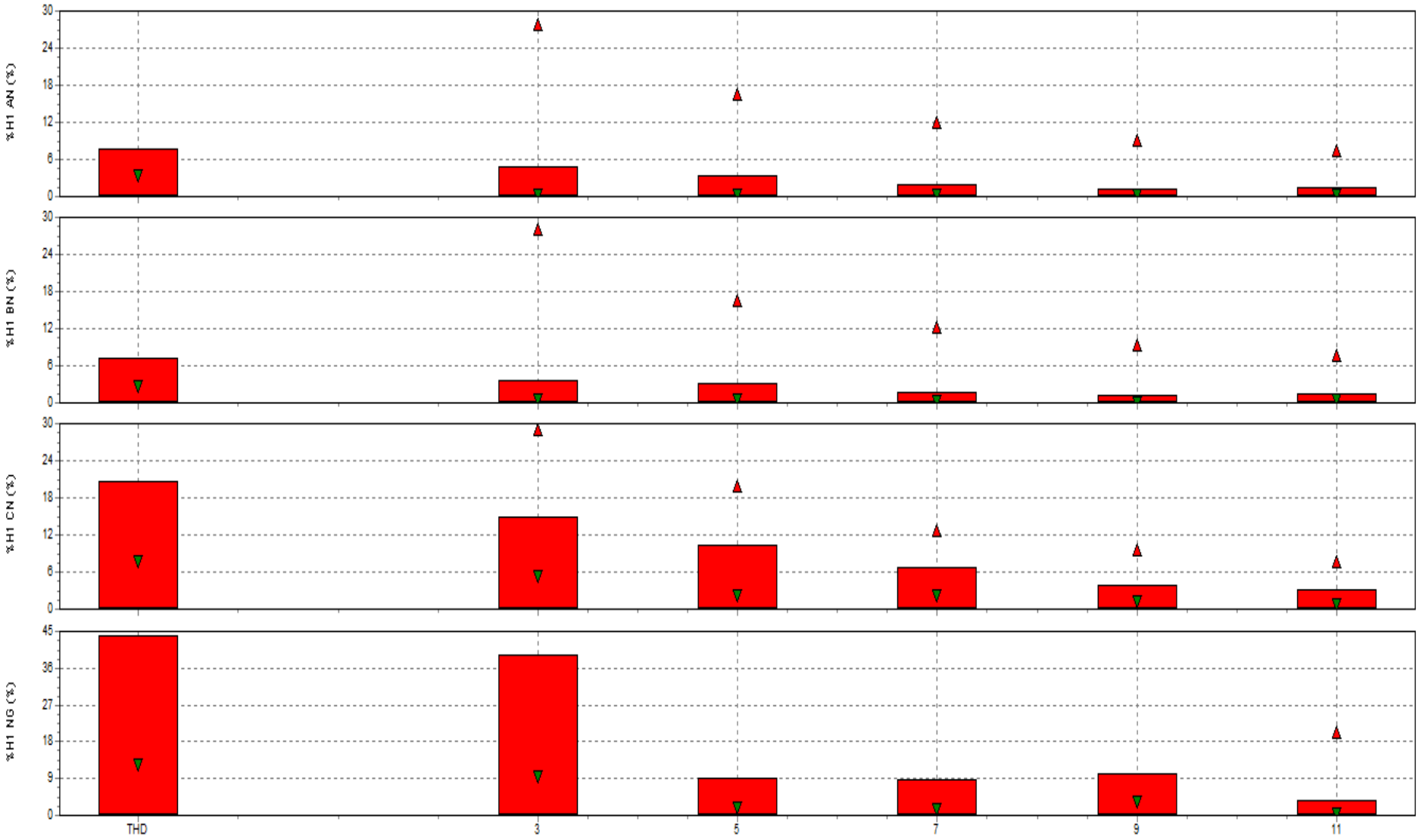
Anexo 2- 10. Distorsión armónica de tensión



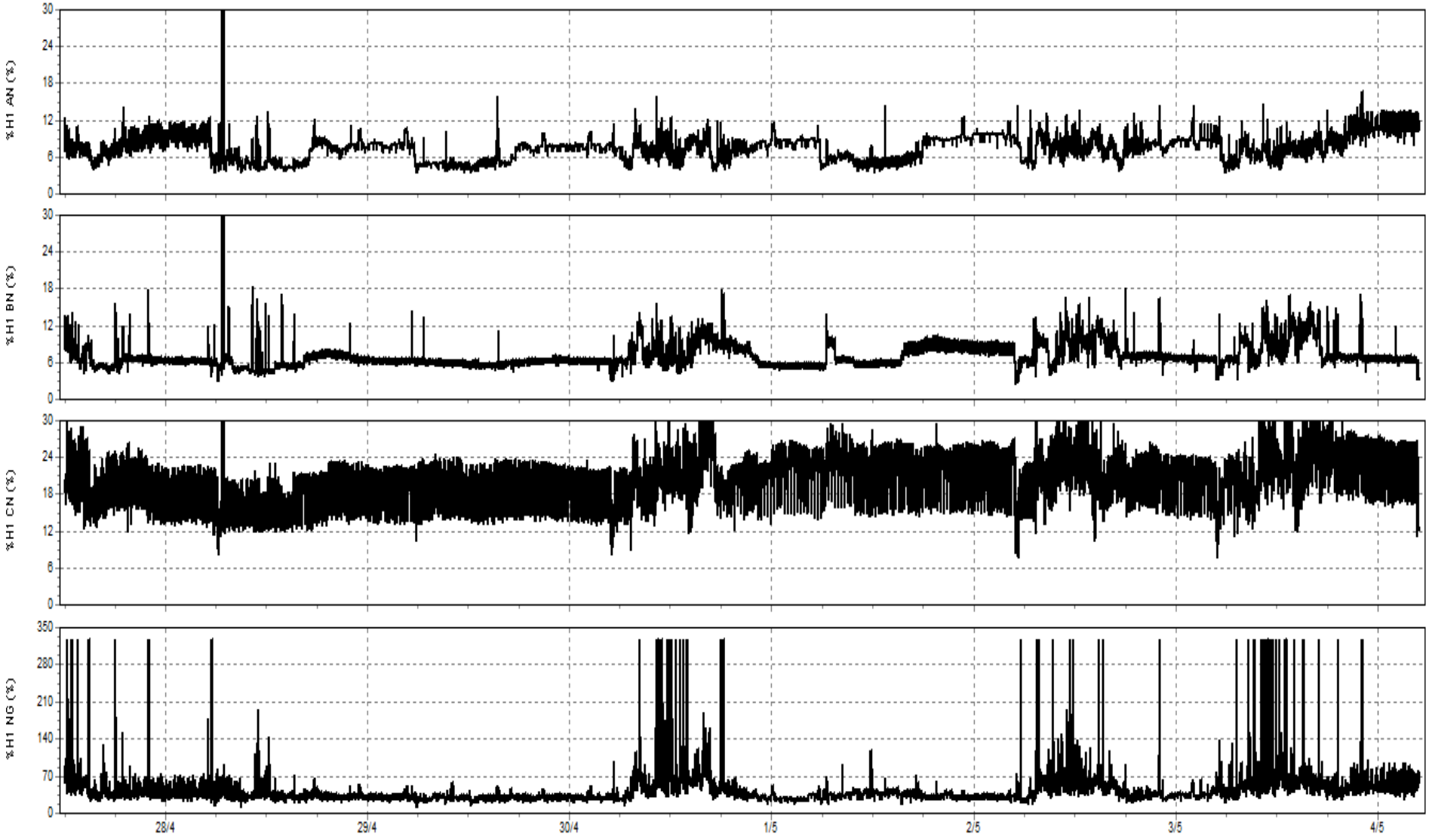
Anexo 2- 11.Perfil de distorsión armónica de tensión



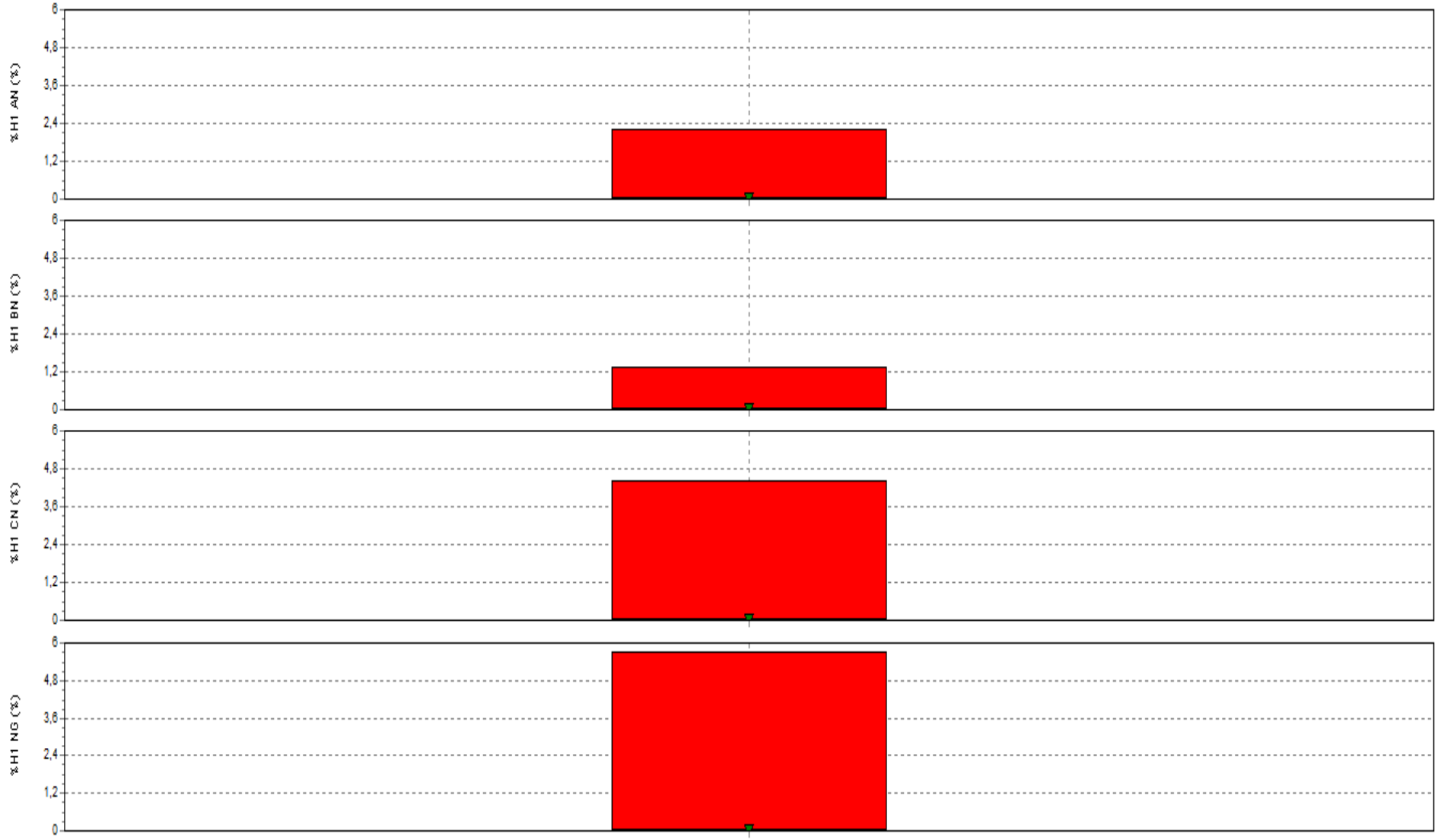
Anexo 2- 12. Distorsión armónica de corriente



Anexo 2- 13.Perfil de distorsión armónica de corriente



Anexo 2- 14. TDD



Anexo 2- 15. Desbalance entre fases

Summary

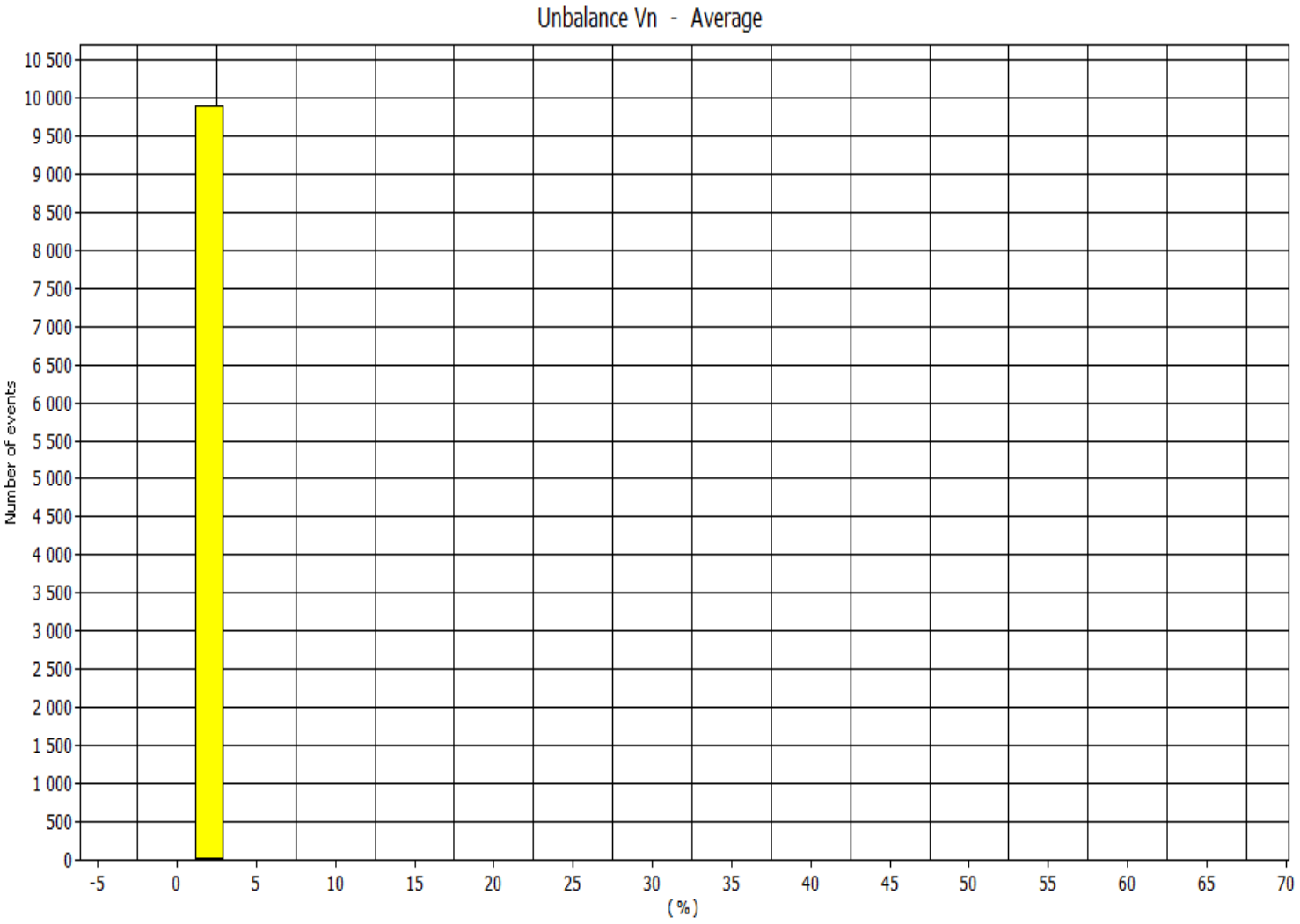
From	27/4/2018 12:08:29
To	4/5/2018 09:11:29
Maximum value	61,63 %
At	28/4/2018 06:53:29
Minimum value	0,03 %
At	30/4/2018 12:11:29
μ (Avg)	0,990794 %
s	1,74018 %
5% percentile	0,61 %
95% percentile	1,36 %
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0 %

Upper extreme values

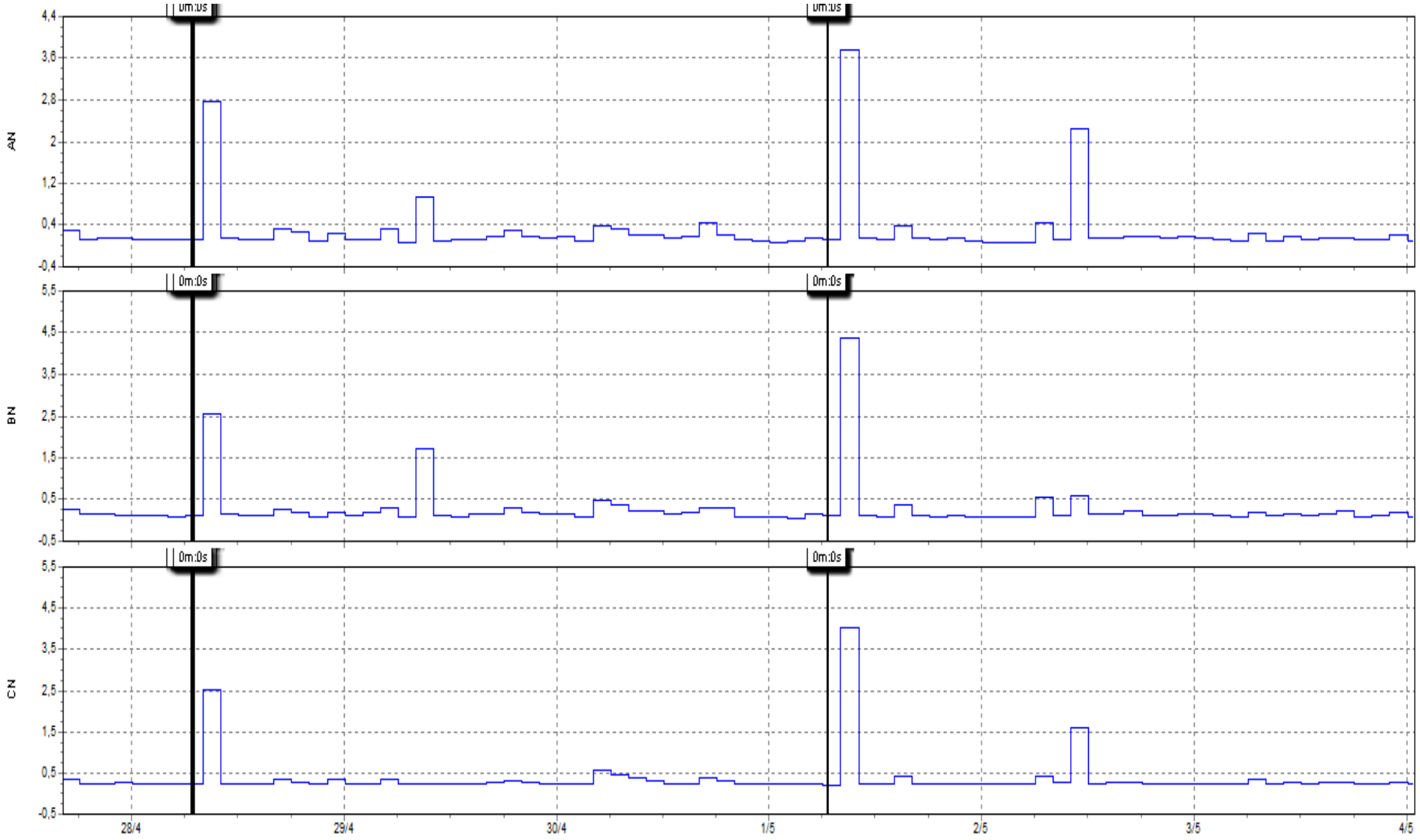
Date / Time	Value
28/4/2018 06:53:29	61,63
28/4/2018 06:50:29	57,87
28/4/2018 06:52:29	57,7
28/4/2018 06:48:29	57,37
28/4/2018 06:49:29	56,92

Lower extreme values

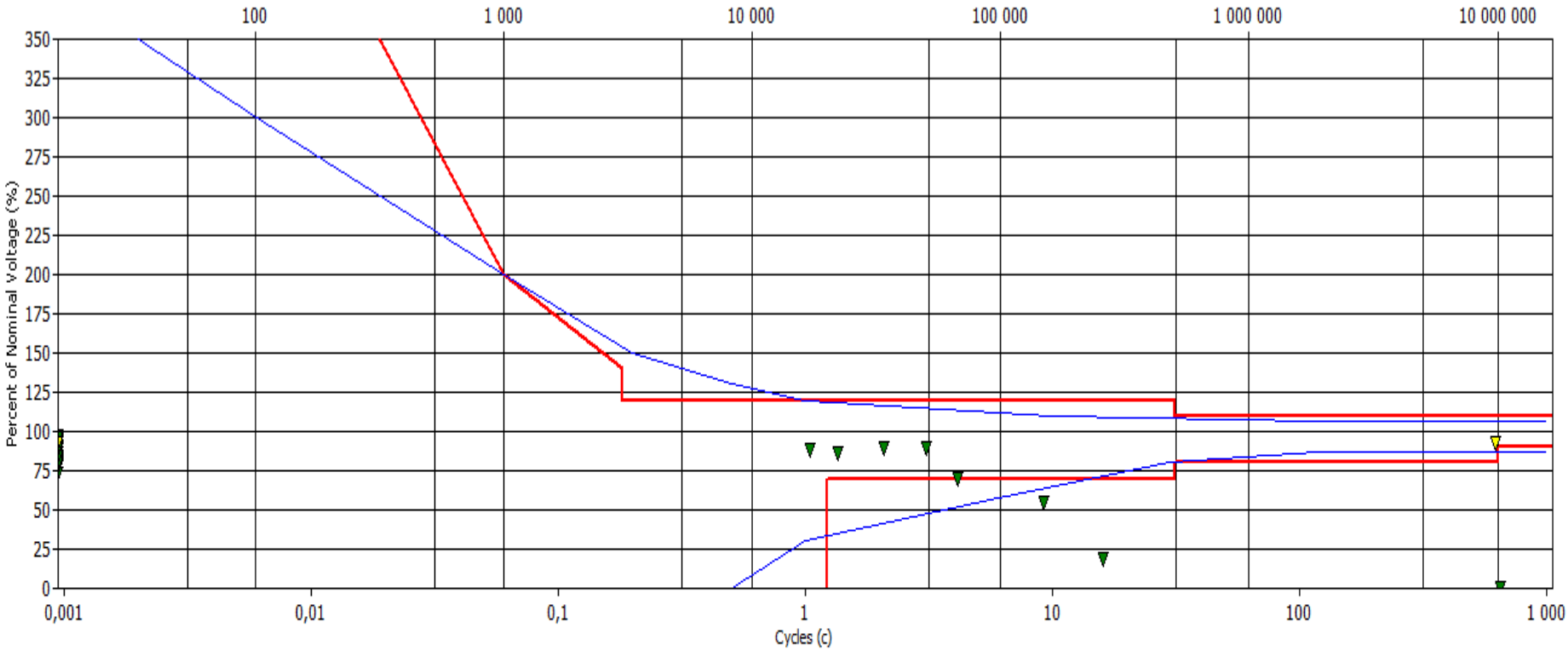
Date / Time	Value
30/4/2018 12:11:29	0,03
30/4/2018 11:48:29	0,04
30/4/2018 11:43:29	0,04
30/4/2018 10:04:29	0,04
30/4/2018 09:56:29	0,04



Anexo 2- 16. Flicker



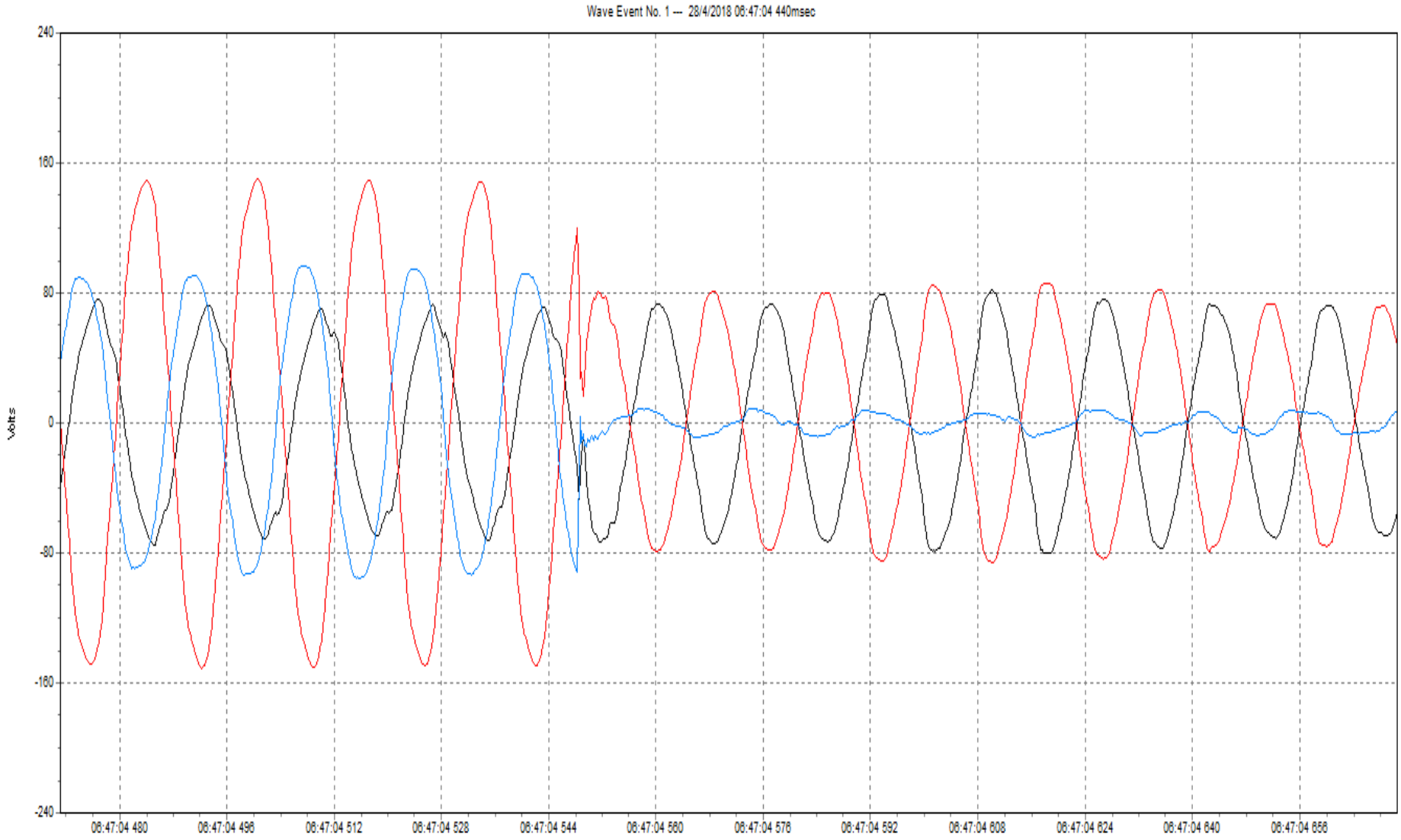
Anexo 2- 17. Curva CBEMA



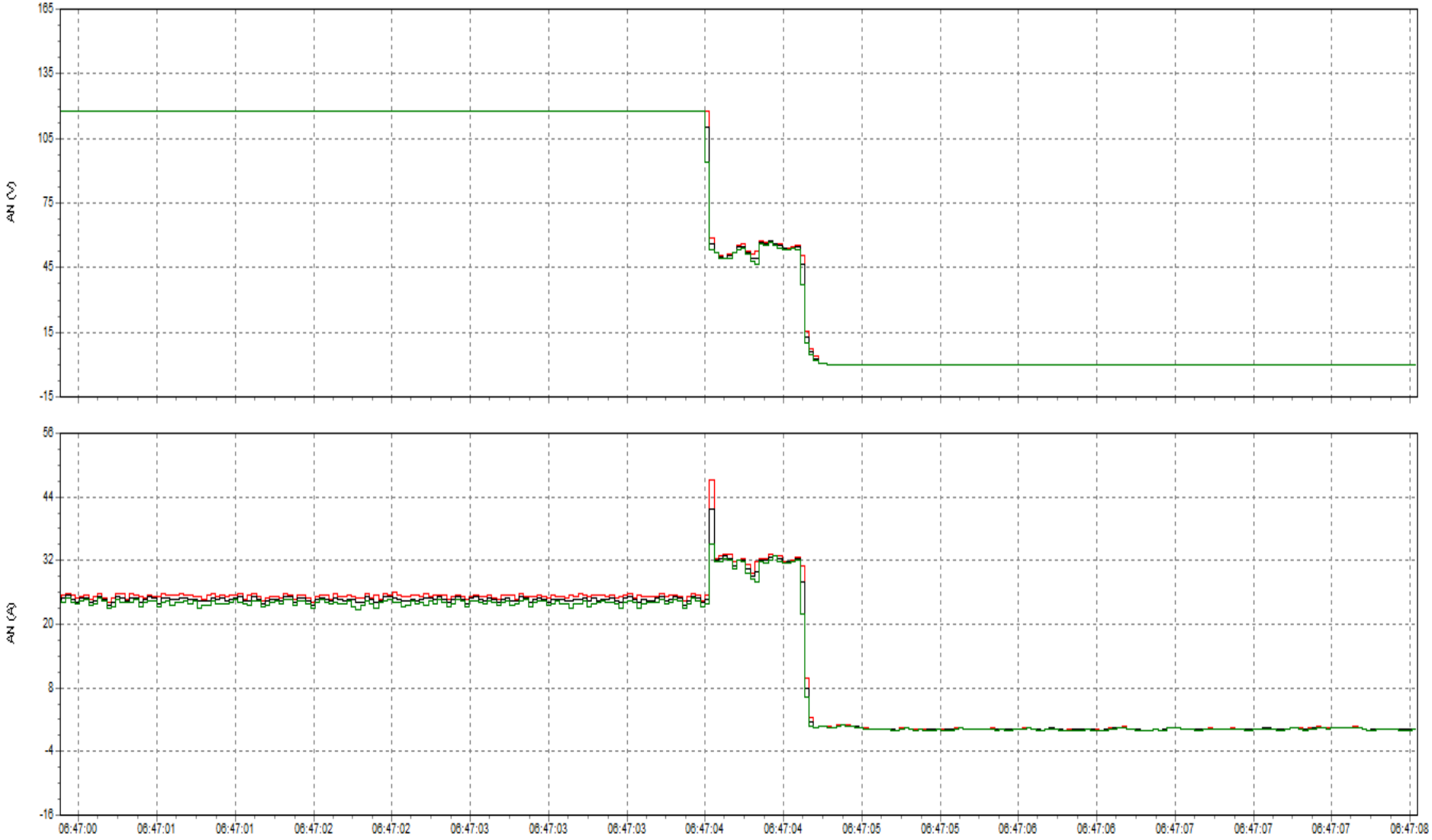
Residual voltage u[%]				Duration t[ms]			
	t < 10	10 <= t <= 200	200 < t <= 500	500 < t <= 1000	1000 < t <= 5000	5000 < t <= 60000	60000 < t
90 > u >= 80	16	5	0	0	0	0	0
80 > u >= 70	5	0	0	0	0	0	0
70 > u >= 40	0	2	0	0	0	0	0
40 > u >= 5	0	0	1	0	0	0	0
5 > u	12	0	0	0	0	2	2

Swell voltage u[%]			Duration t[ms]		
	t < 10	10 <= t <= 500	500 < t <= 5000	5000 < t <= 60000	60000 < t
u >= 120	0	0	0	0	0
120 > u > 110	0	0	0	0	0

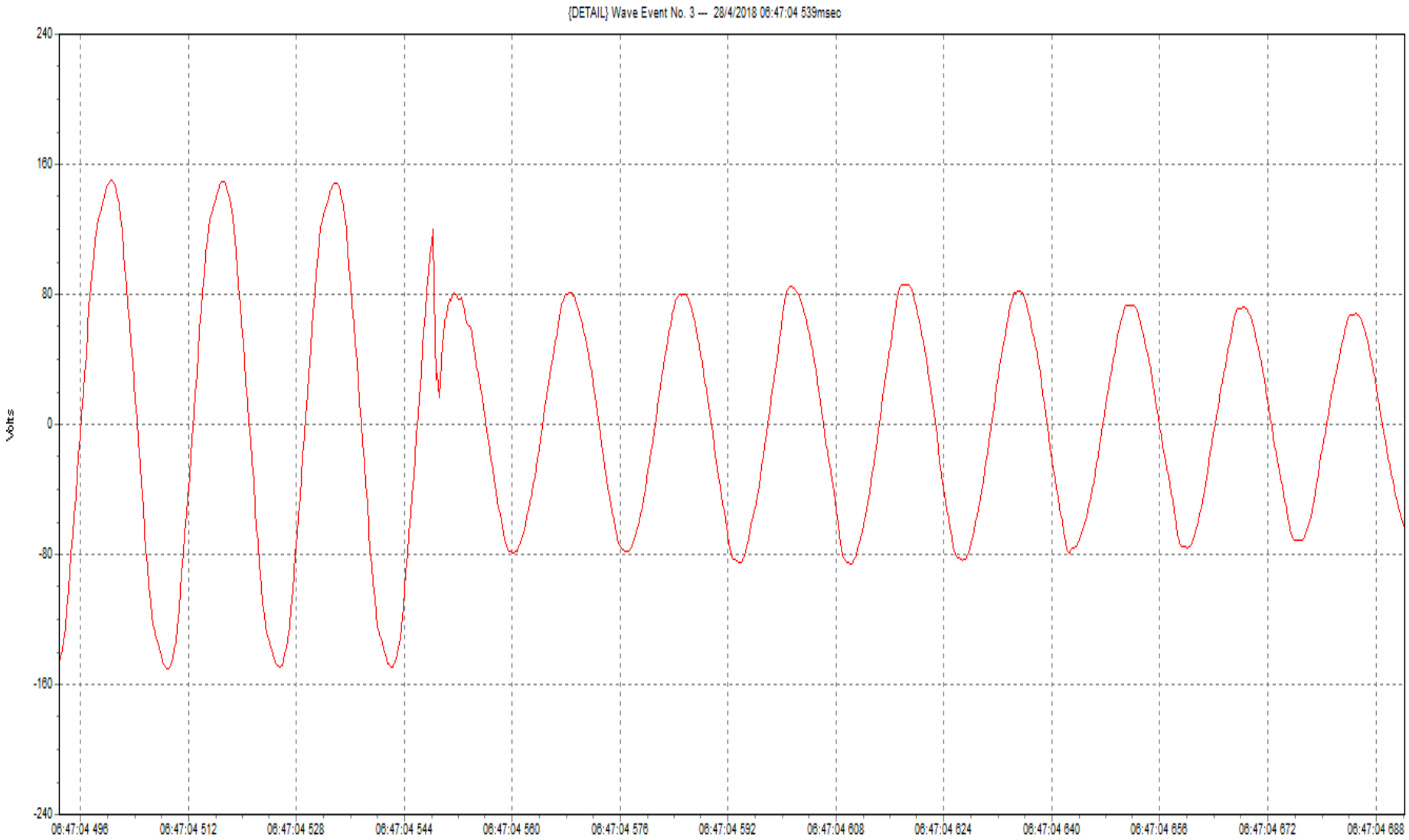
Anexo 2- 18. Sags registrados



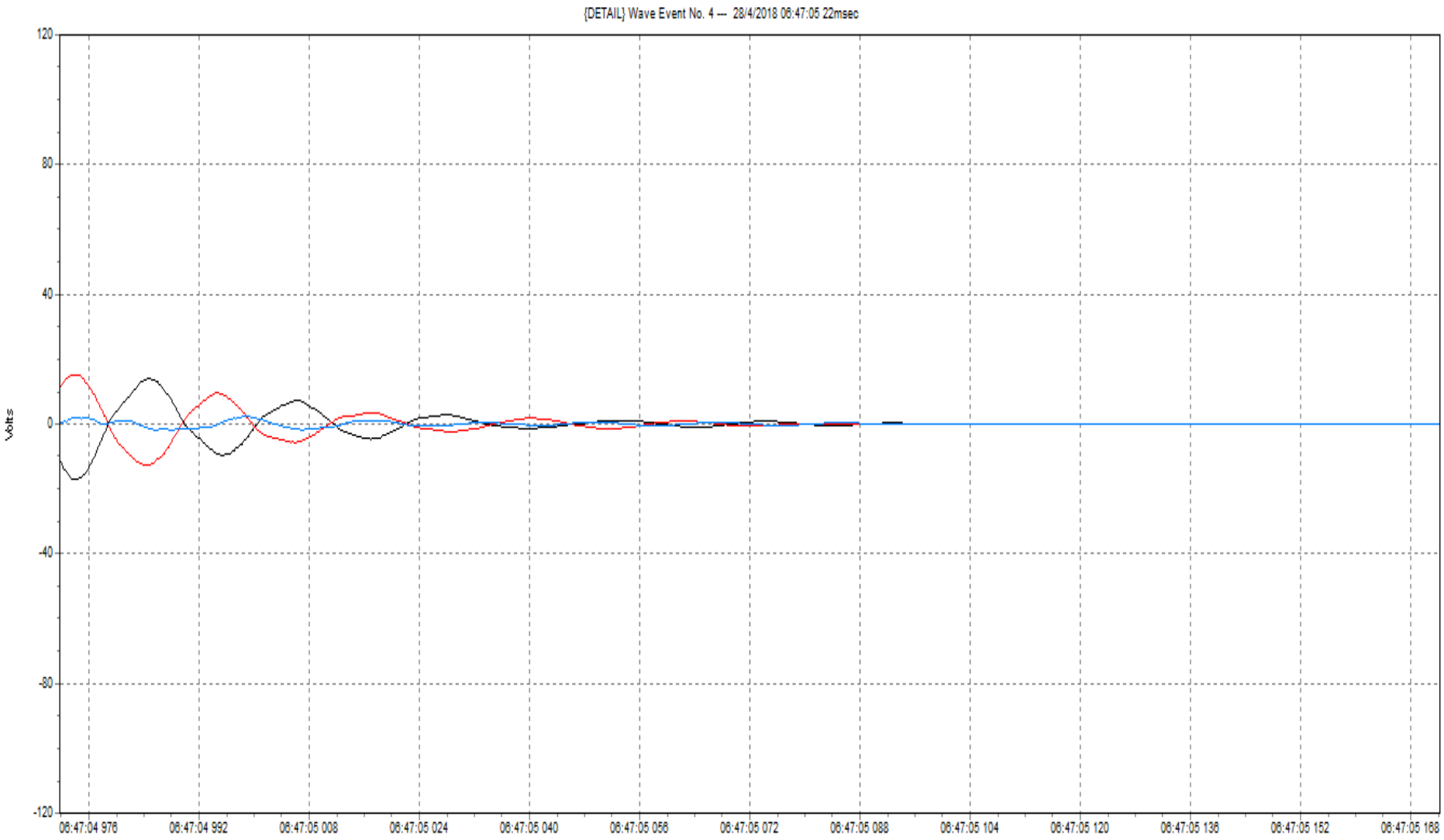
Anexo 2- 19. Comportamiento de sag registrado



Anexo 2- 20. Sag dos registrado

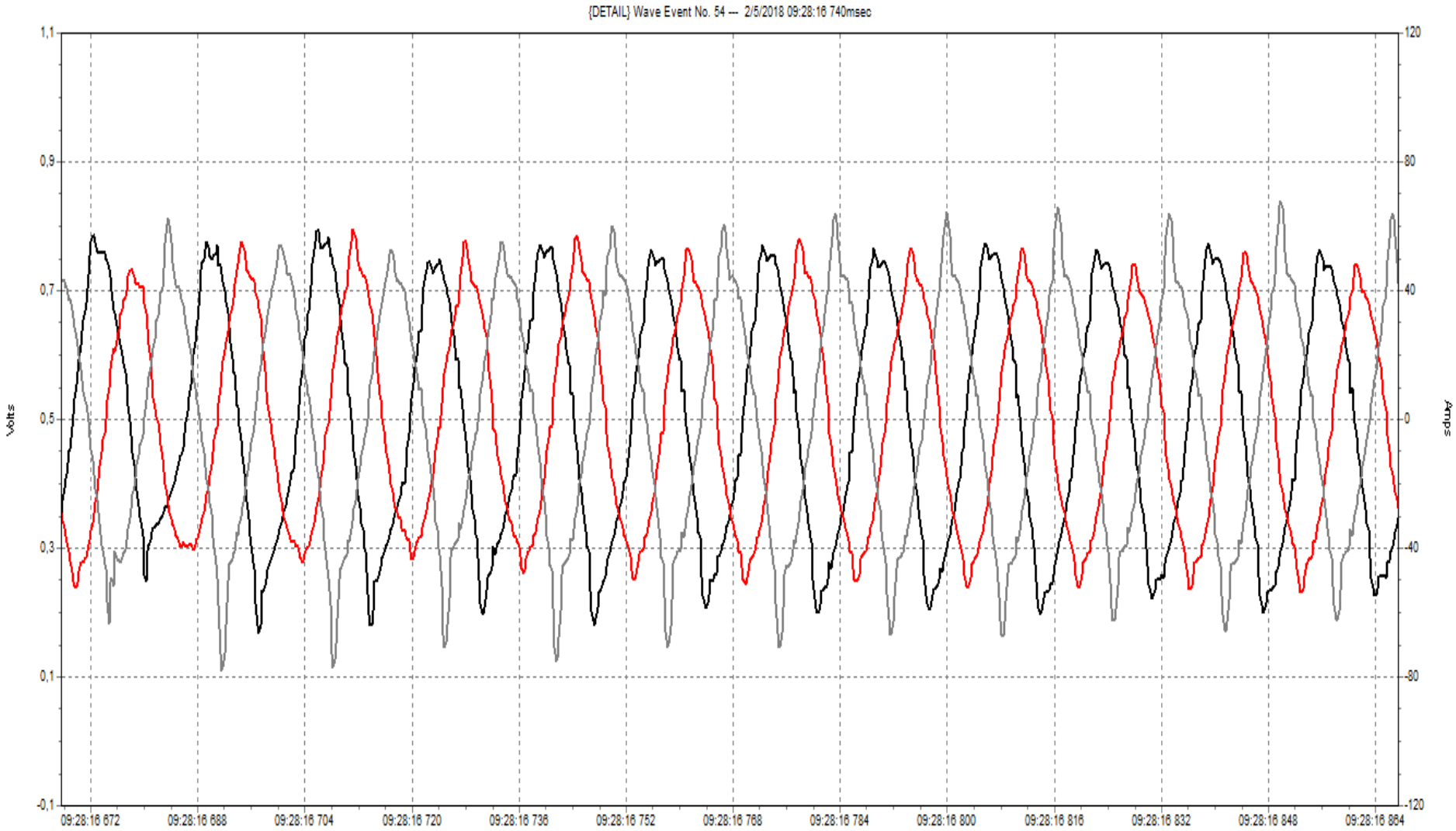


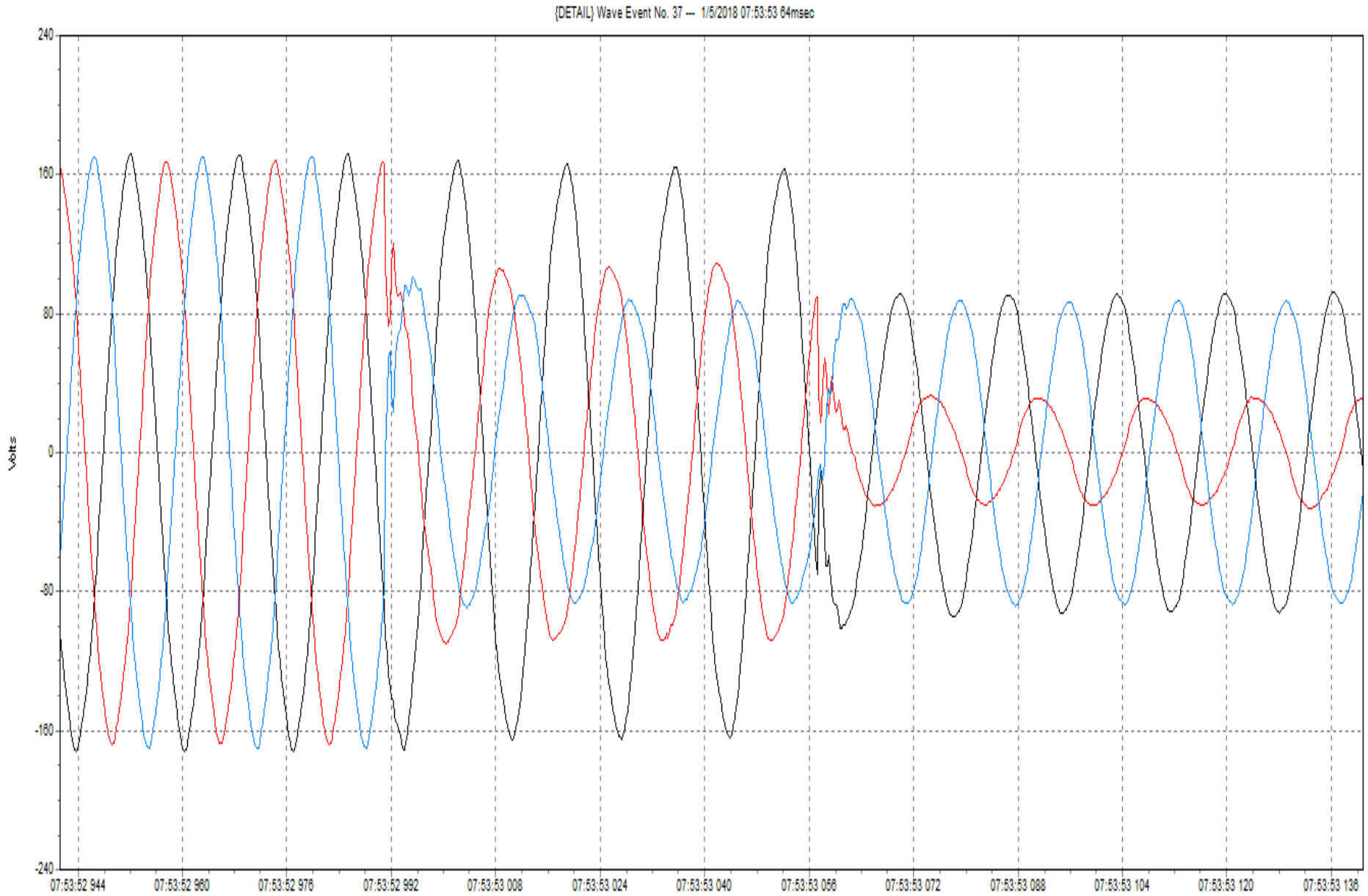
Anexo 2- 21. Interrupción de la alimentación



Anexo 2- 22. Comportamiento de la interrupción en la fase A

Anexo 2- 23. Forma de onda de corriente con presencia de armónicos



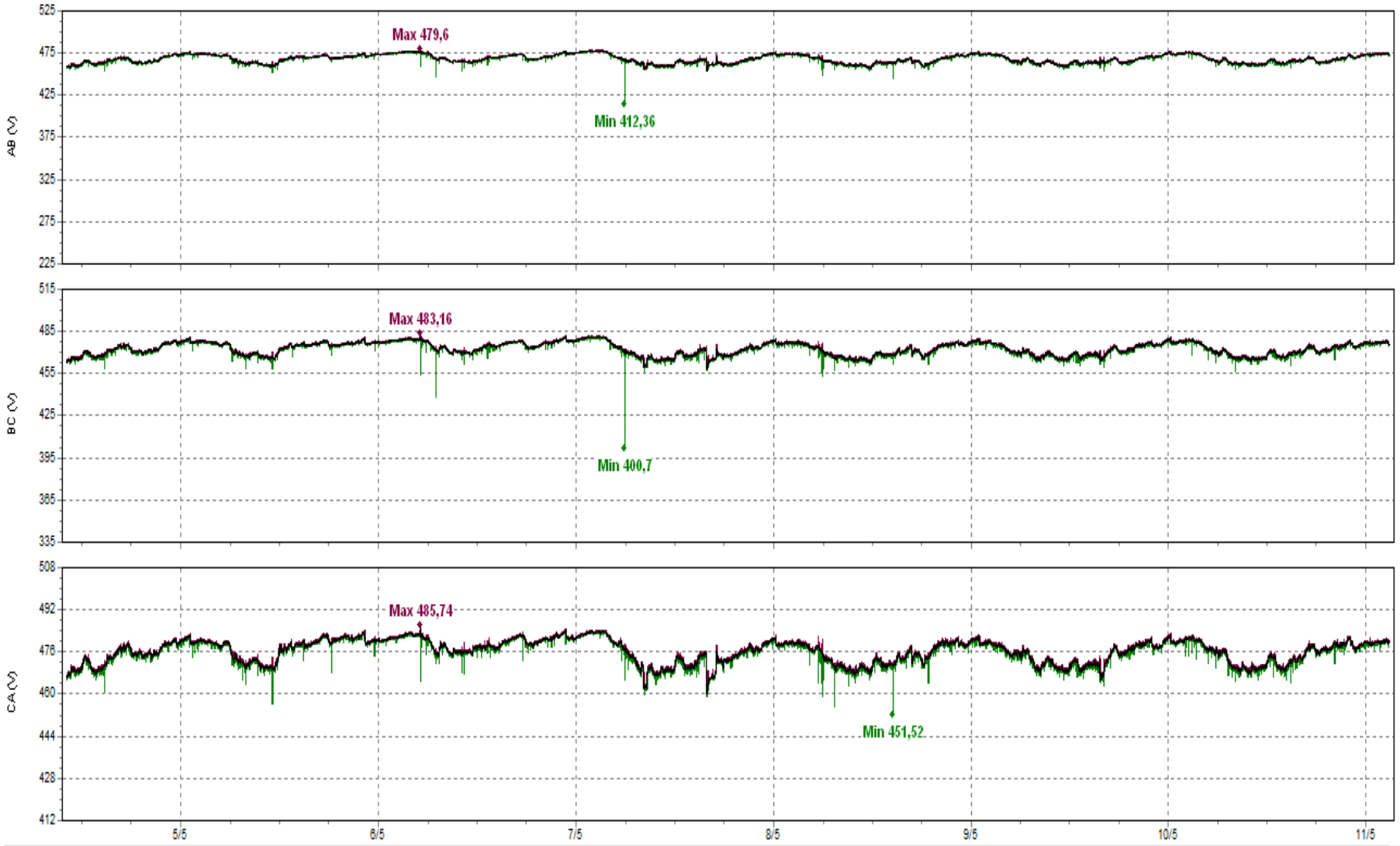

{DETAIL} Wave Event No. 37 --- 1/5/2018 07:53:53 64msec
Volts
240
160
80
0
-80
-160
-240
07:53:52 944
07:53:52 960
07:53:52 976
07:53:52 992
07:53:53 008
07:53:53 024
07:53:53 040
07:53:53 056
07:53:53 072
07:53:53 088
07:53:53 104
07:53:53 120
07:53:53 136

9) Anexos 3

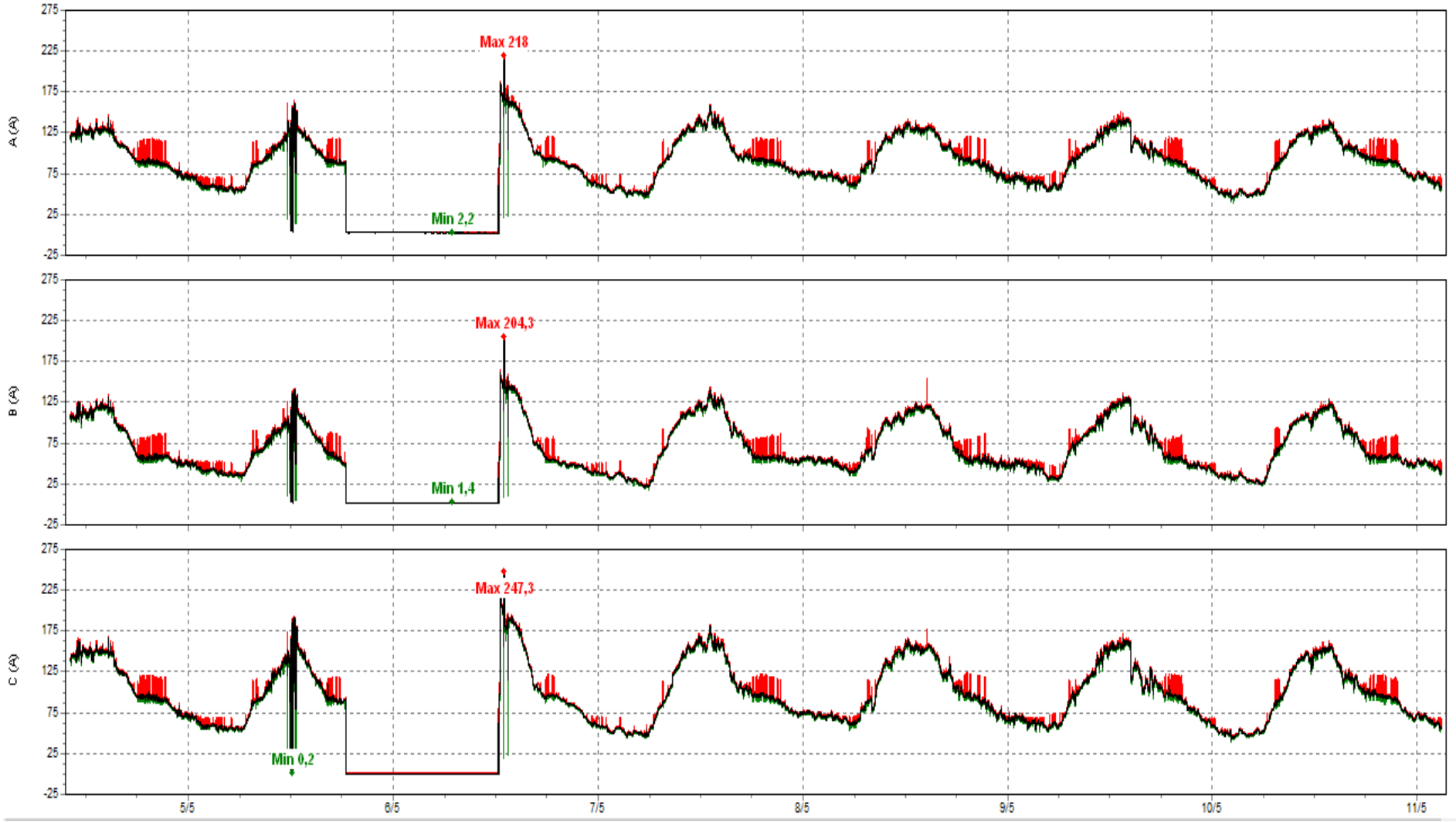
Mediciones calidad de energía en chiller

Cartago, 2018

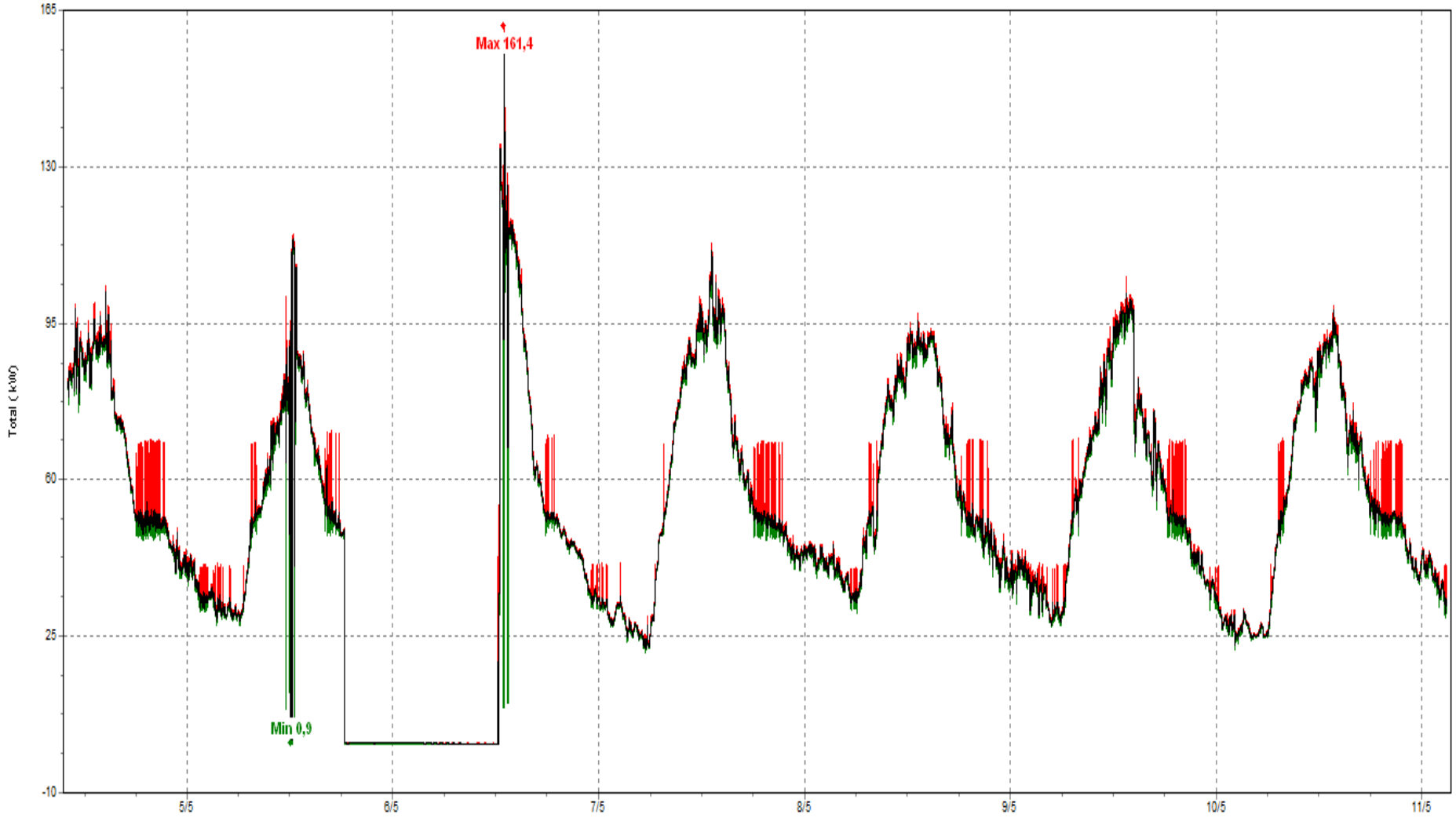
Anexo 3- 1. Valores de tensión de las tres fases



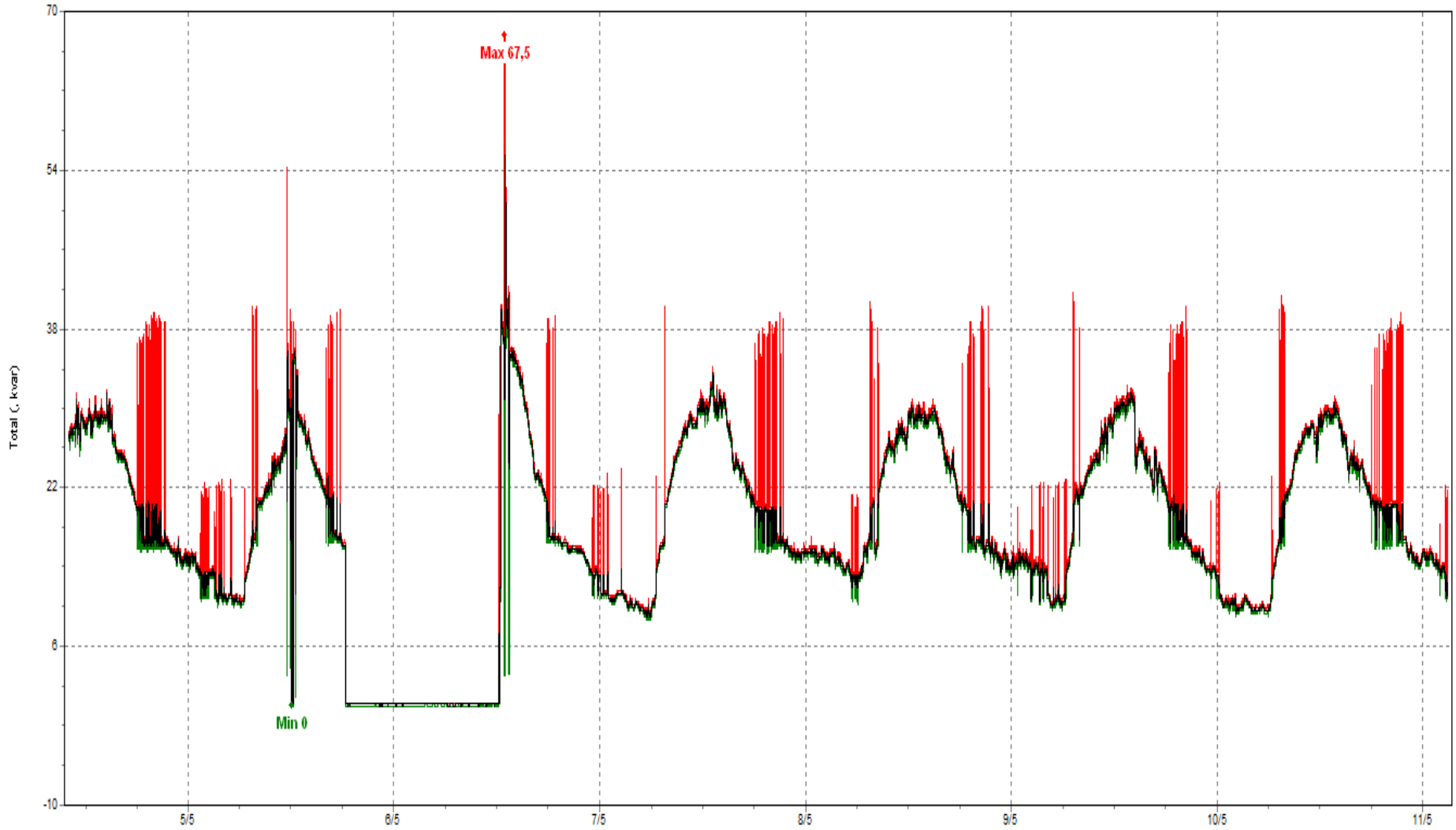
Anexo 3- 2. Valores de corriente registrados para las tres fases



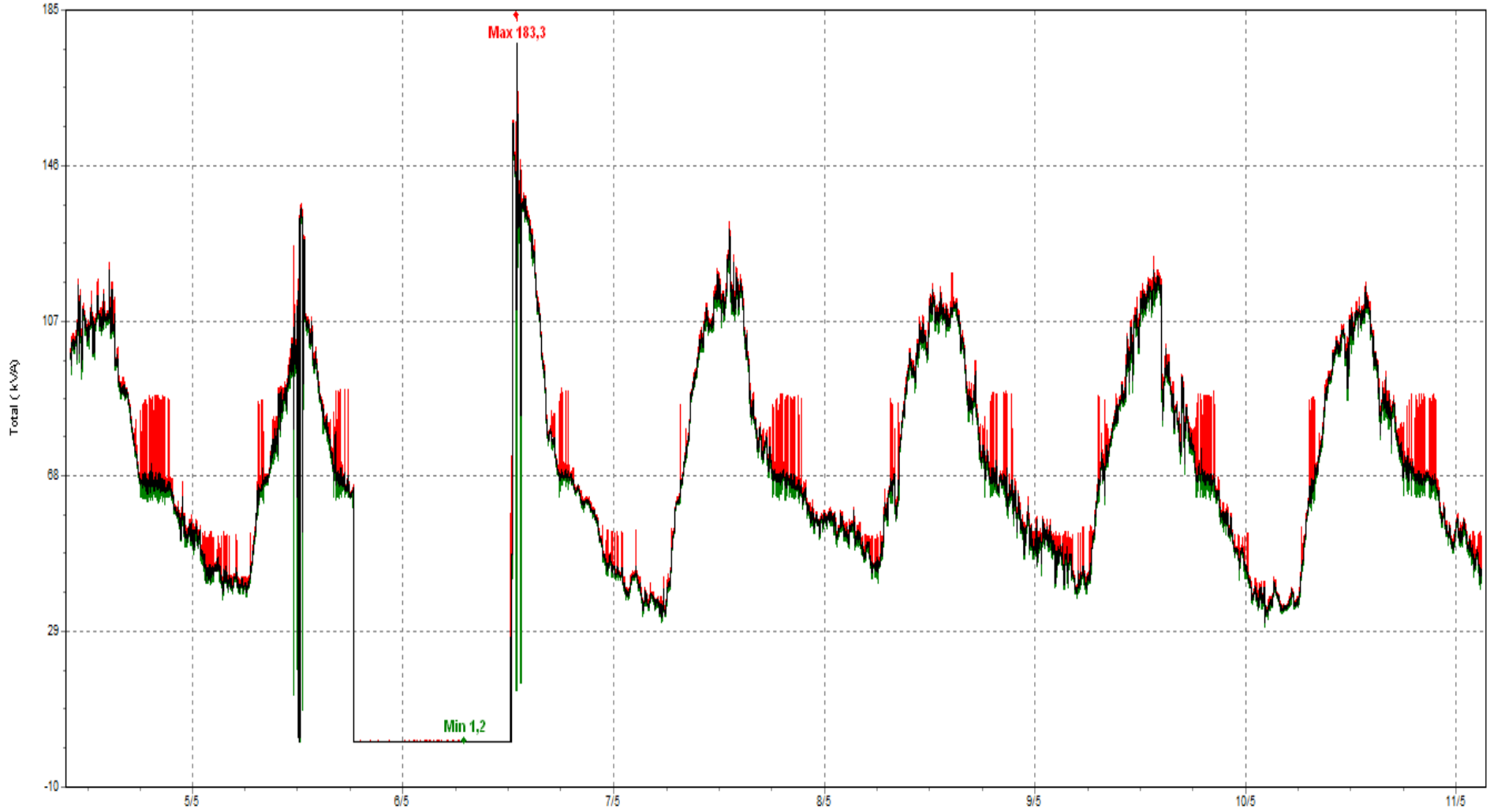
Anexo 3- 3. Potencia real registrada



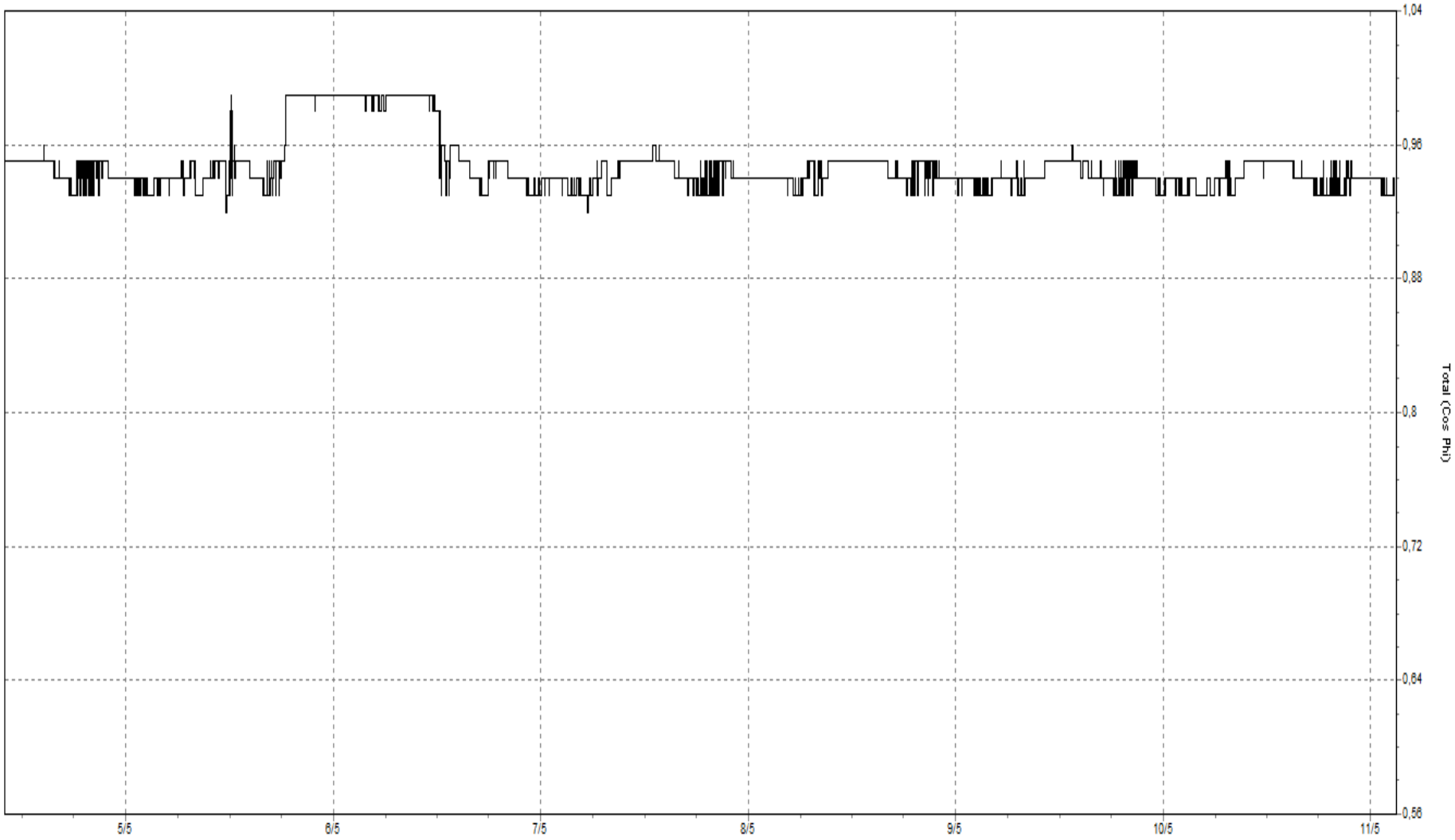
Anexo 3- 4. Potencia reactiva



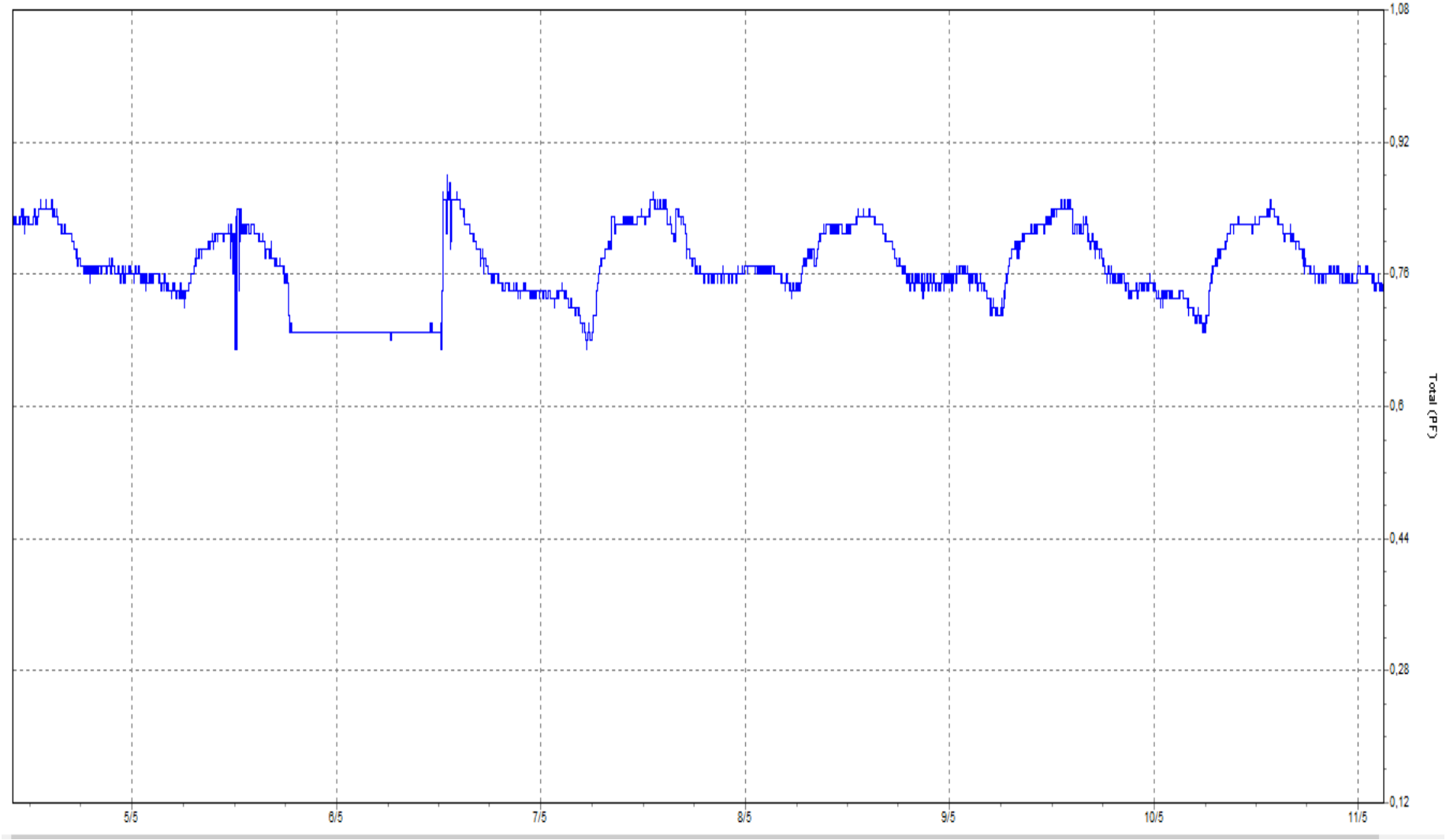
Anexo 3- 5. Potencia aparente



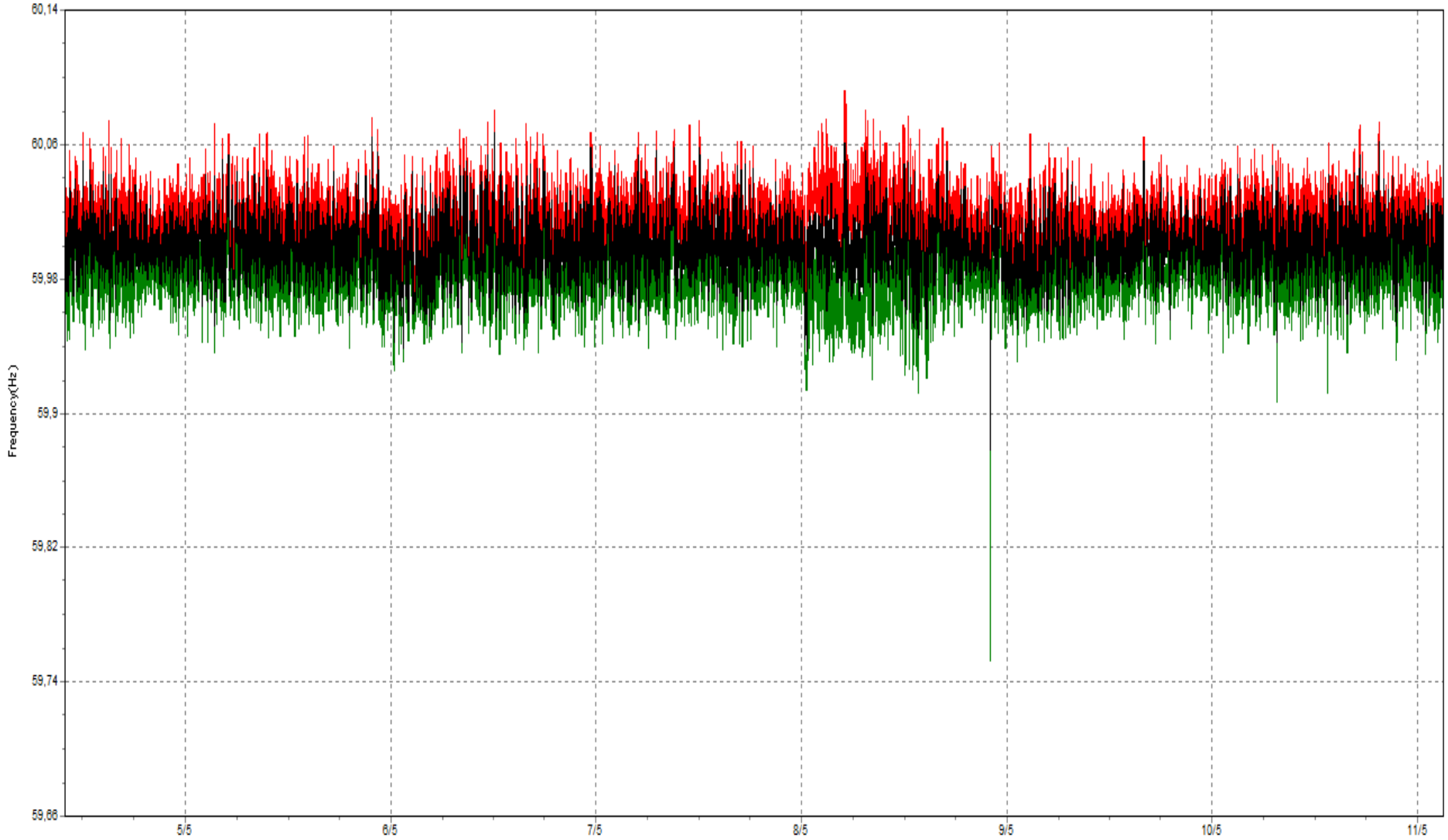
Anexo 3- 6. Factor de potencia de desplazamiento



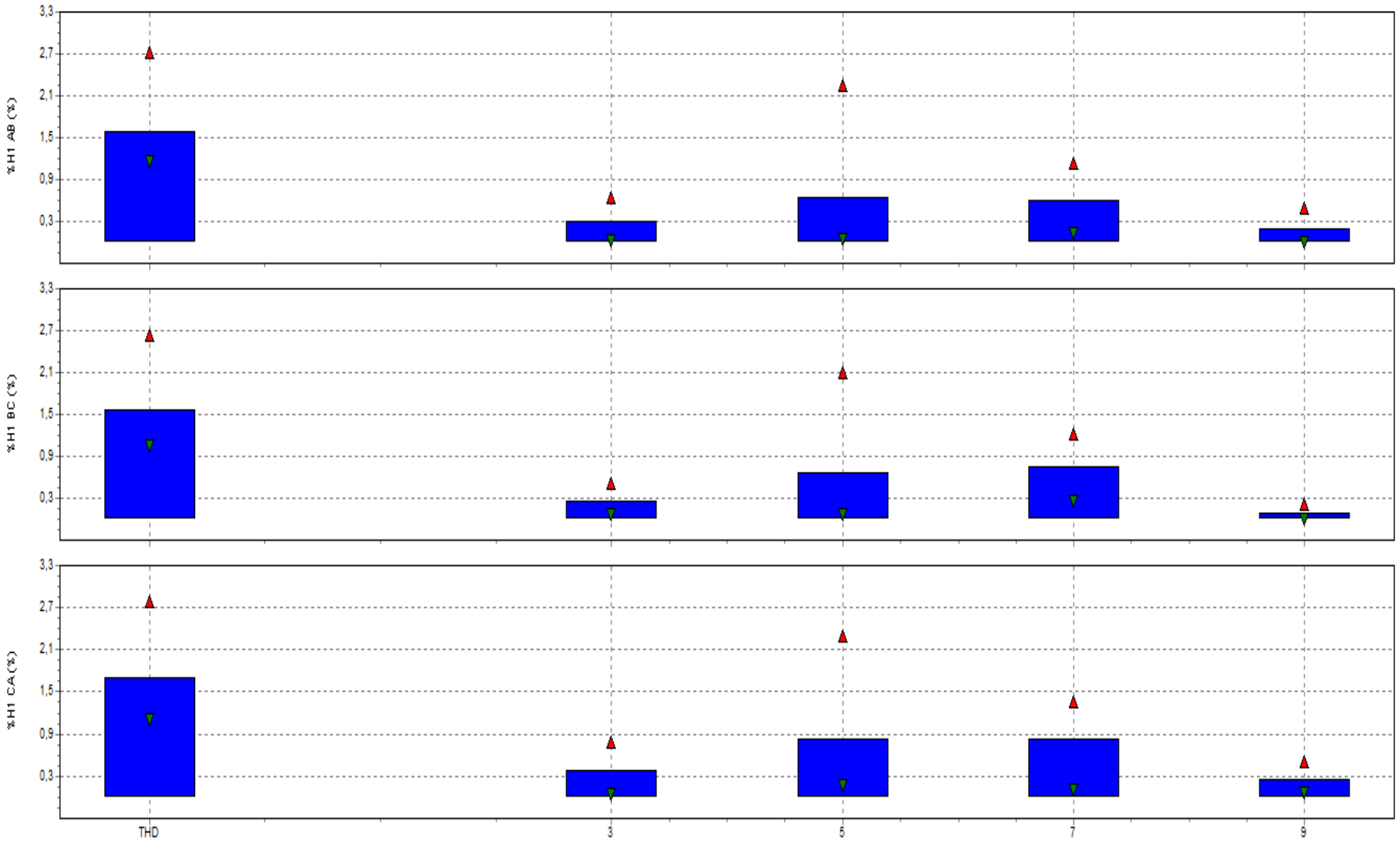
Anexo 3- 7. Factor de potencia con factor de distorsión



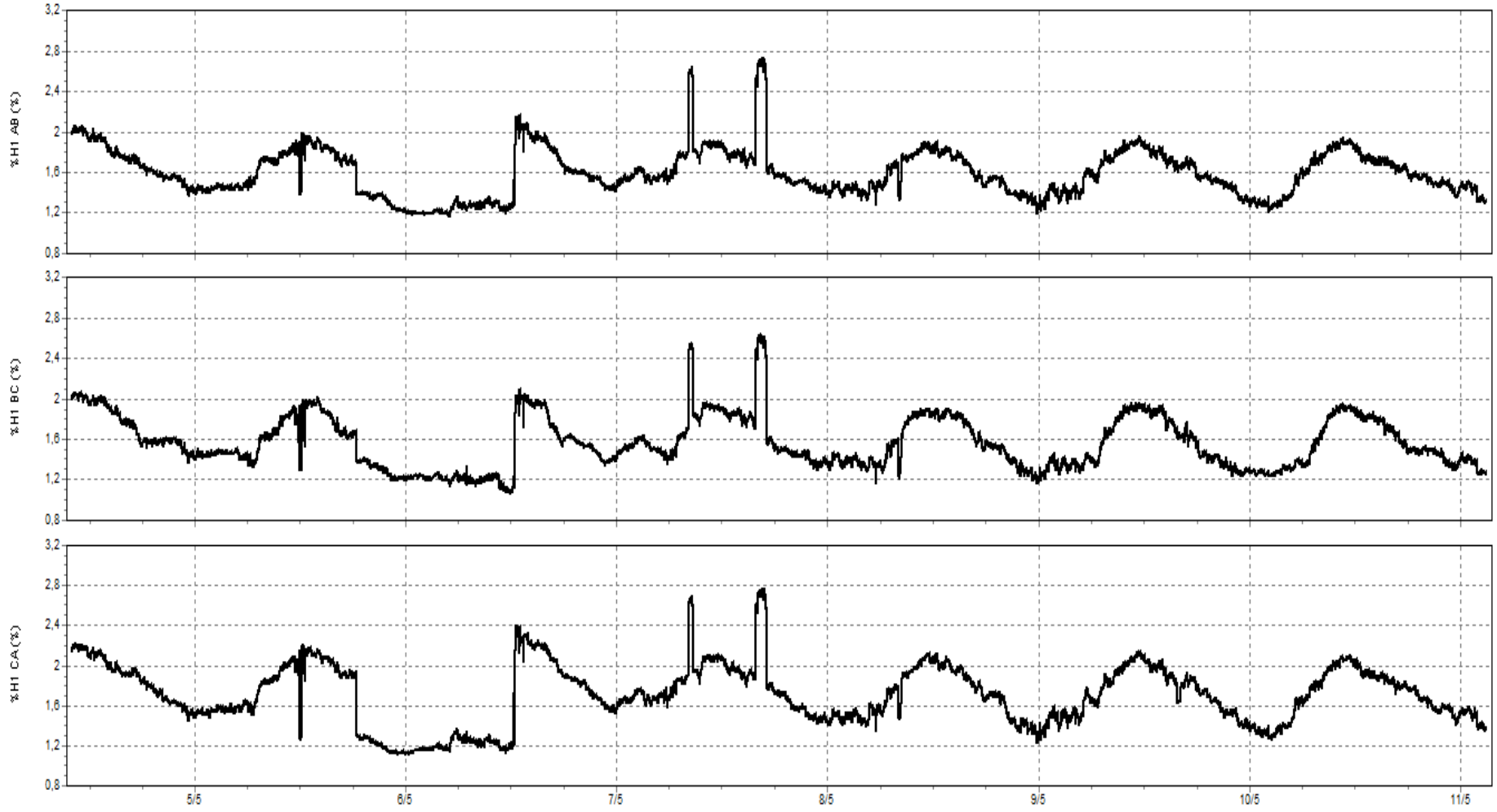
Anexo 3- 8. Frecuencia



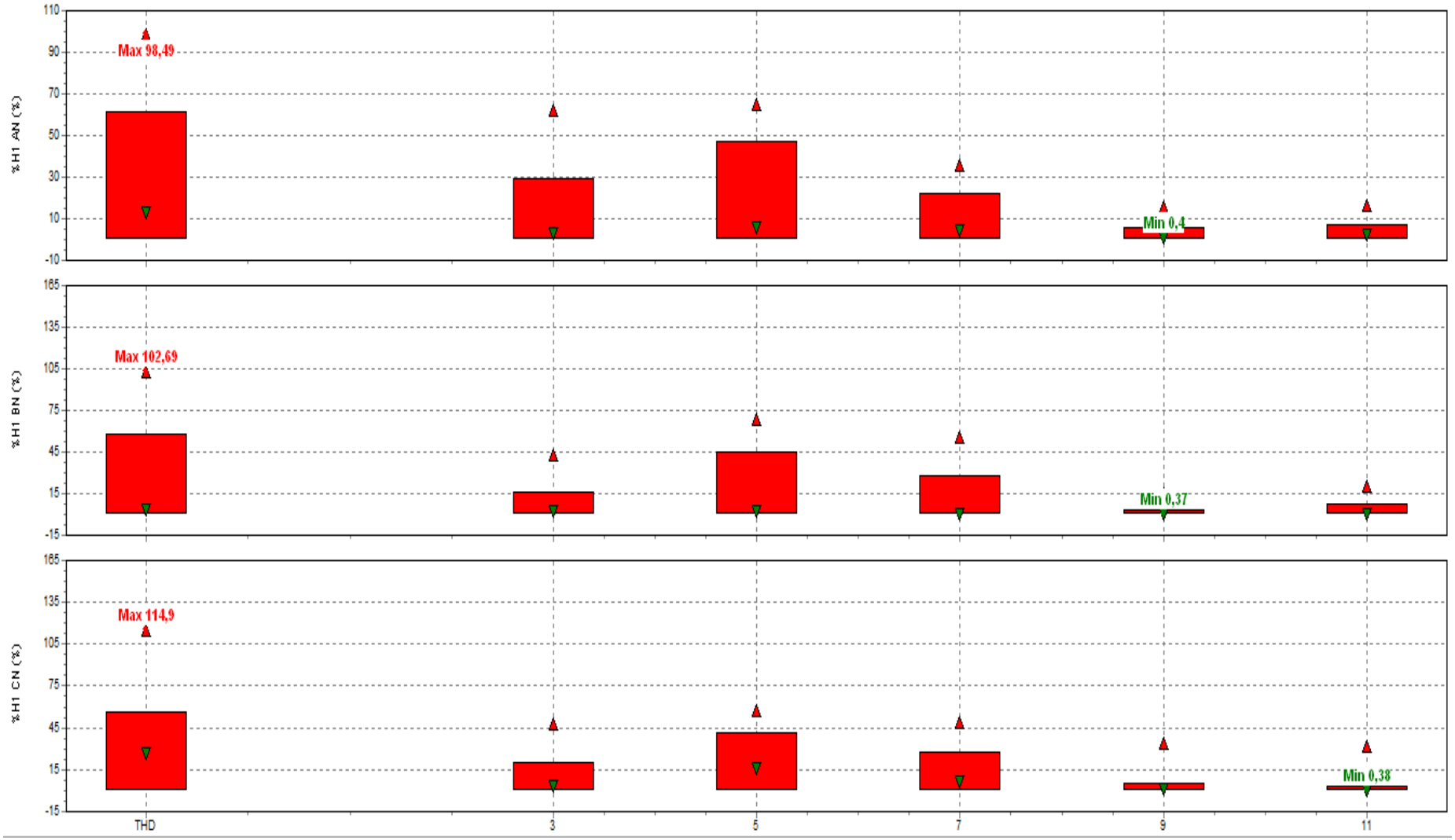
Anexo 3- 9. Distorsión armónica de tensión



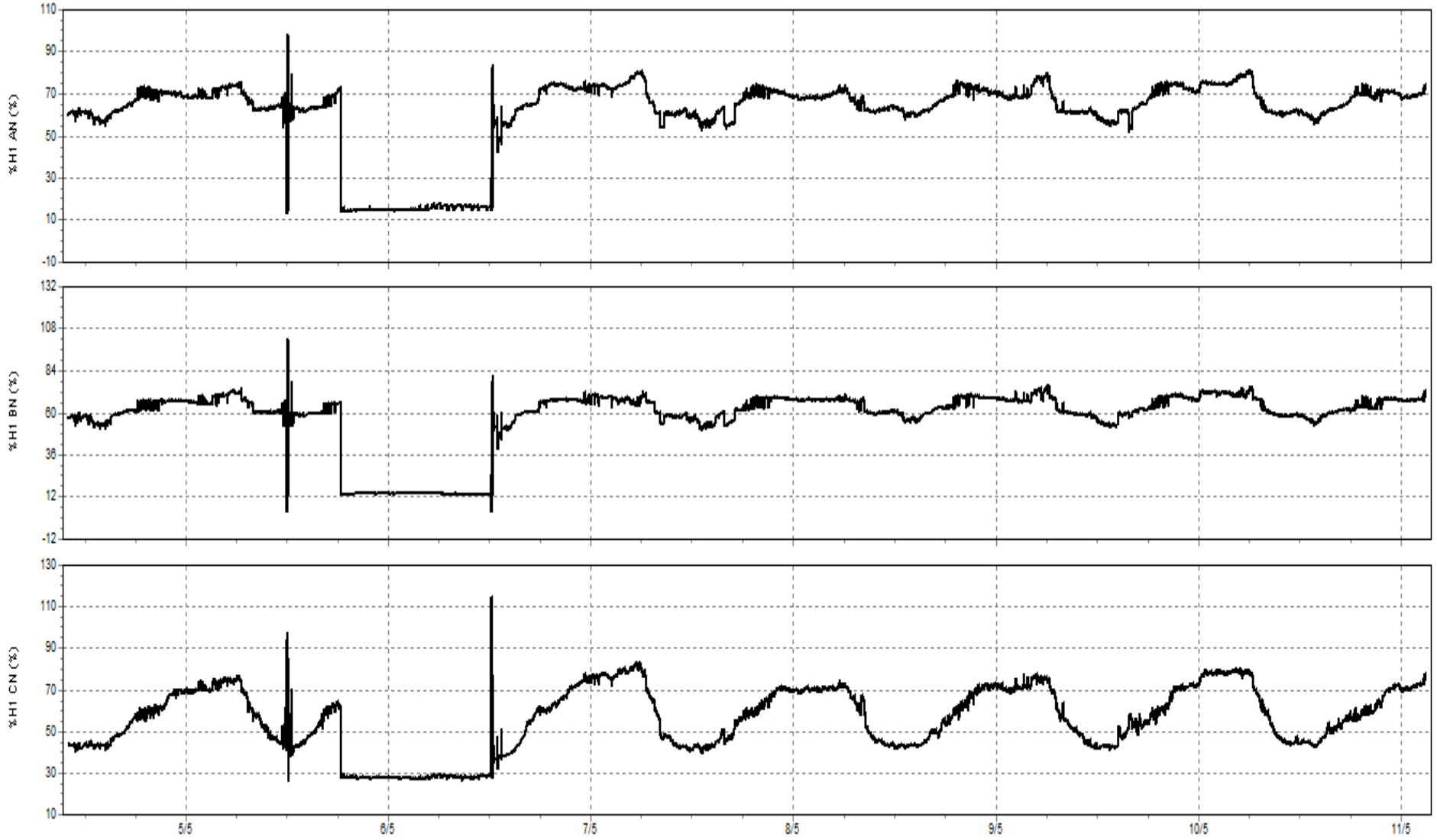
Anexo 3- 10. Perfil de distorsión armónica de tensión



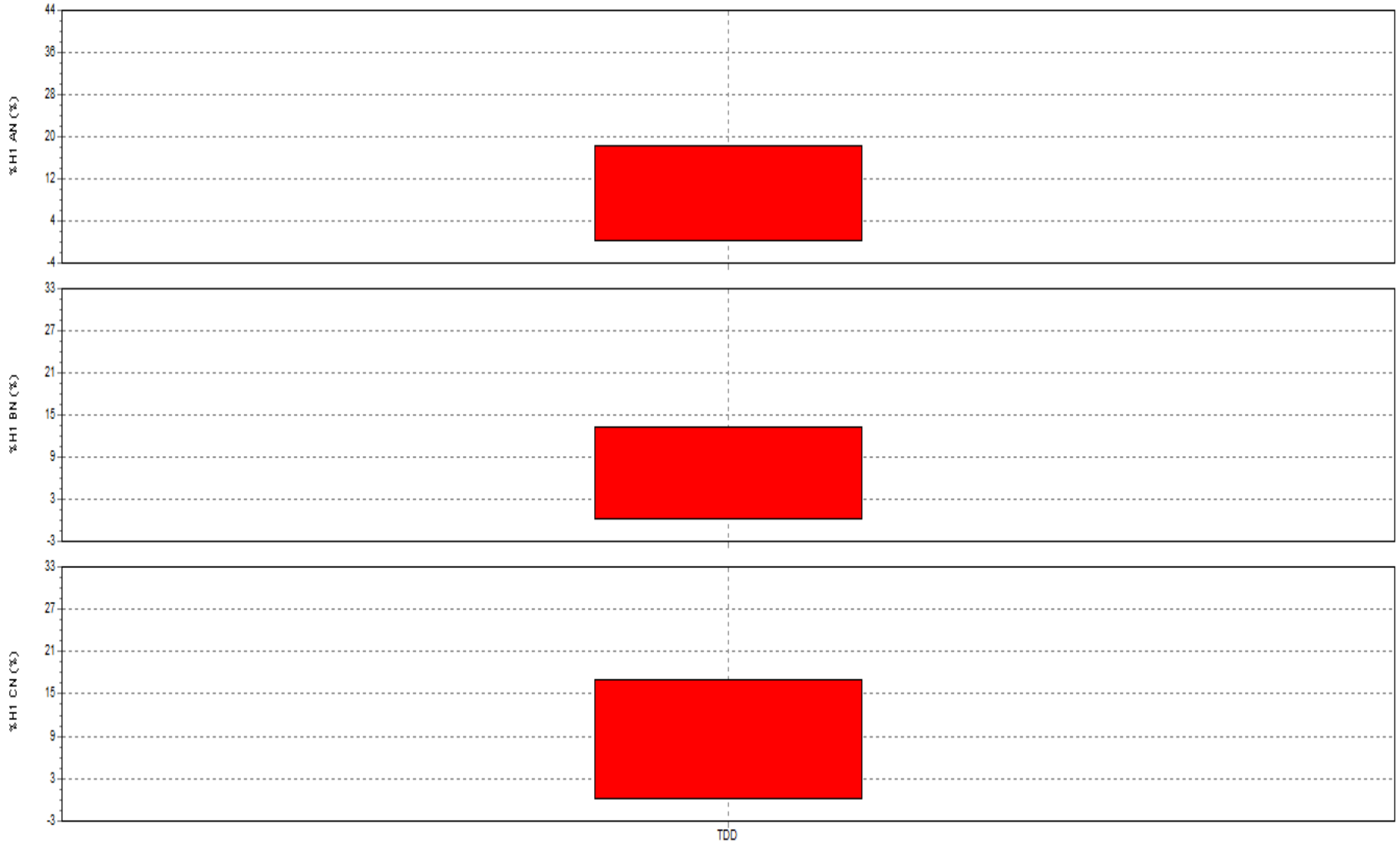
Anexo 3- 11. Distorsión armónica de corriente



Anexo 3- 12. Perfil de distorsión armónica de corriente



Anexo 3- 13. TDD



Anexo 3- 14. Desbalance entre fases

Summary

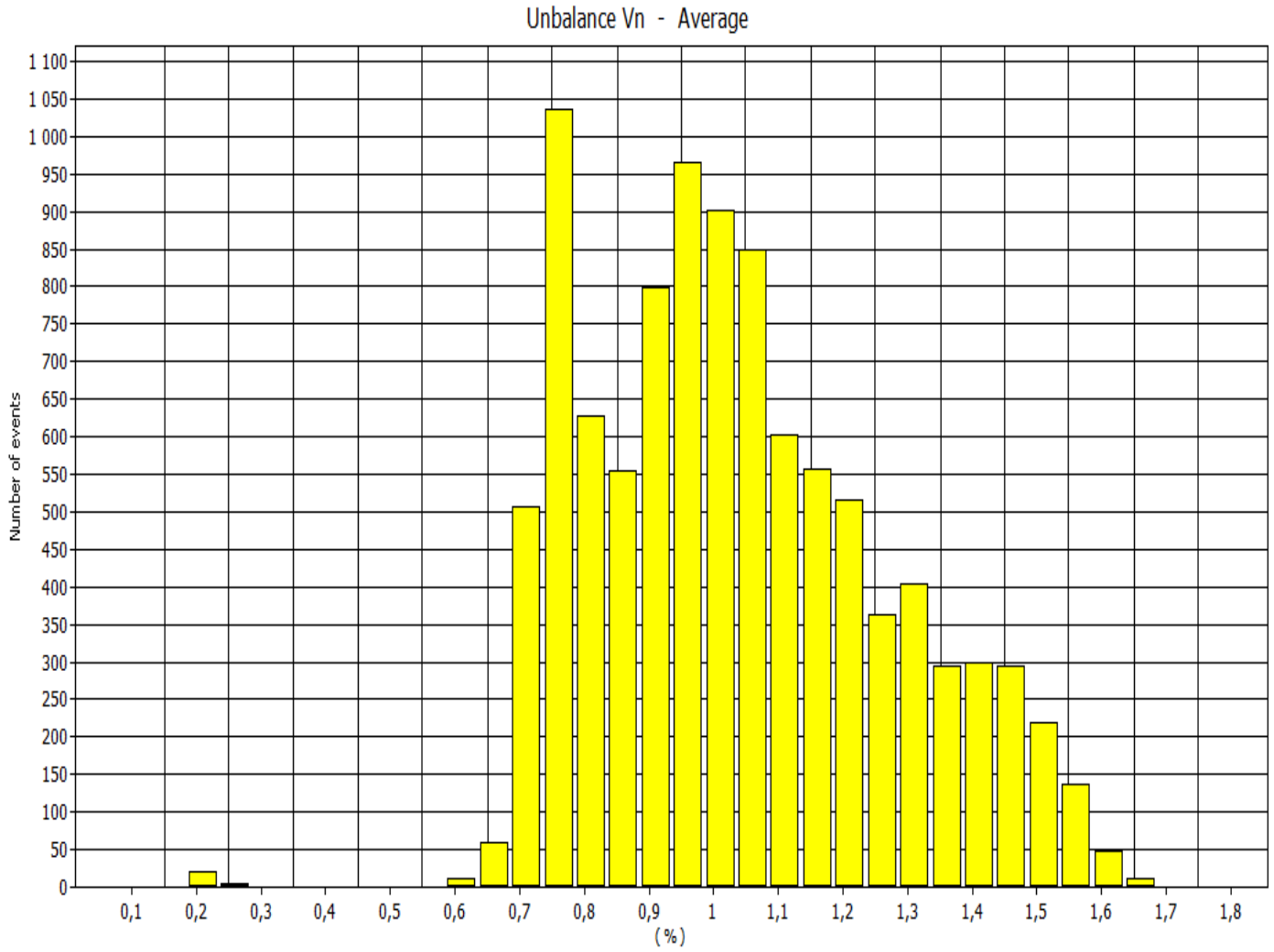
From	4/5/2018 10:05:13
To	11/5/2018 10:04:13
Maximum value	1,63 %
At	8/5/2018 19:31:13
Minimum value	0,16 %
At	9/5/2018 15:56:13
μ (Avg)	1,00815 %
s	0,230414 %
5% percentile	0,7 %
95% percentile	1,44 %
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0 %

Upper extreme values

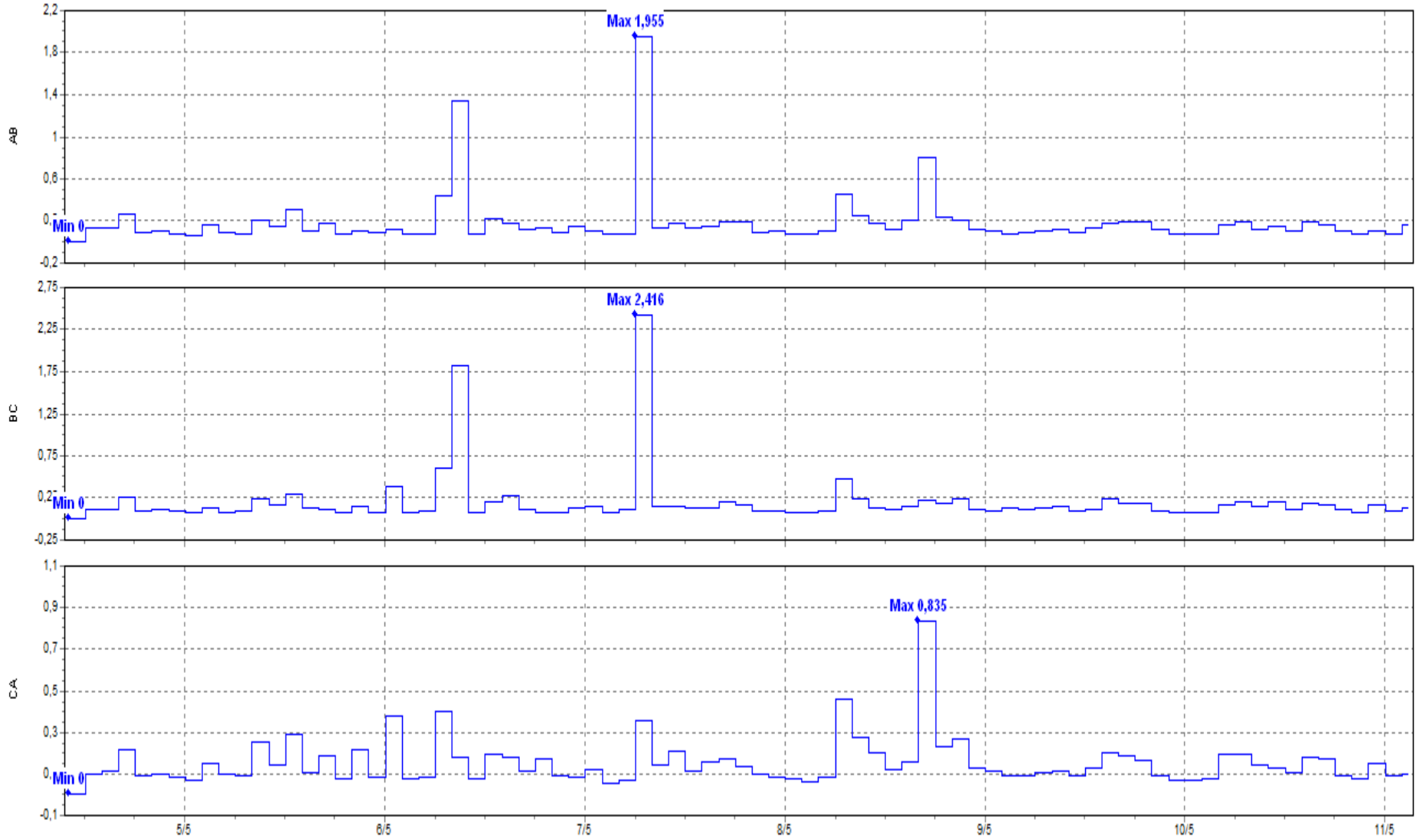
Date / Time	Value
8/5/2018 19:31:13	1,63
10/5/2018 19:03:13	1,62
10/5/2018 18:59:13	1,62
10/5/2018 18:57:13	1,62
10/5/2018 18:55:13	1,62

Lower extreme values

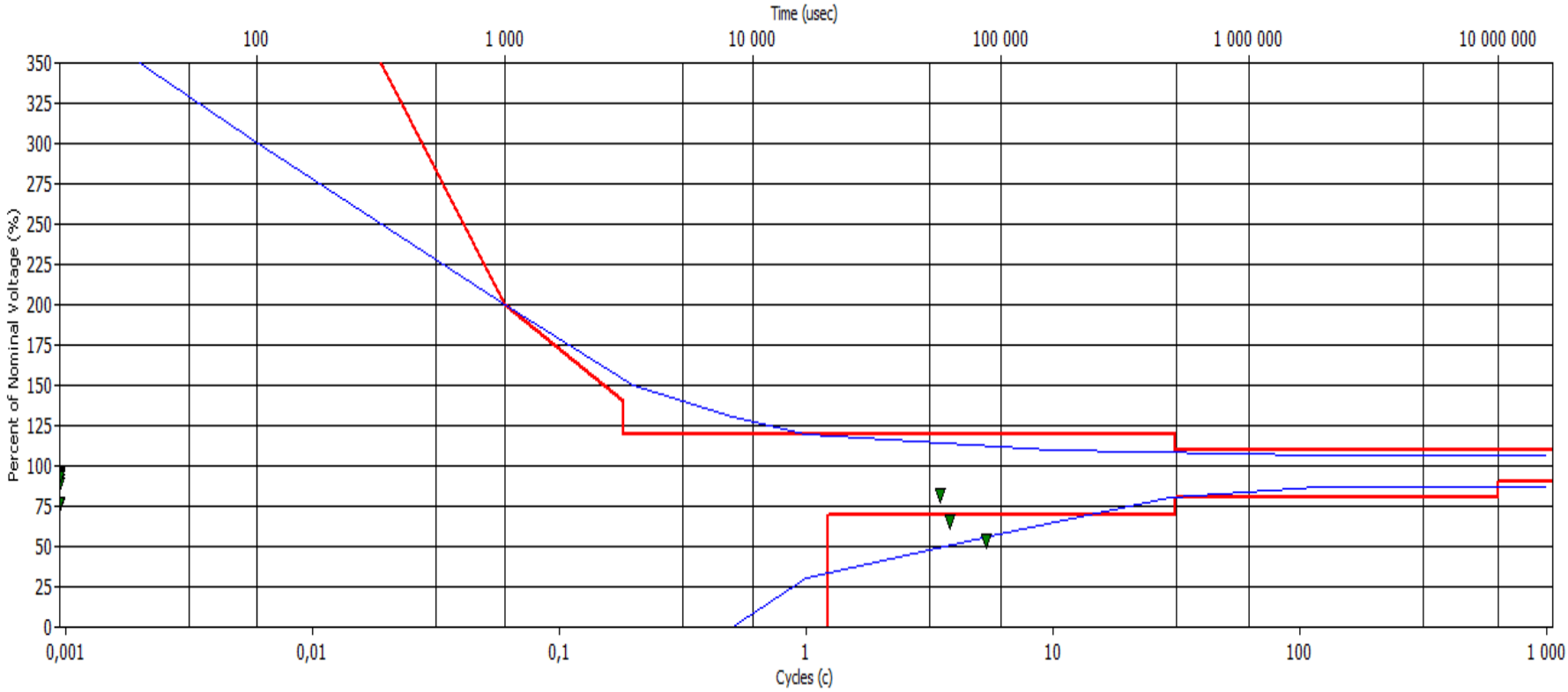
Date / Time	Value
9/5/2018 15:56:13	0,16
9/5/2018 15:45:13	0,17
9/5/2018 16:08:13	0,18
9/5/2018 16:07:13	0,18
9/5/2018 16:04:13	0,18



Anexo 3- 15.Flicker



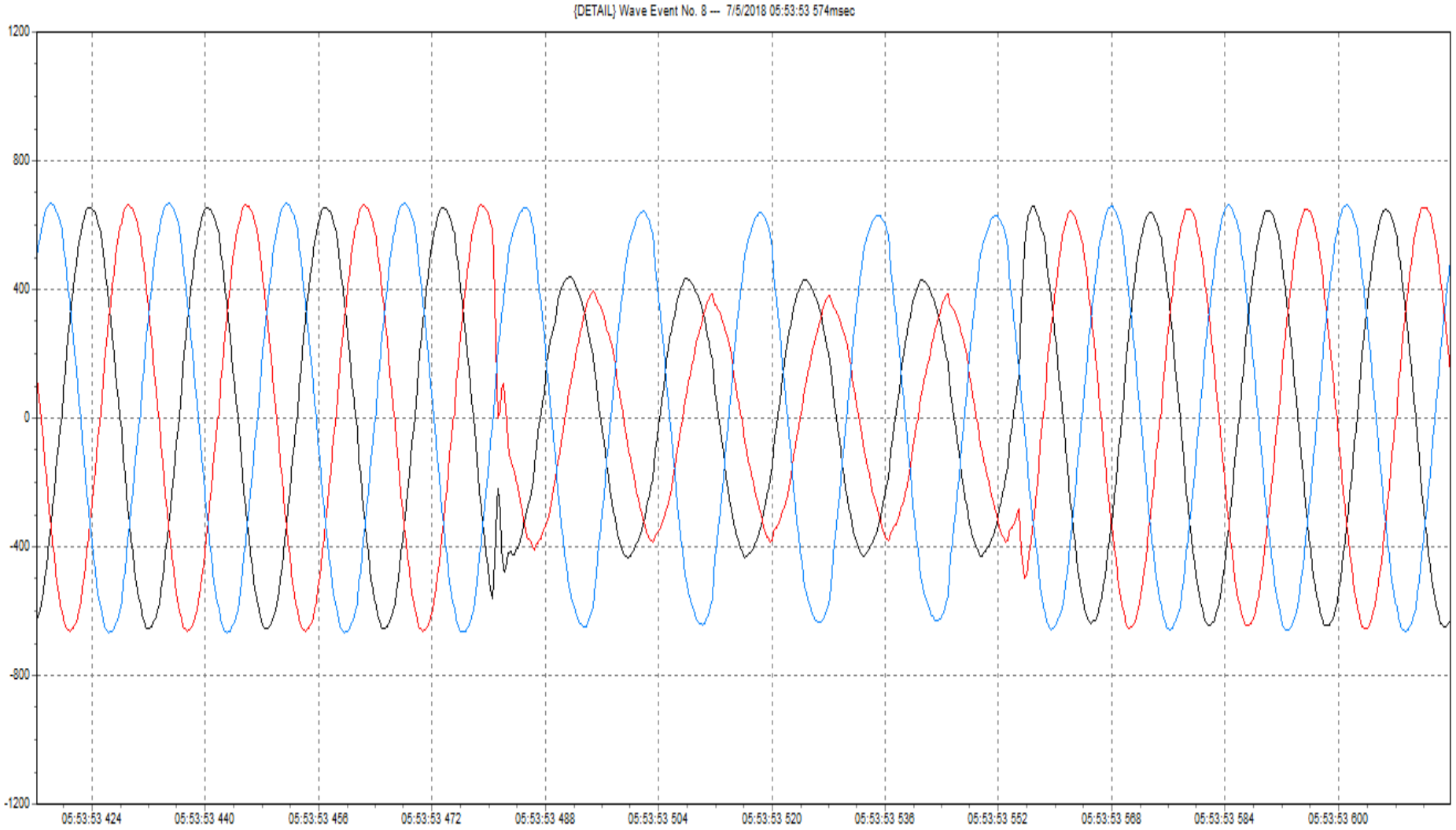
Anexo 3- 16. Curva CBEMA



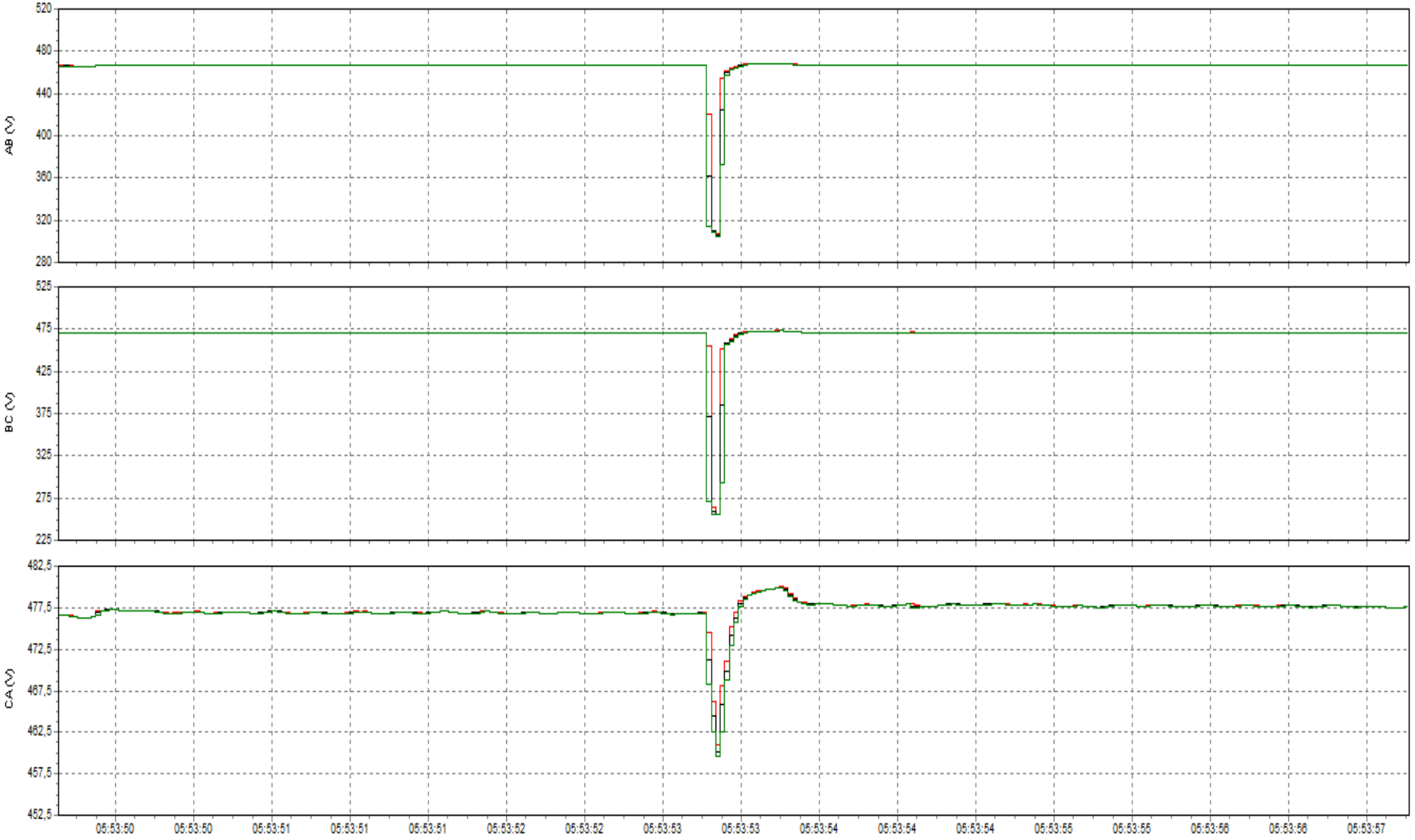
Residual voltage u[%]				Duration t[ms]			
	t < 10	10 <= t <= 200	200 < t <= 500	500 < t <= 1000	1000 < t <= 5000	5000 < t <= 60000	60000 < t
90 > u >= 80	4	1	0	0	0	0	0
80 > u >= 70	2	0	0	0	0	0	0
70 > u >= 40	0	2	0	0	0	0	0
40 > u >= 5	0	0	0	0	0	0	0
5 > u	0	0	0	0	0	0	0

Swell voltage u[%]			Duration t[ms]		
	t < 10	10 <= t <= 500	500 < t <= 5000	5000 < t <= 60000	60000 < t
u >= 120	0	0	0	0	0
120 > u > 110	0	0	0	0	0

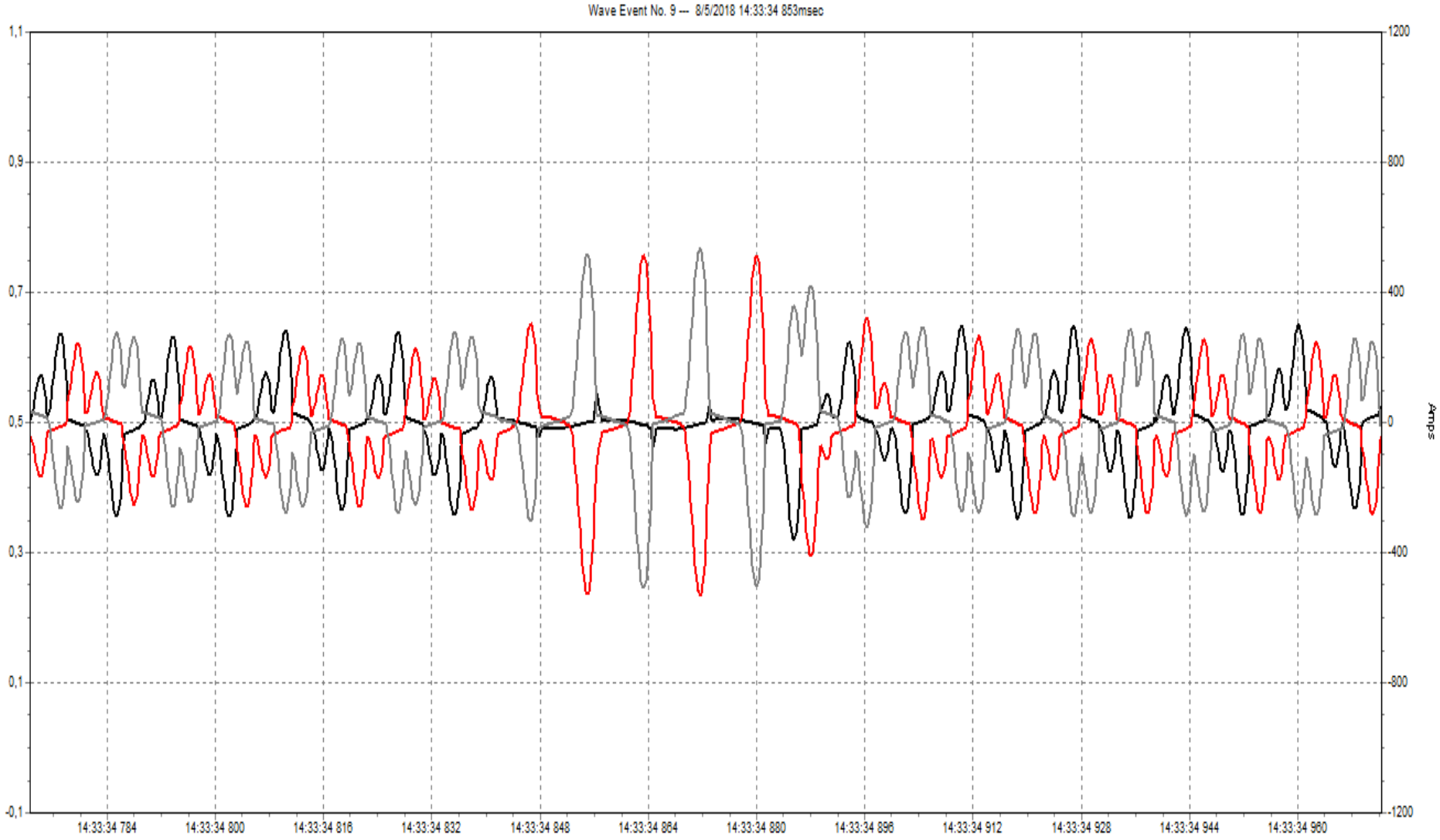
Anexo 3- 17. Sag registrado



Anexo 3- 18. Comportamiento de sag registrado



Anexo 3- 19. Armónicas presentes en onda de corriente



10) Anexo 4

Diagrama Unifilar

Cartago, 2018